Journal of the Nivar
Homepage: https://nivar.irimo.ir
Vol. 50, No. 132-133, Spring and Summer 2026, P. 1-17
(Research Article)

Developing an Integrated IoT-AI-Metaverse Framework for Transforming Water Governance in Iran

Ansari Ghojghar, M.[1]✉ | Pour Mohammad, P.[2]

1. Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Ph.D. candidate, Department of Reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: Ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(Received: 07 Mar 2025, Revise: 16 Apr 2025, Accepted: 06 May 2025, Published online: 21 Mar 2026)

Abstract

Water resources management is facing increasing challenges, including climate change, rising demand, resource limitations, and the inefficiency of traditional management structures. As a result, the need for smartening management and utilization patterns to achieve sustainable exploitation and preserve water resources has become more pronounced. In this regard, the present study aims to propose an innovative integrated framework by combining artificial intelligence, the Internet of Things (IoT), and the metaverse technologies to enhance decision-making processes, increase efficiency, and improve the resilience of water governance systems. Unlike previous studies, which have individually focused on new technologies in water resource management, this research explores the synergy between AI, IoT, and the metaverse in a combined framework to enhance water governance. Achieving this goal is possible through shifting the governance approach from a government-centric, value-driven model to a community-oriented, outcome-focused approach, utilizing modern predictive tools and visualization, as well as engaging the entire community. To achieve the aforementioned goal, this research was conducted through a descriptive-analytical method and based on library resources. The results of this study show that adopting this approach can improve transparency, increase the efficiency of distribution systems, reduce resource wastage, and enhance adaptive capacity in conditions of uncertainty. However, implementing this framework requires the development of communication infrastructures, the establishment of appropriate legal frameworks, ensuring data security and privacy, and enhancing managerial and technical capacities in relevant institutions.

Keywords: Facilitation, Visualization, Water Resources Management, Public Participation, Automated Sensors, Virtual reality.

Cite this article: Ansari Ghojghar,M. and Pour Mohammad,P. (2026). Developing an Integrated IoT-AI-Metaverse Framework for Transforming Water Governance in Iran. *Nivar*, 50(132-133), 1-17. doi: 10.30467/nivar.2025.510982.1325

E-mail: (2) Paria.pormohamad7@ut.ac.ir

Publisher: Iran Meteorological Organization
DOI: https://doi.org/10.30467/nivar.2025.510982.1325
Print ISSN: 1735-0565
Online ISSN: 2645-3347

نیوار
نشانی اینترنتی مجله: https://nivar.irimo.ir
دوره ۵۰، شماره ۱۳۲- ۱۳۳، بهار و تابستان ۱۴۰۵، صفحه ۱ - ۱۷
(مقاله پژوهشی)

ارائه چارچوب تلفیقی اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس به‌منظور تغییر شیوه حکمرانی آب در ایران

محمد انصاری قوجقار [۱] ✉ | پریا پورمحمد [۲]

۱. استادیار، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
۲. دانشجو دکتری، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: Ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۷، بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶، انتشار آنلاین: ۱۴۰۵/۰۱/۰۱)

چکیده

مدیریت منابع آب با چالش‌های فزاینده‌ای از جمله تغییرات اقلیمی، افزایش تقاضا، محدودیت منابع و ناکارآمدی ساختارهای مدیریتی سنتی مواجه است. از این رو، هوشمندسازی الگوهای مدیریتی و بهره‌برداری در راستای دستیابی به بهره‌برداری پایدار و حفظ منابع آبی بیش از پیش احساس می‌شود. در این راستا، پژوهش حاضر با هدف ارائه یک چارچوب تلفیقی نوین، از ترکیب فناوری‌های هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و متاورس برای بهبود فرآیندهای تصمیم‌گیری، افزایش کارایی و ارتقای تاب‌آوری نظام حکمرانی آب بهره می‌برد. برخلاف پژوهش‌های پیشین که هر یک به‌صورت جداگانه به فناوری‌های نوین در مدیریت منابع آب پرداخته‌اند، این مطالعه با ارائه یک چارچوب تلفیقی، هم‌افزایی میان هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء و متاورس را برای ارتقای حکمرانی آب بررسی می‌کند. نیل به هدف فوق با تغییر شیوه حکمرانی از حکومت محور- ارزش محور به جامعه محور- نتیجه محور در نتیجه بهره‌گیری از ابزارهای نوین پیش‌بینی و عینیت‌بخشی و همچنین مشارکت آحاد جامعه امکان‌پذیر است. برای دستیابی به هدف مذکور، این پژوهش با مرور مطالعات صورت گرفته و با استفاده از روش توصیفی- تحلیلی و با استناد به منابع کتابخانه‌ای انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این رویکرد می‌تواند به بهبود شفافیت، افزایش کارایی سیستم‌های توزیع، کاهش هدررفت منابع و ارتقای توان تطبیقی در شرایط عدم قطعیت منجر شود. بااین‌حال، اجرایی‌سازی این چارچوب مستلزم توسعه زیرساخت‌های ارتباطی، تدوین چارچوب‌های قانونی مناسب، تضمین امنیت و حریم خصوصی داده‌ها و ارتقای ظرفیت‌های مدیریتی و فنی در نهادهای مرتبط است.

کلید واژه ها: تسهیل گری، عینیت بخشی، مدیریت منابع آب، مشارکت عمومی، سنسورهای خودکار، واقعیت مجازی.

استناد: انصاری قوجقار،محمد و پورمحمد،پریا . (۱۴۰۵). ارائه چارچوب تلفیقی اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس به‌منظور تغییر شیوه حکمرانی آب در ایران. نیوار، ۵۰(۱۳۲-۱۳۳)، ۱-۱۷. doi: 10.30467/nivar.2025.510982.1325

رایانامه: (۲) Paria.pormohamad7@ut.ac.ir

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.
DOI: https://doi.org/10.30467/ nivar.2025.510982.1325

CC BY

۱- مقدمه

آب نقش تعیین کننده و مهمی در سرنوشت جوامع مختلف داشته و به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی رفاه و توسعه در نظر گرفته می‌شود. افزایش جمعیت و افزایش سرانه مصرف آب به دلیل رشد بی رویه جمعیت و افزایش بهره‌برداری از منابع آبی سبب ایجاد و شدت گرفتن بحران آبی در دهه‌های اخیر شده است (آسیایی هیر و همکاران، ۲۰۱۹). بحران آب[1] به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در ایران، تأثیرات گسترده‌ای بر بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد. تغییرات اقلیمی[2]، افزایش جمعیت، توسعه شهری و مدیریت ناکارآمد منابع آبی، فشار فزاینده‌ای بر ذخایر محدود آب وارد کرده است (رضائی، ۲۰۲۲). با افزایش جمعیت در جوامع، تقاضا برای منابع آبی نیز رو به رشد است. از آنجا که منابع آب محدود هستند، بسیاری از جوامع با بحران آب و کمبود آن مواجه شده‌اند. در سال‌های اخیر، عواملی مانند کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، توزیع نابرابر منابع، وابستگی شدید بخش کشاورزی به آب، بهره‌برداری غیراصولی، و نبود قوانین مؤثر در مدیریت بین‌المللی منابع آبی، بحران آب را تشدید کرده‌اند (انصاری مهیاری و همکاران، ۲۰۲۵). علاوه بر این، بیش از ۸۰ درصد مساحت ایران در اقلیم خشک و نیمه‌خشک قرار دارد که همراه با کاهش بارندگی و افزایش دما، تأمین پایدار آب را با چالش‌های اساسی مواجه کرده و محدودیت‌های جدی برای توسعه پایدار ایجاد کرده است (معصومی و همکاران، ۲۰۲۳). مدیریت منابع آب در ایران با چالش‌های متعددی مواجه است که توسعه پایدار کشور را تهدید می‌کند. از جمله این چالش‌ها می‌توان به کاهش منابع آب زیرزمینی، فرونشست زمین و ظهور شکاف‌ها و فروچاله‌ها در مناطق مختلف اشاره کرد. این مدیریت ناکارآمد و غیربهینه آب درگیر نشتی‌ها و اتلاف زیاد در تأمین و مصرف آب و فقدان تصفیه مناسب برای حفظ کیفیت آب در مصارف مختلف است از این رو دولت، به‌عنوان اصلی‌ترین نهاد تصمیم‌گیرنده، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. با توجه به اهمیت و ابعاد گسترده این مسئله در ایران، ضروری است که سیاست‌گذاری‌های مؤثری در جهت مدیریت بهینه منابع آبی تدوین و اجرا شود (باقری و همکاران، ۲۰۲۴). برای جلوگیری از چنین بحران‌ها و منازعاتی، تغییرات اساسی در شیوه‌های برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی شامل تکنیک‌های جدید برای ارزیابی دقیق‌تر کمیت و کیفیت آب، فناوری‌های نوین برای تولید و صرفه‌جویی کارآمدتر آب، روش‌های نوین برای بهبود آموزش در حوزه آب، قوانین جدید برای بهبود بهره‌برداری و تقسیم منابع آبی مشترک و رویکردهای جدید برای توجه به نقش عوامل اجتماعی، سیاسی، فرهنگی و سایر جنبه‌های مرتبط با مسائل آبی ضروری است (بیسواس و همکاران، ۲۰۱۳). برای پیشرفت در این راستا، نیاز به دیدگاه جامع‌تری درباره آب داریم که نه‌تنها علوم سنتی آب و مهندسی، بلکه جنبه‌های اجتماعی، سیاسی، اقتصادی، محیطی، فناورانه و رفتاری انسان‌ها و تعاملات میان آن‌ها را نیز در بر بگیرد. توسعه چنین چارچوب یکپارچه‌ای برای پرداختن به مسائل آبی و همچنین برقراری ارتباط بین مطالعات آبی و نتایج آن‌ها با ذینفعان[3] مختلف حوزه آب (یعنی تقریباً همه افراد جامعه) کلید پیشرفت آینده است. در چنین شرایطی، تحول در شیوه حکمرانی آب[4] به‌منظور افزایش کارایی و انعطاف‌پذیری ضروری به نظر می‌رسد (رضائی، ۲۰۲۲). حکمرانی آب به‌عنوان خط مشی اجتماعی، اقتصادی و سیاسی که نظارت بر نحوه مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی را برعهده دارد، امری زمینه‌ای و اساسی بوده که بر روش‌های تصمیم‌گیری و اجرای برنامه‌ها به‌صورت غیرمستقیم تاثیر دارد (فدائی تهرانی و همکاران، ۲۰۲۴). برای حرکت از مدیریت آب[5] به حکمرانی آب، نیاز است که قوانین حاکم آسیب‌شناسی شوند و با هدف بازنگری و اصلاح آن‌ها یا تصویب قوانین جدید، اقدام شود.

[1] Water Crisis
[2] Climate Change
[3] Stakeholders
[4] Water governance
[5] Water resources management

این امر همچنین مستلزم ارتقای جایگاه ذینفعان و بخش خصوصی در برابر دولت است. بسیاری از سیاستمداران و پژوهشگران بر این باورند که در شرایط کنونی، بوروکراسی نه‌تنها راه‌حلی برای مسائل مدیریت عمومی محسوب نمی‌شود، بلکه خود به‌عنوان مانعی در مسیر تحقق اهداف آن عمل می‌کند. به همین دلیل، تغییرات چشمگیری در شیوه‌های مدیریت دولتی رخ داده است. در این راستا، با وجود تنوع روش‌ها و الگوهای مدیریتی، یکی از پیامدهای اساسی این تحولات، حرکت به سمت اداره دولت فراتر از ساختارهای سنتی دولتی و توانمندسازی طیف وسیعی از نقش‌آفرینان، ازجمله سیاست‌گذاران، مدیران، کارکنان دولت، بخش خصوصی و اعضای جامعه بوده است (اوسبورن، ۲۰۱۴). پیشرفت فناوری اطلاعات و ارتباطات در طی سال‌های اخیر سبب دگرگونی طیف وسیعی از مفاهیم علوم انسانی شده‌است. در این بین، مفاهیم حکمرانی نیز معنایی جدید و متفاوت نسبت به معنای کلاسیک خود یافته و بر مشورت و مشارکت آحاد مختلف جامعه تمرکز پیدا کرده‌است (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۷). بدین ترتیب، در الگوهای جدید حکمرانی، فناوری‌ها و ابزارهای نوین ارتباط جمعی که عامل بنیادی توسعه اقتصادی و مداخلات سیاسی اند، نقش مهمی دارند. انصاری قوجقار و پورمحمد (۲۰۲۵) به بررسی تاثیرفناوری‌های صنعت متاورس در عینیت بخشی مدل‌سازی سیلاب پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که فناوریهای واقعیت مجازی و واقعیت افزوده، قادر به ارائه شبیه‌سازی‌های بسیار دقیقی از سناریوهای سیلابی هستند. بدین ترتیب به برنامه‌ریزان، شهروندان و ذینفعان در جوامع مختلف کمک میکنند تا با استفاده از داده‌های پیچیده، تصمیم‌گیری‌های بهتر و کاربردی‌تری به‌منظور کاهش خطرات و آسیب‌ها اتخاذ کنند. کهن هوش‌نژاد (۲۰۲۴) به ارزیابی حکمرانی در بستر هوش مصنوعی (AI) [۶] پرداخته است. هدف مطالعه آنان شناسایی ارتباط میان هوش مصنوعی و سیاست‌گذاری عمومی و بررسی نقش آن در ارتقاء کیفیت حکمرانی است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که هوش مصنوعی از دو جنبه اصلی؛ نخست، با افزایش تعامل و پویایی در فرآیند سیاست‌گذاری عمومی در مراحل مختلف آن و دوم، با ارتقاء کیفیت خدمات دولتی و کارایی دستگاه‌های اجرایی بر بهبود کیفیت حکمرانی تأثیر می‌گذارد. معروفی نیا و همکاران (۲۰۲۳) به پیش‌بینی جریان رودخانه کورکورسر نوشهر با استفاده از مدل‌های هیبریدی هوش مصنوعی پرداختند. نتایج نشان داد که همه مدل‌های مورد استفاده (منفرد و هیبریدی) در پیش بینی جریان، عملکرد مطلوبی دارند. هم‌چنین مدل-ANN AIGبه میزان ۳۲/۹۴ درصد، مدل SVR-CSA منفرد ۲۳/۱۷ درصد و مدل BA-RF نیز ۱۷/۷۴ درصد خطای مدل منفرد را بهبود بخشیدند. در بین تمامی مدل‌های به‌کار رفته نیز، -ANN AIGدارای بهترین عملکرد در پیش بینی جریان رودخانه کورکورسر نوشهر بوده است. انصاری قوجقار (۲۰۲۳) به ارائه چارچوب تحلیلی از مفهوم حکمرانی متاورسی به منظور کاربست مدیریت مشارکتی در حوزۀ ژئوپلیتیک زیست محیطی پرداخت. نتایج نشان داد که حکمرانی متاورسی به دنبال گونه‌ای از حکمرانی جامعه محور– نتیجه محور– بومی محور است که علاوه بر افزایش تعاملات و مشارکت اجتماعی در بخش‌های مختلف، باعث حفظ ارزش‌ها، هنجارها و فرهنگ منطقه‌ای نیز باشد. احمدی پور و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل واکاوانه عوامل موثر بر ناکامی حکمرانی آب در ایران پرداختند. نتایج تحقیقات آنان نشان داد که بحران آب در ایران یک چالش جدی و فراگیر است که نه‌تنها محدود به یک منطقه خاص، بلکه یک مسئله ملی محسوب می‌شود. حل این بحران مستلزم هماهنگی در سطح ملی و همکاری میان سیستم‌های سیاسی، فرهنگی، اجتماعی، اقتصادی و قضایی است. این امر نیازمند تهیه گزارشی جامع و بی‌طرف از وضعیت کنونی منابع آب است. هرگونه رویکرد امنیتی که به عادی‌سازی، سیاسی‌سازی، یا عدم شفافیت منجر شود، تنها بحران را تشدید کرده و مانع از اتخاذ راهکارهای مؤثر خواهد شد. زیبنده (۲۰۲۰) به ارزیابی دستورکار پژوهش در مورد خطمشی در حوزه حکمرانی اینترنت اشیاء (IOT) [۷] پرداخته

[6] Artificial Intelligence

[7] Internet of Things

است. این پژوهش با رویکرد توصیفی-تحلیلی و استفاده از چارچوب نظام ملی نوآوری، به بررسی مسائل دانشی خط‌مشی اینترنت اشیاء و هدایت تحقیقات سیاست‌گذارانه در این حوزه می‌پردازد. دستورکارهای پیشنهادی در سه رویکرد حکمرانی، نهادی و فنی دسته‌بندی شده‌اند. دهقانی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی حکمرانی آب در ایران پرداخته‌اند. آنان ابتدا چالش‌های مؤثر بر حکمرانی در ایران را بررسی کرده و سپس راهکارهایی را برای سازگاری با این عوامل ارائه می‌دهد. دهقانی و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی عملکرد مدل هیبریدی ماشین بردار پشتیبان- الگوریتم گیاهان مصنوعی در تخمین جریان روزانه رودخانه‌ها در حوضه دز پرداختند. نتایج نشان داد مدل هیبریدی پیشنهادی عملکرد بهتری در تخمین جریان داشته و برای پیش‌بینی دبی روزانه رودخانه‌ها مفید است. بر این اساس، با توجه به پیشینه تحقیق صورت گرفته می‌توان دریافت که مسئله کمبود آب در ایران به چالشی پیچیده تبدیل شده است و نیاز به راهکارهای جدید و نوآورانه برای حل آن بیش از پیش احساس می‌شود. بنابراین، لازم است که الگویی از حکمرانی در هر کشور، با توجه به ویژگی‌های خاص سیاسی، قومی، مذهبی، ساختار اجتماعی، آداب و رسوم و دیگر مؤلفه‌های فرهنگی و اجتماعی طراحی شود. این الگو باید علاوه بر ارتقاء مشارکت جامعه مدنی ویژگی‌هایی مانند انعطاف‌پذیری، پویایی، ارتباط مؤثر با ابزارهای ارتباطی جمعی و قابلیت بهبود مستمر را نیز دارا باشد. در سال‌های اخیر و با توجه به تحولات مداوم در سطح جهانی، نیاز به بازسازی و هوشمندسازی مدل‌های حکمرانی به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. تاکنون مطالعات زیادی به بررسی حکمرانی آب و ارائه راهکارها به منظور حل چالش‌های پیش‌رو پرداخته‌اند اما یک چارچوب یکپارچه که بتواند این سه حوزه را به‌صورت تلفیقی برای بهبود حکمرانی آب به کار گیرد، توسعه نیافته است. این مطالعه به دنبال معرفی چارچوبی جامع و تحلیلی است که علاوه بر به‌روزرسانی و مدرن‌سازی مؤلفه‌های حکمرانی، به ارتقای سطح مشارکت اجتماعی در تمامی حوزه‌ها، به‌ویژه در زمینه‌های مدیریت منابع آب، کمک کند. لذا در این پژوهش برای نخستین بار به ارائه چارچوب تلفیقی اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس[8] به‌منظور تغییر شیوه حکمرانی آب در ایران پرداخته شده است. این چارچوب با فراهم‌سازی بسترهای هوشمند برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های منابع آبی، تسهیل در شفاف‌سازی فرآیندهای تصمیم‌گیری و افزایش مشارکت ذینفعان، می‌تواند به کاهش چالش‌های موجود و بهبود بهره‌وری در مدیریت منابع آب کشور کمک کند.

۲- مباحث نظری

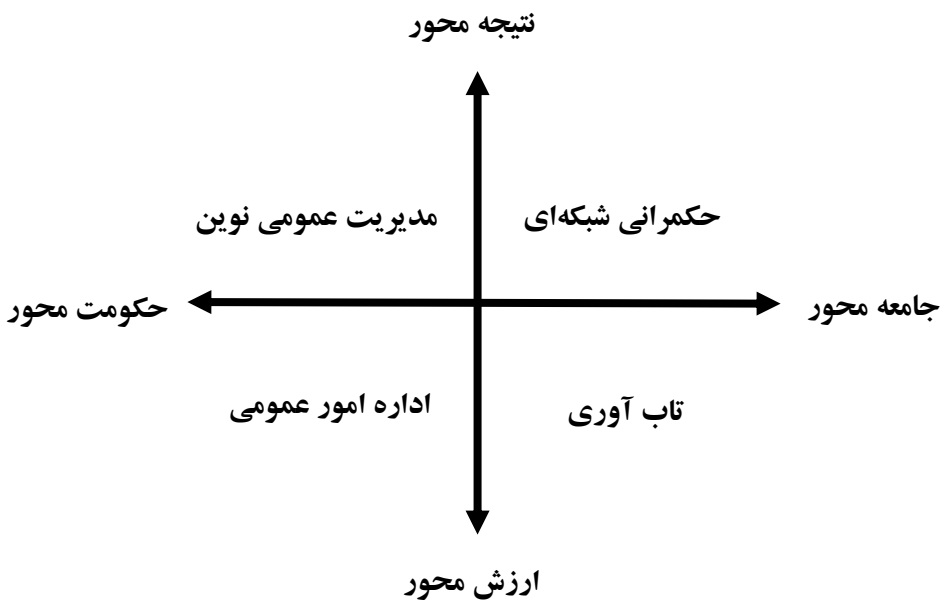
۲-۱- حکمرانی آب [9]

حکمرانی مفهومی بین رشته‌ای است که از ترکیب رشته‌هایی مانند جامعه‌شناسی، حقوق، سیاست، اقتصاد و مدیریت به وجود آمده است. در این چارچوب، حکمرانی به معنای کاهش تمرکز قدرت دولت‌های سنتی و تشویق به توزیع قدرت میان نهادها و سطوح مختلف حکومتی است. این رویکرد بر اهمیت مشارکت فعال و مشورت با شهروندان تأکید دارد (سلطانی‌نژاد و همکاران، ۲۰۱۸). با وجود تعاریف متنوع و تأکیدهای متعدد در مجامع علمی مختلف پیرامون مفهوم حکمرانی، هنوز هیچ تعریف واحدی برای آن ارائه نشده است. برخی پژوهشگران به ابعاد سیاست‌گذاری در حکمرانی توجه دارند، در حالی که دیگران به انواع مختلف قواعد حاکم، روابط میان آن‌ها و منطق کلی حاکم بر سیستم‌های حکومتی تأکید می‌کنند (اوستروم، ۲۰۱۰؛ پاول وستل، ۲۰۰۹). از سوی دیگر، شیوه‌های حکمرانی به اشکال مختلفی اشاره دارند که از طریق آن‌ها حکمرانی می‌تواند محقق شود. حکمرانی سلسله‌مراتبی به شیوه کلاسیک هدایت دولتی و کنترل از بالا به پایین اشاره دارد. از سوی دیگر، حکمرانی خودگردان به وضعیتی اشاره می‌کند که در آن

[8] Metaverse

[9] water governance

بازیگران مستقل از کنترل دولت به امور خود رسیدگی می‌کنند. حکمرانی مشارکتی به اشکال سازمان‌یافته‌ای از تعاملات حکمرانی اشاره دارد که در آن بازیگران مختلف (عمومی و خصوصی) برای حل مسائل پیش رو، بدون وجود یک بازیگر مرکزی حاکم، با یکدیگر هماهنگ و ارتباط برقرار می‌کنند (کویمن، ۲۰۲۱). بیش‌تر تعاملات اجتماعی مرتبط با حکمرانی را می‌توان از طریق این شیوه‌ها بیان کرد که اغلب به‌صورت ترکیبی ظاهر می‌شوند. از سوی دیگر، در بحث گونه‌شناسی حکمرانی، چهار گونه حکمرانی قابل تصور و بررسی است (شکل ۱). جهت‌گیری و پیامدهای حاصل از هرگونه، به‌عنوان عامل اصلی تفاوت در این زمینه مطرح می‌شود. در مدل‌های مختلف حکمرانی، چهار نوع اصلی براساس دو عامل اصلی شناسایی می‌شود: تمرکز بر نتایج یا ارزش‌ها و گرایش به سمت حکومت یا جامعه. نوع اول، که حکمرانی نتیجه‌گرا و متکی بر حکومت است، مشابه با الگوی مدیریت عمومی نوین است که دولت را در نقش یک خدمت‌رسان معرفی می‌کند. نوع دوم، حکمرانی را نتیجه‌گرا و متکی بر جامعه می‌داند که به الگوی حکمرانی شبکه‌ای نزدیک است، جایی که دولت به‌عنوان همکار و تسهیل‌گر در فرآیندها حضور دارد. در نوع سوم، حکمرانی مبتنی بر حکومت و ارزش‌ها است و الگوی اداره امور عمومی را پیگیری می‌کند، در این نوع دولت نقش تنظیم‌کننده را ایفا می‌کند. در نهایت، نوع چهارم حکمرانی، که به جامعه متکی و ارزش‌محور است، به‌طور معمول با تاب‌آوری اجتماعی مرتبط است و در این الگو دولت نقش تسهیل‌گری را بر عهده می‌گیرد. این چهار نوع از حکمرانی در قالب یک مدل گونه‌شناسی مورد تحلیل قرار می‌گیرند (انصاری قوجقار، ۲۰۲۳).



شکل ۱- گونه‌شناسی حکمرانی (فرانکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۸؛ انصاری قوجقار، ۲۰۲۳)

مبحث حکمرانی با توجه به میان‌رشته‌ای بودن، قابل تعمیم به موضوعات مختلف از جمله آب و محیط‌زیست است. یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین تعاریف از سوی سازمان همکاری جهانی آب در حوزه حکمرانی آب ارائه شده است

که آن را به‌عنوان مجموعه‌ای از سیستم‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اجرایی که توسعه و مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آب در سطوح مختلف جامعه را تنظیم می‌کند، تعریف می‌نماید (راجرز و هال، ۲۰۰۳). حکمرانی آب به رویکردها و نظام‌هایی اطلاق می‌شود که در فرآیند تصمیم‌گیری درباره توسعه و مدیریت منابع آب مشارکت دارند. به‌طور خاص، طبق تعریف سازمان همکاری جهانی آب (GWCO)[10]، حکمرانی آب به نظام‌های سیاسی، اجتماعی، اقتصادی و اداری اشاره دارد که برای توسعه، مدیریت منابع آب و ارائه خدمات آبی در سطوح مختلف جامعه طراحی شده‌اند (راجرز و هال، ۲۰۰۳). ضرورت اصلاح رویکردهای سازه‌ای حاکم بر مدیریت منابع آب و جایگزینی آن با مدیریت یکپارچه منابع آب، به‌عنوان راه‌حلی نهایی برای وضعیت بحرانی مدیریت منابع آب در جهان در دو دهه اخیر، موجب طرح جدی بحث حکمرانی آب شده است. به همین دلیل، در راستای دستیابی به اهداف مدیریت یکپارچه منابع آب و رفع کاستی‌ها و کمبودهای ناشی از رویکرد مدیریت یک‌جانبه از بالا به پایین، رویکرد حکمرانی آب مطرح گردیده است.

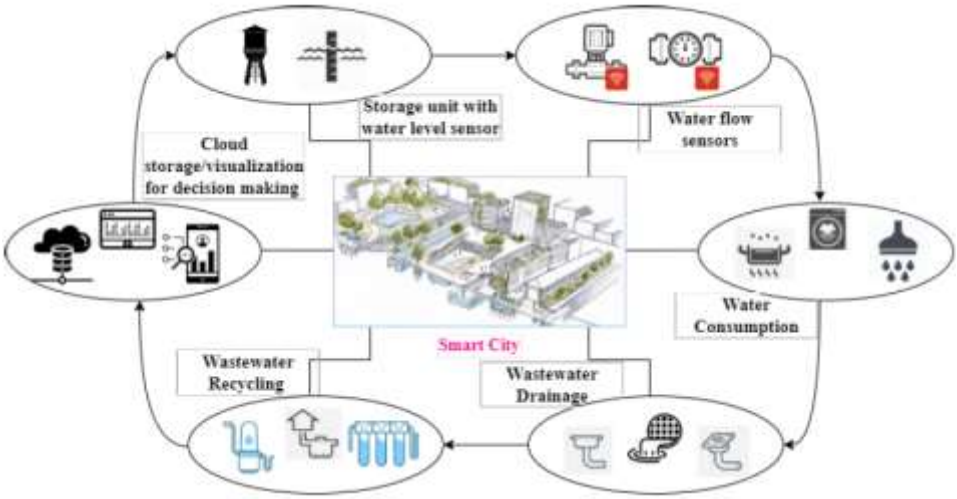
۲-۲- فناوری‌های نوین موثر در حکمرانی آب

۲-۲-۱- اینترنت اشیاء

اینترنت اشیاء به‌عنوان یک قابلیت نوین، به‌طور یکپارچه اشیاء مختلف را در یک محیط متصل کرده و امکان تبادل پیام میان آنها را فراهم می‌آورد. در این سیستم، اشیاء قادرند داده‌ها را از طریق شبکه بدون نیاز به تعامل مستقیم انسان با انسان یا انسان با رایانه انتقال دهند. این قابلیت می‌تواند اشیائی را که به‌طور هماهنگ با یکدیگر کار می‌کنند، به یکدیگر متصل کند تا درخواست‌های مصرف‌کننده را به‌صورت یکپارچه انجام دهند (کاباسو و همکاران، ۲۰۲۴). توسعه اینترنت اشیاء با هم‌راستایی اینترنت و فناوری‌های بی‌سیم آغاز شده و این شبکه کوچک را در میان دستگاه‌ها ایجاد می‌کند. علاوه بر این، از توان محاسباتی برای انتقال داده‌ها به محیط اطراف بهره‌برداری می‌شود (گای و همکاران، ۲۰۲۲). این دستگاه‌ها می‌توانند به شکل سیستم‌های تعبیه‌شده نظیر ابزارها، حسگرها و تراشه‌های ریز آنالیز داده‌ها عمل کنند. معماری اصلی اینترنت اشیاء شامل سه لایه اصلی است: لایه فیزیکی، لایه شبکه و لایه نرم‌افزار. در لایه فیزیکی، حسگرها داده‌ها را از محیط جمع‌آوری کرده و آنها را تبدیل به سیگنال‌های دیجیتال قابل پردازش[11] می‌کنند. داده‌های حساس به زمان ممکن است به‌صورت همزمان پردازش شوند یا در زمان جمع‌آوری ذخیره شوند (یاسین و همکاران، ۲۰۲۴). در لایه شبکه، داده‌ها جمع‌آوری شده و برای پردازش به فرمت قابل استفاده تبدیل می‌شوند. در نهایت، لایه نرم‌افزار مسئول ارائه خدمات خاص به کاربران است (شکل ۲). ابزارهای اینترنت اشیاء که در این اشیاء جانمایی شده‌اند، به‌طور کلی در دو دسته سوئیچ‌ها (که دستورات را به یک دستگاه ارسال می‌کنند) و سنسورها (که داده‌ها را جمع‌آوری کرده و آنها را به دستگاه‌های دیگر ارسال می‌کنند) قرار می‌گیرند. این دستگاه‌ها اطلاعات مربوط به اجزای فیزیکی را به اشتراک می‌گذارند و جمع‌آوری داده‌ها از طریق فناوری‌های محاسباتی ارزان، داده‌های بزرگ، ابری و تلفن همراه با کمترین مداخله انسانی انجام می‌شود. این فرآیند باعث ترکیب دنیای فیزیکی با دنیای دیجیتال می‌شود و دنیای هایپراتصالات را به‌وجود می‌آورد که امکان تعامل میان اشیاء متصل را ثبت، تنظیم و نظارت می‌کند (لی و همکاران، ۲۰۱۵).

[10] Global Water Cooperation Organization

[11] Processable digital signals



شکل ۲- کاربرد اینترنت اشیاء در پایش هوشمند منابع آب (الزهرانی و همکاران، ۲۰۲۳)

از منظر حقوقی، یکی از چالش‌های مهم در به‌کارگیری فناوری اینترنت اشیا، حفاظت از حریم خصوصی افراد است. در حقوق ایران، مفهوم حریم خصوصی و اطلاعات قابل شناسایی شخصی به‌طور مشخص تعریف نشده است. علاوه بر این، تدوین استانداردهای مربوط به حریم خصوصی برای ایجاد اعتماد و امنیت روانی در جامعه از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی دیگر از نگرانی‌های عمده در استفاده از اینترنت اشیاء ، حفظ محرمانگی داده‌هاست. در این سیستم‌ها، حجم وسیعی از داده‌ها تولید و منتقل می‌شود که ممکن است از طریق نفوذگرها، تولیدکنندگان دستگاه‌ها یا تجهیزاتی که برای هماهنگی اشیاء در یک شبکه اینترنت اشیاء به کار می‌روند، به‌طور غیرمجاز در دسترس دیگران قرار گیرد. اگرچه فناوری بلاک‌چین[12] می‌تواند تا حدی نگرانی‌ها و تهدیدات امنیتی را کاهش دهد، اما قادر به حذف کامل تمامی این مشکلات نخواهد بود (عبداله زاده و حاجی پور کندرود، ۲۰۲۳). یکی از چالش‌های اصلی در حوزه اینترنت اشیاء ، مسائل امنیتی مرتبط با فناوری اطلاعات است. این مشکلات ناشی از نفوذ غیرمجاز به سیستم‌های متصل و ارسال دستورات نادرست به آن‌ها یا عملکرد نادرست این سیستم‌ها هستند که ممکن است به خسارات غیرقابل جبرانی منجر شوند. در ایران، اسناد مرجع در این زمینه شامل «سند تبیین الزامات» مصوب سال ۱۳۹۶ و «سند معماری و طرح کلان شبکه ملی اطلاعات» مصوب سال ۱۳۹۹ است. در سند طرح کلان، ۵۳ اقدام کلان تعریف شده که حدود ۲۰ اقدام آن به طور کامل مرتبط با امنیت است و ۳۳ اقدام باقی‌مانده نیز نیاز به طراحی‌های امنیتی دارند، به این معنی که تمامی پروژه‌ها باید از نظر امنیتی طراحی شوند (سالاما و تورجمن، ۲۰۲۵). امنیت فناوری اطلاعات در ایران در یک ساختار پراکنده و غیرمتمرکز سازمان‌دهی شده است. حداقل شش معاونت و اداره‌کل مختلف در وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات با مسائل امنیتی در ارتباط هستند و هرکدام پروژه‌های خود را به صورت مستقل پیگیری می‌کنند. این حوزه شامل معاونت امنیت سازمان فناوری اطلاعات، مرکز امنیت سامانه‌های صیانتی زیرساخت، اداره‌کل امنیت سیستم‌های ارتباطی سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی، کمیته پدافند غیرعامل، پژوهشکده امنیت پژوهشگاه ارتباطات و دیگر دستگاه‌های مرتبط با وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات می‌شود. در این راستا، هماهنگی و هم‌افزایی

[12] Blockchain

میان این بخش‌ها ضروری است تا اقدامات آن‌ها به صورت همگام و هماهنگ پیش برود (کیائی، ۲۰۲۴).

۲-۲-۲- متاورس

واژه متاورس از ترکیب دو جزء متا[۱۳] به معنای برتر و وِرس[۱۴] به مفهوم دنیا[۱۵] و جهان شکل گرفته است و در مجموع، به جهانی دیجیتالی اشاره دارد که کاربران می‌توانند در آن حضور یافته و تعامل کنند. متاورس یا فراجهان به‌عنوان مفهومی نوظهور در حوزه فناوری دیجیتال به‌طور فزاینده‌ای در محافل علمی و صنعتی گسترش یافته است. این مفهوم به یکی از محورهای اصلی تفکر و نوآوری در جهان تبدیل شده است. این فناوری امکان تعامل هم‌زمان با دنیای واقعی و مجازی را فراهم می‌سازد، به‌گونه‌ای که کاربران، در عین حضور در جهان فیزیکی، در حجم گسترده‌ای از داده‌های به‌دست‌آمده از فضای دیجیتال غوطه‌ور خواهند بود (محمودی و صادقی، ۲۰۲۳). در دنیای متاورس، کاربران به وسیله ابزارهایی مثل عینک‌ها و هدفون‌ها به دنیای واقعی متصل شده و در قالب آواتارها تجلی مادی پیدا می‌کنند (شکل ۳) (هانگ و همکاران، ۲۰۲۳). این فضا بر پایه ترکیب فناوری‌های پیشرفته‌ای همچون واقعیت مجازی (VR) [۱۶] و واقعیت افزوده (AR) [۱۷] شکل گرفته که امکان تعاملات چندحسی با محیط‌های دیجیتال، اشیای مجازی و افراد را فراهم می‌آورد (محمودی و صادقی، ۲۰۲۳). این محیط مجازی، تجربه‌هایی نوین و تعاملی را ارائه می‌دهد که در دنیای فیزیکی دست‌یافتنی نیستند (وانگ و همکاران، ۲۰۲۲). متاورس را می‌توان شبکه‌ای گسترده از فضاهای سه‌بعدی مجازی دانست که بر خلق تجربه‌های همه‌جانبه، توسعه اقتصادهای دیجیتال و گسترش ارتباطات اجتماعی متمرکز است (محمد حسنی، ۲۰۲۳). این فناوری، با ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود، شیوه زندگی انسان‌ها را دستخوش تحول کرده و تأثیرات عمیقی بر حوزه‌هایی همچون فلسفه، فرهنگ، جامعه و حکمرانی اقتصادی بر جای می‌گذارد. ازاین‌رو، درک عمیق متاورس، بررسی ابعاد آن و اتخاذ تصمیمات آگاهانه در این زمینه امری حیاتی به شمار می‌رود (ون شی و همکاران، ۲۰۲۲).

شکل ۳- عینک‌های واقعیت مجازی صنعت متاورس (فرانکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۸

[13] Meta
[14] Verse
[15] Universe

[16] Virtual Reality
[17] Augmented Reality

شکل ۴- فناوری واقعیت افزوده (فرانکوفسکی و همکاران، ۲۰۱۸)

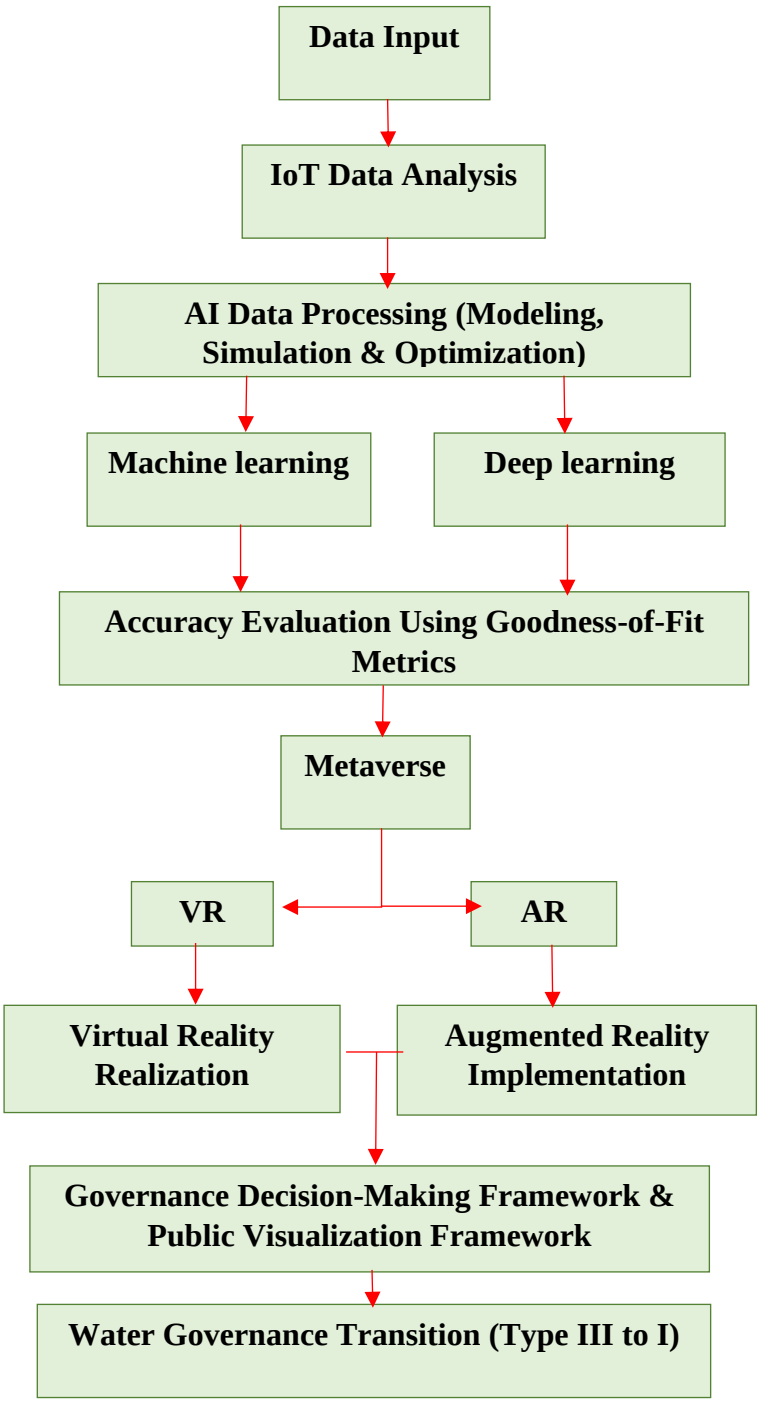
متاورس به عنوان یک فضای مجازی نوظهور، مجموعه‌ای از ویژگی‌های کلیدی را در بر می‌گیرد که آن را به محیطی منحصربه‌فرد برای تعاملات دیجیتالی تبدیل می‌کند. یکی از مهم‌ترین این ویژگی‌ها، همه‌جانبه بودن است که به ایجاد تجربه‌ای فراگیر برای کاربران کمک می‌کند. این فضا از طریق فناوری‌های پیشرفته، محیطی شبیه‌سازی‌شده را فراهم می‌آورد که از نظر ادراک حسی، روانی و عاطفی، به واقعیت نزدیک است و کاربران را در خود غوطه‌ور می‌سازد (شکل ۴) (انصاری قوجقار و پورمحمد، ۲۰۲۵). علاوه بر این، متاورس محدودیت‌های زمانی و مکانی را از میان برمی‌دارد. برخلاف دنیای واقعی که با مرزهای جغرافیایی و محدودیت‌های زمانی مواجه است، متاورس به عنوان بستری مجازی، امکان تعامل کاربران را در هر زمان و مکانی فراهم می‌کند و فضایی پیوسته از داده‌ها و رویدادها را در اختیار آنها قرار می‌دهد. این ویژگی، متاورس را به محیطی پویا و انعطاف‌پذیر تبدیل می‌کند که قادر است نیازهای متنوع کاربران را برآورده سازد (محمد حسنی، ۲۰۲۳). پایداری از دیگر مشخصه‌های کلیدی متاورس به شمار می‌رود. این فضا نه‌تنها یک محیط دیجیتالی است، بلکه دارای نظام اقتصادی و ارزش‌گذاری مستقلی نیز هست که تداوم فعالیت‌ها را تضمین می‌کند. طراحی متاورس بر اساس معماری غیرمتمرکز موجب می‌شود که ضمن حفظ پویایی، ثبات و انسجام ساختاری آن نیز حفظ گردد. یکی دیگر از ویژگی‌های برجسته متاورس، قابلیت تعامل‌پذیری است که امکان جابه‌جایی بی‌وقفه میان جهان‌های مجازی مختلف را برای کاربران فراهم می‌آورد. در این فضا، دارایی‌های دیجیتال نه‌تنها قابل انتقال و مبادله هستند، بلکه می‌توانند در توسعه جهان‌های مجازی جدید نیز به کار گرفته شوند. این قابلیت، متاورس را به محیطی یکپارچه تبدیل می‌کند که کاربران می‌توانند بدون محدودیت در آن فعالیت کنند (محمد حسنی، ۲۰۲۳).

۳- بحث

۳-۱- چارچوب تلفیقی اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس

ترکیب فناوری‌های نوین در قالب یک چارچوب یکپارچه، ظرفیت‌های جدیدی را برای حل چالش‌های پیچیده فراهم می‌آورد. یکی از روش‌های مدیریتی و پیش‌بینی در این راستا، ادغام سه فناوری متاورس، هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء است. این چارچوب یکپارچه، امکان جمع‌آوری، تحلیل و تجسم داده‌ها را به‌صورت آنی فراهم کرده و فرآیندهای تصمیم‌گیری را به‌طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. اینترنت اشیاء به‌عنوان نخستین لایه از این چارچوب، قادر به جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز به صورت لحظه‌ای و بی‌وقفه با استفاده از حسگرهای هوشمند و فناوری‌های ارتباطی پیشرفته می‌باشد.

این داده‌ها به‌طور مستمر به سرورهای پردازش منتقل شده و امکان تحلیل و پایش شرایط به‌صورت آنی فراهم می‌شود (زانلا و همکاران، ۲۰۱۴). پس از جمع‌آوری داده‌ها توسط IoT، هوش مصنوعی در مرحله پردازش داده‌ها وارد عمل می‌شود. این فناوری با استفاده از الگوریتم‌های پیچیده یادگیری ماشین، شبکه‌های عصبی عمیق و تجزیه‌وتحلیل داده‌های کلان، قادر است الگوهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهد. هوش مصنوعی به‌ویژه در شبیه‌سازی روندها و پیش‌بینی نتایج در شرایط مختلف از اهمیت بالایی برخوردار است.به عنوان نمونه از الگوریتم های فراکاوشی هوش مصنوعی و ترکیب آن با فناوری های صنعت متاورس در مسائل مختلف مدلسازی های هیدرولوژیکی استفاده به عمل می آید. برای مثال، الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی میزان بارش، مدیریت سیلاب، و ارزیابی کیفیت آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این، مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در بهینه‌سازی مصرف آب کشاورزی و تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب نقش مؤثری ایفا می‌کنند. با این‌حال، چالش‌هایی مانند نیاز به داده‌های گسترده و باکیفیت، هزینه‌های پیاده‌سازی بالا، و پیچیدگی تفسیر برخی از خروجی‌های مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند بر کارایی این فناوری تأثیر بگذارد (کومار، ۲۰۱۶). در نهایت، متاورس به‌عنوان محیطی شبیه‌سازی‌شده و دیجیتال و با قابلیت عینیت‌سازی مدل‌سازی‌های صورت گرفته، فضایی برای تجسم و تعامل با داده‌های پیچیده فراهم می‌آورد (شکل ۵). این فناوری قادر است تا مدل‌ها و سناریوهای مختلف را در یک فضای دیجیتال سه‌بعدی شبیه‌سازی کند، به‌طوری‌که کاربران می‌توانند به‌طور تعاملی با داده‌ها و نتایج تحلیلی در یک محیط مجازی ارتباط برقرار کنند. از آنجا که متاورس قابلیت شبیه‌سازی وضعیت‌ها و تحلیل‌های پیچیده را در فضای دیجیتال فراهم می‌آورد، می‌تواند ابزاری بسیار کارآمد برای آموزش، شبیه‌سازی و ارزیابی تأثیرات تصمیمات در شرایط مختلف باشد (بایلنسون، ۲۰۱۸). بدین ترتیب می‌توان نتیجه گرفت که ترکیب این سه فناوری در یک چارچوب تلفیقی و یکپارچه، ظرفیت‌های جدیدی را برای پیش‌بینی و تحلیل داده‌ها فراهم می‌آورد. چارچوب تلفیقی فوق قادر به ارائه تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه و بهینه در شرایط پیچیده و پویا است.



شکل ۵- فلوچارت طراحی مدل تلفیقی پیشنهادی جهت تغییر شیوه حکمرانی منابع آب

۳-۲- کاربست چارچوب اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس در تغییر شیوه حکمرانی منابع آب

همان‌طور که در شکل یک مشخص است، انواع گونه‌های حکمرانی با استفاده از دو بردار جامعه محور- حکومت محور و نتیجه محور- ارزش محور به چهار بخش حکمرانی شبکه‌ای، تاب آوری اجتماعی، اداره سنتی امور و مدیریت عمومی نوین تقسیم بندی می‌شود (شکل ۱). با توجه به چالش‌ها و ضعف‌های عمده‌ای که مدیریت منابع آب در ایران با آن مواجه است، از جمله هدررفت بالای آب، سوءمدیریت، خشکسالی‌های مکرر و فشارهای ناشی از افزایش جمعیت و تغییرات اقلیمی، ضرورت تحول در شیوه‌های مدیریت منابع آب به شدت احساس می‌شود. در چنین شرایطی، گذار از مدیریت منابع آب به سمت حکمرانی آب، که شامل رویکردی همه‌جانبه و مبتنی بر تصمیم‌گیری‌های هوشمندانه و مشارکتی است، امری ضروری به نظر می‌رسد. حکمرانی در کشورهای در حال توسعه در بخش‌های مختلف (صنعت، محیط‌زیست، کشاورزی و ...) عموماً در ربع سوم گونه‌های حکمرانی قرار دارد. به عبارت دیگر، شیوه اداره امور مختلف در این کشورها به‌صورت سنتی بوده و حکومت به‌عنوان تنظیم‌گر در بخش‌های مختلف ظاهر شده است. از این رو می‌توان دریافت که بخش خصوصی و جامعه مدنی نقش چندانی در اداره امور نداشته و نادیده گرفته می‌شوند. از سوی دیگر، حاکمیت در کشورهای توسعه یافته به‌جای تنظیم‌گری از ابزار تسهیل‌گری در اداره امور بهره می‌گیرد که این در ربع اول گونه‌شناسی حکمرانی قرار دارد. حکمرانی تسهیل‌گر بر پایه ایجاد بسترهای مناسب برای تعامل و همکاری میان بخش‌های مختلف جامعه شکل می‌گیرد. حکمرانی تسهیل‌گر با کاهش تصدی‌گری دولت، برون‌سپاری وظایف اجرایی و خصوصی‌سازی مدیریت منابع، زمینه را برای افزایش بهره‌وری و رقابت‌پذیری فراهم می‌کند. مشارکت جامعه مدنی، تمرکززدایی و تفویض اختیار به نهادهای محلی، موجب انعطاف‌پذیری و کارآمدی بیشتر در تصمیم‌گیری‌ها می‌شود. در نهایت، توانمندسازی ذی‌نفعان و توسعه همکاری‌های بین‌بخشی، حکمرانی را از مدل کنترل‌محور به سیستمی مشارکتی، کارآمد و پایدار تبدیل می‌کند. استفاده از فناوری‌های دیجیتال و داده‌محور، همراه با شفافیت و پاسخگویی، نقش مهمی در بهبود حکمرانی و جلب اعتماد عمومی دارد. از جمله مهم‌ترین روش‌ها و ابزارهایی که در سبب افزایش مشارکت جامعه مدنی و بخش خصوصی و به تبع آن تغییر سیاست‌های حکمرانی از ربع سوم به ربع اول مختصات گونه‌های حکمرانی می‌شود، استفاده از ابزار و فناوری‌های نوین ارتباط جمعی مانند متاورس، هوش مصنوعی و اینترنت اشیاء است. ارتقای دقت در پایش منابع آبی، توانمندسازی تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، شبیه‌سازی پویا و سناریومحور، بهینه‌سازی تخصیص و مصرف منابع و تسهیل همکاری‌های بین‌نهادی از ویژگی‌های کلیدی چارچوب اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس محسوب می‌شوند. این ویژگی‌ها، این چارچوب را به ابزاری تحول‌آفرین در حکمرانی منابع آب تبدیل کرده و زمینه‌ساز مدیریت هوشمند، قابل پیش‌بینی و انعطاف‌پذیر در مواجهه با چالش‌های پیچیده و پویای در حکمرانی منابع آب می‌شود.

این چارچوب تلفیقی با بهره‌گیری از فناوری‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده در کنار داده‌های بلادرنگ جمع‌آوری‌شده از حسگرهای هوشمندIoT، امکان ایجاد شبیه‌سازی‌های دقیق و تعاملات مؤثر بین ذینفعان مختلف را فراهم می‌آورد. اطلاعات پیچیده در محیط شبیه‌سازی‌شده متاورسی به تصویر کشیده شده (عینیت بخشی صورت می‌گیرد) و هوش مصنوعی با استفاده از داده‌های دریافتی از سنسورهای پایش خودکار اقدام به پیش‌بینی و شبیه‌سازی

شرایط آتی می‌کند. به این ترتیب، هوش مصنوعی به پردازش این داده‌ها و شبیه‌سازی روندهای پیچیده در مدیریت منابع آب کمک می‌کند و اینترنت اشیاء به‌طور مداوم داده‌های دقیق و به‌روز را در اختیار سیستم قرار می‌دهد. با استفاده از این چارچوب تلفیقی، می‌توان نه‌تنها فرآیندهای تصمیم‌گیری را به‌طور کارآمدتری مدیریت کرد، بلکه امکان شبیه‌سازی سیاست‌های آبی در یک محیط تعاملی فراهم می‌شود. به‌عنوان مثال، در یک پروژه مدیریت منابع آب، حسگرهای IoT می‌توانند داده‌های مربوط به سطح آب، مصرف و کیفیت آب را در زمان واقعی جمع‌آوری کرده و این اطلاعات به صورت آنی برای تحلیل‌های هوش مصنوعی ارسال شوند. سپس، مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند پیش‌بینی‌هایی درباره تغییرات آب و هوایی یا کمبود منابع آب در مناطق هدف ارائه دهند. این پیش‌بینی‌ها به‌طور مستقیم در متاورس عینیت می‌یابند، به‌طوری‌که جامعه مدنی، بخش خصوصی، سیاست‌مداران و ارکان مختلف حاکمیت می‌توانند با استفاده از فناوری‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده در صنعت متاورس و با حضور در محیطی مصنوعی که ترکیبی از دنیای مجازی و فیزیکی است، از آواتارها برای تعامل بهره‌برداری کنند. این امکان فراهم می‌آید که بدون صرف زمان و هزینه‌های اضافی، در فرآیندهای تصمیم‌گیری و سیاست‌گذاری که به دلایل مختلف امکان مشارکت در آن‌ها وجود ندارد، حضور یابند. بدین ترتیب، آن‌ها قادر خواهند بود از چالش‌های موجود در مدیریت منابع آبی، نظیر خشکسالی‌های آتی، فرونشست ناشی از بهره‌برداری بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، آلودگی‌های ناشی از سیلاب‌ها و سایر مسائل مشابه آگاه شوند و نسبت به اتخاذ تصمیمات مناسب اقدام کنند. طبق نتایج مدان و باتوله (۲۰۲۴)، این فناوری‌ها فرصت‌های بی‌سابقه‌ای برای نوآوری، بهره‌وری و ارتباطات فراهم می‌کنند. با درک اهمیت آن‌ها و پذیرش ظرفیت‌هایشان، ذینفعان می‌توانند در این مسیر دیجیتالی گام بردارند و راه‌های جدیدی برای رشد و توسعه بگشایند. با این حال، بهره‌برداری کامل از این فناوری‌ها نیازمند تلاش‌های مشترک برای تقویت نوآوری، همکاری و به‌کارگیری مسئولانه آن‌هاست. با همکاری در جهت رعایت اصول اخلاقی، ترویج شمول‌پذیری و حفظ شفافیت، می‌توان اطمینان حاصل کرد که AI، IoT و متاورس به ابزارهایی برای تغییرات مثبت اجتماعی تبدیل می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری

ایران به‌عنوان یک کشور در حال توسعه و جهان سومی با چالش‌هایی چون رشد اقتصادی ناپایدار، فقر و نابرابری‌های اجتماعی مواجه است. ساختار بروکراتیک پیچیده و متمرکز، مشابه سایر بخش‌های حکمرانی، در مدیریت منابع آبی نیز به مشکلاتی مانند کندی در تصمیم‌گیری، ضعف در هماهنگی بین نهادهای مختلف و عدم استفاده مؤثر از منابع منجر شده است. علاوه بر این، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع آب در بسیاری از مناطق، چالش‌های مضاعفی برای مدیریت منابع آبی ایجاد کرده است. سیاست‌های نادرست در بهره‌برداری از منابع آب، مانند استفاده بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و همچنین آلودگی آب ناشی از فعالیت‌های صنعتی و کشاورزی، از دیگر مشکلات عمده‌ای هستند که کشور با آن‌ها مواجه است. لذا هدف از این مطالعه ارائه نوعی چارچوب تلفیقی از فناوری‌های نوین متاورس- هوش مصنوعی- اینترنت اشیاء برای تغییر شیوه حکمرانی منابع آب در ایران از ربع سوم حکمرانی (که دولت نقش محوری و تنظیم‌گری دارد) به ربع اول (تسهیل‌گری دولت) بود. به‌منظور دستیابی به این هدف، پژوهش حاضر با مرور مطالعات موجود در زمینه حکمرانی و فناوری‌های نوین متاورسی، IOT و هوش مصنوعی و با استفاده از روش توصیفی- تحلیلی و با استناد به منابع کتابخانه‌ای صورت گرفت. بدین ترتیب علاوه بر به روزرسانی و توسعه همکاری‌های بین بخشی و شبکه‌ای، حضور و تاثیرگذاری سازمان‌های مردم نهاد و خصوصی سازی مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی کشور،

موجب افزایش پویایی و انعطاف‌پذیری مدیریت منابع آبی و خدمات در راستای دستیابی به توسعه پایدار می‌شود. نتایج نشان داد که تاثیر چارچوب تلفیقی یاد شده بر تغییر شیوه حکمرانی منابع آب در سه بخش پایش داده‌ها به‌صورت آنی و خودکار با فناوری اینترنت اشیاء، شبیه‌سازی و پیش‌بینی روند آتی وضعیت سیستم‌های آبی با الگوریتم‌های هوش مصنوعی و در نهایت عینیت‌بخشی و تصویرسازی شبیه‌سازی‌های صورت گرفته در قالب فناوری‌های VR و AR صنعت متاورس، قابل تفسیر است. متاورس یک محیط مجازی تعاملی فراهم می‌کند که در آن می‌توان مدل‌های دیجیتال از منابع آب، شبکه‌های توزیع و تأسیسات آبی را شبیه‌سازی و عینیت بخشی کرد. این قابلیت چندین مزیت کلیدی برای حکمرانی آب به همراه دارد که شامل ایجاد دوقلوی دیجیتال از حوزه‌های آبخیز و شبکه‌های توزیع برای تحلیل سناریوهای مدیریتی، شبیه‌سازی پیامدهای سیاست‌های مختلف در تخصیص آب پیش از اجراء، ایجاد بسترهای مشارکتی که در آن تصمیم‌گیران، سیاست‌گذاران و شهروندان می‌توانند به‌طور هم‌زمان تعامل کنند و نظرات خود را ارائه دهند و افزایش شفافیت در فرآیندهای حکمرانی آب از طریق ایجاد جلسات مجازی و نمایش داده‌های بلادرنگ است. با وجود پتانسیل بالای چارچوب پیشنهادی، پیاده‌سازی آن نیازمند زیرساخت‌های فناورانه، سیاست‌های حمایتی و تغییرات سازمانی است. در این راستا، برخی از چالش‌های کلیدی عبارت‌اند از عدم توسعه‌یافتگی زیرساخت‌های ارتباطی در برخی مناطق که می‌تواند مانعی برای پیاده‌سازی گسترده اینترنت اشیاء باشد، نیاز به ظرفیت‌سازی سازمانی و آموزش نیروی انسانی برای بهره‌برداری مؤثر از فناوری‌های نوین، ملاحظات امنیت داده‌ها و حریم خصوصی به‌ویژه در مورد اطلاعات حساس مرتبط با منابع آب و نیاز به تدوین مقررات و استانداردهای یکپارچه برای هماهنگ‌سازی داده‌ها و تعامل بین فناوری‌های مختلف از جمله این چالش‌ها محسوب می‌شود. چارچوب تلفیقی اینترنت اشیاء- هوش مصنوعی- متاورس، رویکردی جامع و داده‌محور برای تغییر شیوه حکمرانی آب در ایران ارائه می‌دهد. این ترکیب می‌تواند منجر به افزایش دقت در پیش‌بینی‌ها، بهینه‌سازی تخصیص منابع، کاهش هدررفت آب، مدیریت بهتر بحران‌های آبی و افزایش شفافیت حکمرانی آب شود. بااین‌حال، تحقق کامل این چارچوب نیازمند توسعه زیرساخت‌های دیجیتال، تدوین سیاست‌های اجرایی مناسب و افزایش آگاهی و پذیرش فناوری در میان ذی‌نفعان مختلف است. برای بهبود و تقویت سیستم‌های هشدار سریع در مدیریت منابع آب، اتخاذ یک رویکرد مدیریتی جامع ضروری است. اولین گام، یکپارچه‌سازی فناوری‌های نوین مانند اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی و متاورس برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی بحران‌های آبی به‌صورت آنی و خودکار است. این فناوری‌ها می‌توانند به سرعت وضعیت منابع آبی را شبیه‌سازی کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از شرایط آتی ارائه دهند. علاوه بر این، باید همکاری‌های بین‌بخشی و مشارکت گسترده‌تری میان دولت، سازمان‌های مردم‌نهاد و بخش خصوصی ایجاد شود تا به‌طور هم‌زمان بتوانند از داده‌های بلادرنگ و تصمیمات بهینه بهره‌برداری کنند. همچنین، آموزش و ظرفیت‌سازی در سطوح مختلف برای استفاده مؤثر از این فناوری‌ها و ایجاد زیرساخت‌های ارتباطی پایدار در مناطق مختلف، از جمله اقدامات اساسی است. حفاظت از داده‌ها و امنیت اطلاعات حساس منابع آب نیز باید در اولویت قرار گیرد تا از بروز مشکلات احتمالی جلوگیری شود. در نهایت، برای موفقیت در پیاده‌سازی این سیستم‌ها، نیاز به تدوین استانداردها و مقررات یکپارچه برای هماهنگی میان فناوری‌ها و اطمینان از سازگاری آن‌ها با شرایط موجود در کشور داریم.

منابع

1. Ahmadipour, Z. and ahmadi, E. (2021). 'The analysis of the effective factors of the failure of "water governance" in Iran', *Quarterly Journal of The Macro and Strategic Policies*, 8(Special Issue), pp. 110-140. https://doi/10.30507/jmsp.2020.102558 (In Persian)
2. Alzahrani, A.I., Chauhdary, S.H. and Alshdadi, A.A. (2023). Internet of Things (IoT)-based wastewater management in smart cities. *Electronics*, *12*(12), 2590. https://doi.org/10.3390/electronics12122590 (In Persian)
3. 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), pp. 369-388. https://doi/10.22059/ijswr.2023.355659.669455 (In Persian)
4. Ansari ghojghar, M. and Pourmohammad, P. (2024). 'Assessment the impacts of Metaverse industry on flood modeling visualization', *Nivar*, (), pp. -. https://doi/10.30467/nivar.2025.491959.1314 (In Persian)
5. Ansari Mahyari, A., Hosseini, Z.S., Ketabi, A. and Naseri, T. (2024). Obligations of States on the Right to Water from the Perspective of International Law with a View to the Water Crisis in Iran. *Public Law Studies Quarterly*, *54*(2), 1387-1408. https://doi.org/10.22059/jplsq.2022.339891.3045 (In Persian)
6. Bagheri, S., Baky-Haskuee, M., Yazdani, S. and Hayati, B. (2024). Investigating the Economic Impacts of Inter-Basin Water Transfer Projects with a Water-Embedded Multi-Regional Computable General Equilibrium Approach. *Water Resources Management*, *38*(10), 3875-3895. https://doi/10.1007/s11269-024-03844-6 (In Persian)
7. Biswas, A.K. (2013). Cooperation or conflict in transboundary water management: case study of South Asia. In *Asian Perspectives on Water Policy* (pp. 1-12). Routledge. https://doi/10.1080/02626667.2011.572886
8. Dehghani, R., Torabi poudeh, H., Younesi, H. and SHahinejad, B. (2020). Aplication of the Hybrid Model of Support Vector Machine-Algorithm Artificial Flora in Estimating the Daily Flow of Rivers (Case study: Dez basin). *Iran-Water Resources Research*, *16*(2), 132-149.
9. Fadaei Tehrani, M.R. and Abareshi, M. (2024). Technical, Environmental and Economic Review of Salt Water Desalination and Analysis for Iran. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, *9*(1),71-85. https://doi/10.22112/jwwse.2023.394456.1362 (In Persian)
10. Guy, E.L. (2022). Analysis of Law Enforcement's Use of Internet of Things for Digital Evidence Collection in Metropolitan Atlanta (Doctoral dissertation, University of the Cumberlands).
11. Huang, Y., Li, Y.J. and Cai, Z. (2023). Security and privacy in metaverse: A comprehensive survey. *Big Data Mining and Analytics*, *6*(2), 234-247. https://doi/10.26599/BDMA.2022.9020047
12. Kanade, T.M. and Batule, R.B. (2024). Artificial Intelligence and Internet of Things With Metaverse. In *Impact and Potential of Machine Learning in the Metaverse* (pp. 161-195). IGI Global.
13. Kohanhoosh Nejad, R. (2024). Governance with Artificial Intelligence. Iranian Journal of Public Policy, 10(2), 173-186 (In Persian).
14. Komar, M., Sachenko, A., Bezobrazov, S. and Golovko, V. (2016). June. Intelligent cyber defense system using artificial neural network and immune system techniques. In *International Conference on Information*

and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications (pp. 36-55). Cham: Springer International Publishing.

15. KÖYMEN, G., ÖZDEMİR, F., ENSER, Ö.Ü.V., PULUR, A., TÜFENKÇİ, Ş., DADAŞOVA, R., YILDIZ, S., SADYKOVA, D., Serkan, G.Ü.N., İbrahim, K.A.Y.A. and BİLDİRİCİ, S.S., 2021. INTERNATIONAL SCIENCE AND ART RESEARCH CENTER GENERAL COORDINATOR Yasemin AĞAOĞLU COORDINATOR.
16. Li, S., Xu, L.D. and Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information systems frontiers*, *17*, 243-259. https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7
17. Marshall, A., Grubert, E. and Warix, S. (2025). Temperature overshoot would have lasting impacts on hydrology and water resources. *Water Resources Research*, *61*(1), p.e2024WR037950.
18. Masoumi, Z., Bahmanyar, M.A., Emadi, M., Sepanlou, M.G. and Biparva, P. (2023). Improvement of Water Use Efficiency in Rice Cultivation Using Bio-Based Superabsorbent. *Polish Journal of Environmental Studies*, *32*(3) (In Persian)
19. Mohammad, H.S. (2023). The Survey of the Architecture, Standards, Advantages and Challenges of the Metaverse
20. Oh, C.S., Bailenson, J.N. and Welch, G.F. (2018). A systematic review of social presence: Definition, antecedents, and implications. *Frontiers in Robotics and AI*, *5*, 114.
21. Osborn, E.A. (2014). Sense of Place and Perceptions of Local Water Management: Current Perceptions and Potential for the Future in Ohiopyle, Pennsylvania.
22. Ostrom, E. (2010). The challenge of self-governance in complex contemporary environments. *Journal of speculative philosophy*, *24*(4), 316-332. https://doi.org/10.5325/jspecphil.24.4.0316
23. Rezaei, M. (2022). Water Crisis: A Social Dilemma. *Journal of Water and Wastewater Science and Engineering*, *7*(4), 4-16 (In Persian)
24. Rogers, P. and Hall, A.W. (2003). *Effective water governance* (Vol. 7). Stockholm: Global water partnership.
25. Salama, R. and Al-Turjman, F. (2025). Mobile cloud computing and the internet of things security and privacy. In *Edible Electronics for Smart Technology Solutions* (pp. 333-350). IGI Global.
26. Soltaninejad, A. and Goodarzi, S. (2017). Information Technology and Transformation in the Concept of Good Governance. *Quarterly Journal of Politics*, 47(1), 79-97 (In Persian)
27. Wang, Y., Su, Z., Zhang, N., Xing, R., Liu, D., Luan, T.H. and Shen, X. (2022). A survey on metaverse: Fundamentals, security, and privacy. *IEEE communications surveys & tutorials*, *25*(1), 319-352. https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3202047
28. Yassin, A.T.B.M. (2024). The role of the Internet of Things in achieving the quality of education-an exploratory study of the views of a sample of teachers in the College of Education for Human Sciences/University of Mosul. *Journal of Education for Humanities*.
29. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L. and Zorzi, M. (2014). Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things journal*, *1*(1), 22-32. https://doi/10.1109/JIOT.2014.2306328
30. Zibandeh, H. (2020). 'A research agenda for policymaking in the Internet of Things governance', *Science and Technology Policy Letters*, 10(3), 19-34 (In Persian)