

Document Type

Applied Article

پژوهش کاربردی

نوع مقاله

Meta-Analysis of the Role of the Internet of Things in the Future of Urban Water Systems in Tehran Metropolis

L. Bakhtiari^{1*}, N. Ahangari²

1- Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Ph.D. in Geography and Urban Planning, Kharazmi University, Tehran, Iran.

* Corresponding, Author Email: Leily.bakhtiari@pun.ac.ir

Received 23-09-2025
Revised 05-11-2025
Accepted 27-12-2025
Available online 16-03-2026

Abstract

The Internet of Things (IoT), through real-time monitoring and data analysis, enhances the sustainability of urban water systems and guides cities towards smart management and sustainable water supply. In this regard, the present research study has been prepared with the aim of meta-analyzing the role of the Internet of Things in the future of urban water systems in Tehran metropolis. The research approach is a systematic and structural meta-analysis, which is applied in terms of objective and descriptive-analytical in terms of methodology, based on bibliometrics and Delphi. In the first part, through systematic analysis, 388 articles retrieved from the Scopus database were identified and analyzed using VOSviewer software. In the second, structural part, 14 key indicators were analyzed using the MICMAC technique, and future scenarios were identified with the Scenario Wizard software. The statistical population comprises experts in the fields of water and urban planning, from whom 60 individuals were selected as the statistical sample using purposive sampling. The results indicate the dominance of research output from India (30.9%), China (8.5%), and the United States (7.2%). The primary research areas investigated include water quality monitoring, leak detection, smart metering, and demand management, while future challenges encompass data security, privacy, and interoperability between systems. The results of the structural analysis showed that smart irrigation has the highest influence and water infrastructure monitoring has the highest susceptibility, highlighting the key role of technology and infrastructure in urban water management. The scenarios indicated that only through the synergy of smart technologies, data analysis, and cybersecurity can high efficiency and equitable access to water be achieved in Tehran metropolis. Therefore, future predictive analyses, increased connectivity, and IoT integration are essential for optimizing water resource management and ensuring its long-term sustainability.

Keywords: Meta-Analysis; Foresight, Internet of Things (IoT), Urban Water Systems, Tehran Metropolis.

فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران

لیلی بختیاری^{۱*}، نوید آهنگری^۲

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران.

* راینامه نویسنده مسئول: Leily.bakhtiari@pun.ac.ir

تاریخ دریافت ۱۴۰۴/۰۷/۰۱
تاریخ بازنگری ۱۴۰۴/۰۸/۱۴
تاریخ پذیرش ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
تاریخ انتشار ۱۴۰۴/۱۲/۲۵

چکیده

اینترنت اشیا با پایش و تحلیل داده‌ها، پایداری سیستم‌های آب شهری را افزایش می‌دهد و شهرها را به سمت مدیریت هوشمند آب هدایت می‌کند. در این راستا، پژوهش با هدف فرا تحلیل نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری کلان‌شهر تهران تهیه شده است. رویکرد پژوهش، فرا تحلیل نظام‌مند و ساختاری است که از نظر هدف کاربردی و از نظر نوع روش توصیفی-تحلیلی مبتنی بر کتاب‌سنجی و دلفی بوده است. در بخش تحلیل نظام‌مند، ۳۸۸ مقاله بازیابی شده از پایگاه Scopus شناسایی شده و با استفاده از نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند. در بخش ساختاری، ۱۴ شاخص کلیدی با تکنیک MICMAC تحلیل و سناریوهای آینده با نرم‌افزار Scenario Wizard شناسایی شد. جامعه آماری خبرگان حوزه آب و برنامه‌ریزی شهری می‌باشد که با روش نمونه‌گیری هدفمند ۶۰ نفر نمونه آماری انتخاب شدند. نتایج نشان‌دهنده تسلط تولیدات پژوهشی هند (۳۰/۹ درصد)، چین (۸/۵) و ایالات متحده (۷/۲ درصد) است. حوزه‌های پژوهشی شامل پایش کیفیت آب، تشخیص نشت، اندازه‌گیری هوشمند و مدیریت تقاضا هستند، در حالی که چالش‌های آینده شامل امنیت داده‌ها، حفظ حریم خصوصی و قابلیت تعامل بین سامانه‌ها می‌باشد. نتایج ساختاری نشان داد آبیاری هوشمند بیشترین تأثیرگذاری و پایش زیرساخت‌های آبی بیشترین تأثیرپذیری را دارند و نقش کلیدی فناوری و زیرساخت در مدیریت آب شهری را برجسته می‌کند. سناریوها نشان داد که با هم‌افزایی فناوری‌های هوشمند، تحلیل داده و امنیت سایبری می‌توان به بهره‌وری و عدالت در دسترسی به آب در کلان‌شهر تهران رسید؛ بنابراین در آینده تحلیل‌های پیش‌بینی، افزایش اتصال و یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا برای بهینه‌سازی مدیریت منابع آب و تضمین پایداری بلندمدت آن ضروری است.

واژه‌های کلیدی: فرا تحلیل، آینده پژوهی، اینترنت اشیا، سیستم‌های آب شهری، کلان‌شهر تهران.

How to cite this article:

Bakhtiari, L., & Ahangari, N. (2026). Meta-Analysis of the Role of the Internet of Things in the Future of Urban Water Systems in Tehran Metropolis. Journal of Water and Sustainable Development, 12(4), 159-176. <https://doi.org/10.22067/jwsd.v12i4.2509-1457>

بسیاری از شرکت‌های آب در مراحل اولیه پذیرش پلتفرم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء قرار دارند و انتظار می‌رود بین سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۳۰ تعداد شبکه‌های هوشمند تقریباً شش برابر شود و به ۱۵۲ میلیون اتصال برسد که حدود ۴/۳۴ درصد از اتصالات جهانی پیش‌بینی شده را تشکیل می‌دهد (Obunga و همکاران، ۲۰۲۵a). باتوجه به اهمیت پایش مستمر و بهره‌برداری مؤثر از شبکه‌های توزیع آب، سرمایه‌گذاری در راهکارهای مبتنی بر اینترنت اشیاء و دیجیتال‌سازی، به ویژه در محیط‌های شهری در حال توسعه، برای تضمین ارائه خدمات آب مطمئن و پایدار به مصرف‌کنندگان حیاتی است. این روند نشان می‌دهد آینده مدیریت آب شهری مبتنی بر ادغام فناوری‌های هوشمند و شبکه‌های دیجیتال، مسیر دستیابی به شهرهای هوشمند و پایدار را هموار می‌کند (Adedeji و همکاران، ۲۰۲۲؛ Boyle و همکاران، ۲۰۲۲).

در سال‌های اخیر، ادغام فناوری‌های اینترنت اشیاء در مدیریت و پایش آب تحولی بنیادین ایجاد کرده است (Alshami و همکاران، ۲۰۲۴) و به‌عنوان یک پیشرفت قابل توجه در مدیریت سیستم‌های آب شهری مطرح شده است و با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته حسگرها، جمع‌آوری داده‌های لحظه‌ای و تحلیل‌های هوشمند، امکان بهبود کارکرد این سامانه‌ها را فراهم می‌کند (Jan و همکاران، ۲۰۲۱). با استقرار دستگاه‌ها، حسگرها و عملگرهای متصل به یکدیگر، اینترنت اشیاء امکان نظارت، مدیریت و بهینه‌سازی اجزای مختلف سیستم‌های آب شهری را فراهم می‌آورد (Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲). این دستگاه‌ها مجموعه‌ای گسترده از اطلاعات را شامل کیفیت آب، الگوهای مصرف، اندازه‌گیری فشار، نرخ جریان و عملکرد سامانه جمع‌آوری و منتقل می‌کنند (Ramadhan و همکاران، ۲۰۲۰). داده‌های گردآوری شده، تحت تحلیل و پردازش دقیق قرار می‌گیرند تا بینش‌های ارزشمندی فراهم کنند، به‌ذی‌نفعان امکان تصمیم‌گیری آگاهانه دهند، مشکلات را به‌صورت پیشگیرانه مدیریت کنند و برنامه‌های مؤثر مدیریت آب را به اجرا گذارند (Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵).

علاوه‌براین هوشمندی و مدل‌های پیش‌بینی مبتنی بر اینترنت اشیاء این امکان را برای شرکت‌ها و نهادهای مسئول آب فراهم می‌آورد که کارایی کلی سیستم را بهبود بخشند، توزیع آب را بهینه کنند و برآورد تقاضا را با دقت بیشتری انجام دهند. الگوریتم‌های پیش‌بینی با ترکیب داده‌های لحظه‌ای مربوط به وضعیت هوا، تراکم جمعیت و روندهای مصرف گذشته، برآوردهای دقیقی از تقاضا ارائه می‌کنند (Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲). این امر امکان تخصیص منابع به‌صورت پیشگیرانه و بهینه‌سازی عملیات تصفیه و توزیع را فراهم می‌سازد. با سازگاری با شرایط متغیر و کاهش ریسک‌های ناشی از خشکسالی،

با رشد جمعیت و توسعه زیرساخت‌ها در شهرهای سراسر جهان، فشار بر منابع آب افزایش یافته (Das، ۲۰۲۴) و سیستم‌های آب شهری با چالش‌های بی‌سابقه ناشی از زیرساخت‌های فرسوده، رشد جمعیت و تغییرات اقلیمی مواجه شده‌اند (Infant و همکاران، ۲۰۲۵). این سیستم‌ها که در گذشته بیشتر برای تأمین آب آشامیدنی سالم، دفع فاضلاب و کاهش خطر سیلاب طراحی شده بودند، امروزه در پاسخگویی به نیازها و عدم قطعیت‌های فزاینده قرن بیست‌ویکم با مسائل قابل توجهی روبه‌رو هستند (Doorn، ۲۰۲۱). در حال حاضر، چالش‌های جهانی متنوعی در زمینه آب وجود دارد که شامل دسترسی محدود، ناپایداری و ناکافی بودن آب سالم و پاک است؛ در حالی که در سال ۲۰۲۰ تنها ۷۴ درصد از جمعیت جهان به این منابع دسترسی داشتند (WHO، ۲۰۲۲). علاوه‌براین دسترسی به آب و کیفیت آن در سطح جهانی تغییرات چشمگیری را تجربه می‌کند و انتظار می‌رود که فشار آب تا سال ۲۰۲۵ بیش از ۵۰ درصد جمعیت جهان را تحت تأثیر قرار دهد (Adu-Manu و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه‌براین، بیش از دو میلیارد نفر در حال تجربه فشار شدید آب هستند که ناشی از مصرف بیش از حد و استفاده از بیش از ۸۰ درصد منابع آب در دسترس آن‌ها می‌باشد (Kulangara Velayudhan و همکاران، ۲۰۲۲). در این زمینه، یکپارچه‌سازی فناوری اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری، فرصت‌های بی‌نظیری برای بهبود بهره‌وری، پایداری و تاب‌آوری فراهم می‌کند؛ بنابراین، انتظار می‌رود که آینده سیستم‌های آب شهری به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر اینترنت اشیاء به عنوان مجموعه‌ای نوظهور از فناوری‌ها قرار گیرد (Yuan و همکاران، ۲۰۱۹).

شرکت‌های آب در سراسر جهان با چالش‌های مستمر در تأمین پایدار، کافی و پیوسته آب برای مصرف‌کنندگان مواجه هستند، زیرا افزایش جمعیت، فشارهای ناشی از شهرنشینی و تغییرات اقلیمی بر منابع آب فشار وارد می‌کنند (Adedeji و همکاران، ۲۰۲۲). دستیابی به ششمین هدف توسعه پایدار سازمان ملل^۱ که بر تأمین آب سالم و پایدار برای همه تأکید دارد، نیازمند به‌کارگیری فناوری‌های نوین و هوشمند در شبکه‌های توزیع آب است (Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵). اینترنت اشیاء به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در دیجیتال‌سازی این شبکه‌ها، امکان پایش لحظه‌ای، مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی عملکرد سیستم‌های آب را فراهم می‌کند و پیش‌بینی می‌شود تعداد اتصالات آن تا سال ۲۰۳۰ به حدود ۴ میلیارد برسد، درحالی‌که این رقم در سال ۲۰۲۱ تقریباً ۲ میلیارد بود (Boyle و همکاران، ۲۰۲۲). این رشد چشمگیر به ویژه در کشورهای در حال توسعه محسوس است، جایی که

سیلاب یا خرابی زیرساخت‌ها، این قابلیت‌ها نه تنها موجب کاهش هدررفت آب می‌شوند، بلکه تاب‌آوری سیستم‌های آب شهری را نیز افزایش می‌دهند. اینترنت اشیا به‌ویژه برای سیستم‌های آب شهری تحول‌آفرین است، زیرا امکان نگهداری پیش‌بینانه، کاهش هدررفت منابع و انطباق با مقررات را از طریق نظارت مستمر فراهم می‌کند ([Alshami و همکاران، ۲۰۲۴](#)).

با وجود فرصت‌های فراوان، یکپارچه‌سازی اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با چالش‌های منحصربه‌فردی مواجه است که برخلاف اکثر کاربردهای اینترنت اشیا ناشی از ماهیت پیچیده شبکه‌های توزیع آب، اهمیت راهبردی مدیریت منابع آب و آسیب‌پذیری بیشتر در برابر خطرات محیطی است ([Alshami و همکاران، ۲۰۲۴](#)). برخلاف پیاده‌سازی‌های اینترنت اشیا در حوزه‌هایی مانند خانه‌های هوشمند یا خرده‌فروشی، سیستم‌های آب شهری نیازمند نظارت لحظه‌ای بر متغیرهای پیچیده‌ای همچون کیفیت آب، فشار و نشت در زیرساخت‌های غالباً قدیمی و غیرمتمرکز هستند. ضروری است که فناوری‌های حسگر پیشرفته، دستگاه‌های کم‌مصرف و چارچوب‌های ارتباطی مقاوم مستقر شوند تا بتوانند در سخت‌ترین شرایط و محیط‌های دورافتاده عملکرد مؤثر داشته باشند ([Zyoud، ۲۰۲۵](#)).

شواهد فزاینده‌ای در قالب اطلاعات مربوط به راهکارهای مبتنی بر اینترنت اشیا در حوزه‌های متنوع وجود دارد. پژوهشگران توسعه و اثرات پذیرش اینترنت اشیا را در بسیاری از حوزه‌های علمی از جمله مدیریت زمین ([Patel و همکاران، ۲۰۲۳](#))، کشاورزی هوشمند ([Mengash و همکاران، ۲۰۲۵](#))، بهداشت و درمان ([Patil، ۲۰۲۳](#))، انرژی هوشمند ([Rao و همکاران، ۲۰۲۵](#))، شهر هوشمند ([Cerasi و Akturk، ۲۰۲۳](#))؛ [He و همکاران، ۲۰۲۲](#))، طراحی منظر ([Yang و Li، ۲۰۲۴](#))، صنعت ۴.۰ ([Zhang و همکاران، ۲۰۲۴](#))، ایمنی کار ([Zorzenon و همکاران، ۲۰۲۵](#))، تولید پایدار ([Vadruccio و همکاران، ۲۰۲۵](#))، شبکه‌های هوشمند ([Nasrinasrabadi و همکاران، ۲۰۲۵](#))، آموزش ([Dai و همکاران، ۲۰۲۱](#)) و اقتصاد دایره‌ای ([Mehmood و همکاران، ۲۰۲۵](#))، بررسی کردند. اگرچه پیاده‌سازی اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با کاربردهای رایج آن در این حوزه‌ها همسو است، تحلیل نظام‌مند و ساختاری جامع در زمینه خاص سیستم‌های آب شهری محدود است. این خلأ، انگیزه‌ای برای پژوهش حاضر شد تا روندهای پژوهشی، موضوعات نوظهور و آینده پژوهی در کاربرد اینترنت اشیا برای مدیریت آب شهری را بررسی نمایند.

نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری باتوجه‌به پژوهش‌های اخیر به‌عنوان چارچوبی یکپارچه و هوشمند برای مدیریت منابع آب به‌وضوح قابل مشاهده است. در این راستا، مطالعه [Amador-Castro و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، نشان داد که

اینترنت اشیا پایش کیفیت آب شهری را سریع‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌کند و علم شهروندی وضوح مکانی-زمانی داده‌ها را افزایش می‌دهد. [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند با ترکیب اینترنت اشیا و بلاکچین پیش‌بینی تقاضای آب محیط‌های شهری با دقت زیاد انجام می‌شود و باعث هم‌افزایی فناوری‌های نوظهور در مدیریت منابع آب شهری می‌شود. پژوهش‌های [Hamel و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Alshami و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، ضرورت استقرار اینترنت اشیا، استفاده برای ارتقای دقت داده‌ها و بهینه‌سازی مدیریت سیستم‌های آب و فاضلاب را تایید کردند. [Dharmarathne و همکاران \(۲۰۲۵\)](#) و [Infant و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند ترکیب اینترنت اشیا با یادگیری ماشین و هوش مصنوعی قابل توضیح تحلیل پیش‌بینانه کیفیت آب، شناسایی نشت و بهینه‌سازی مصرف انرژی را ممکن کرده و شفافیت و اعتماد ذی‌نفعان را افزایش می‌دهد؛ موضوعی که با نتایج [Naith و Mancy \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است، زیرا با اینترنت اشیا، بهره‌وری انرژی و پایداری فشار سیستم آب در شبکه‌های شهری بهبود یافته و قابلیت اعتماد اپراتورها تقویت می‌شود. [Pagano و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان دادند استقرار گسترده اینترنت اشیا در سامانه‌های توزیع آب، وابستگی به فضای ابری را کاهش داده و پایداری سیستم آب شهری افزایش یافته است. مطالعات [Obunga و همکاران \(۲۰۲۵b\)](#) و [Chundru و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، نشان داد اینترنت اشیا موجب کاهش آب غیر درآمدی، بهینه‌سازی فرآیندهای مدیریت آب، کاهش زمان پاسخ به بحران‌ها و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود، یافته‌ای که در مطالعات [Kulangara Velayudhan و همکاران \(۲۰۲۲\)](#)، [Adeleke و همکاران \(۲۰۲۳\)](#) و [Das \(۲۰۲۴\)](#) نیز مشاهده شد، زیرا ترکیب اینترنت اشیا و هوش مصنوعی امکان پیش‌بینی نگهداری، شناسایی نشت و تحلیل داده‌های گسترده شبکه را فراهم کرده و کارایی توزیع آب شهری را بهبود می‌بخشد. [Mondal \(۲۰۲۴\)](#)، [Okoli و Kabaso \(۲۰۲۴\)](#) و [Kalyanam \(۲۰۲۳\)](#)، نشان دادند استفاده از هوش مصنوعی و اینترنت اشیا موجب کاهش هدررفت آب، بهبود توزیع و کیفیت آب، شناسایی سریع نشت‌ها، پیش‌بینی مصرف آینده و افزایش پایداری و مقاومت سیستم‌های آب شهری می‌شود. در نهایت مرور جامع [نورمند \(۱۴۰۱\)](#) و [ایزدی‌فر \(۱۴۰۳\)](#)، نشان داد اینترنت اشیا و هوش مصنوعی با هم‌افزایی یکدیگر، سیستم‌های آب شهری را به صورت چارچوبی هوشمند، پیش‌بینانه و مقاوم توسعه می‌دهند، به گونه‌ای که آینده مدیریت آب شهری بر پایه اینترنت اشیا و تحلیل هوشمند داده‌ها شکل گرفته و امکان تصمیم‌گیری بهینه و کارآمد در سطح کلان شهری فراهم می‌شود؛ بنابراین، مرور ادبیات نشان می‌دهد که اینترنت اشیا با ادغام هوش مصنوعی و فناوری‌های نوظهور مانند بلاکچین، حسگرهای کم‌هزینه و

پروتکل‌های پیشرفته، قابلیت پایش لحظه‌ای، پیش‌بینی تقاضا، شناسایی نشت، بهینه‌سازی مصرف انرژی و افزایش شفافیت و اعتماد ذی‌نفعان را دارد و به کاهش هدررفت آب، افزایش بهره‌وری انرژی و ارتقای توسعه پایدار شهری کمک می‌کند، به گونه‌ای که مسیر تحقق شهرهای هوشمند، مقاوم و کارآمد را هموار می‌سازد.

کلان‌شهر تهران با افزایش بی‌سابقه جمعیت و تغییرات اقلیمی، زیرساخت‌های آبرسانی خود را با فشار شدیدی مواجه کرده است. فرسودگی و ناکارآمدی شبکه‌های انتقال و توزیع آب باعث نشت گسترده و هدررفت مقادیر قابل توجهی از آب تصفیه شده (۲۲/۹ درصد) شده است، درحالی‌که نبود برنامه‌های هدفمند و ساختارمند برای مدیریت این شبکه، کنترل کارآمد منابع آب را با محدودیت مواجه کرده است (Mohammadi و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه‌براین تفاوت ماهیت هدررفت آب در تهران، که عمدتاً ناشی از مصرف غیرمجاز و خطاهای اندازه‌گیری است، بر پیچیدگی مدیریت شبکه افزوده و نشان می‌دهد که فقدان برنامه‌ریزی راهبردی و نظام مستندسازی داده‌ها باعث تصمیم‌گیری‌های ناکارآمد و عدم تعادل میان نیازها و عملکرد شبکه شده است (Kiyani و همکاران، ۲۰۲۳). بر این اساس، پژوهش حاضر با تلفیق رویکرد نظام‌مند و تحلیل ساختاری، به بررسی ظرفیت‌ها و چالش‌های آینده به‌کارگیری اینترنت اشیا در مدیریت شبکه آب شهری تهران می‌پردازد و تأثیرات آن را بر بهبود بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های آب این کلان‌شهر بررسی می‌نماید.

مواد و روش‌ها

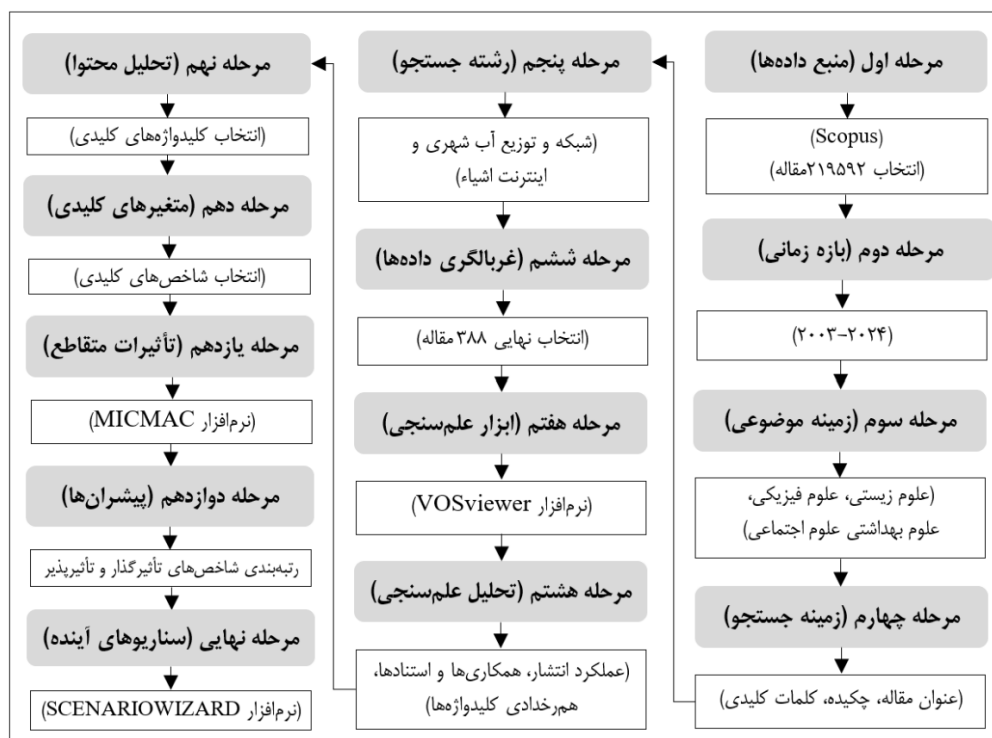
پژوهش حاضر مبتنی بر رویکرد فراترکیب نظام‌مند و تحلیل ساختاری است و روش پژوهش از نظر هدف کاربردی، و از لحاظ نوع توصیفی - تحلیلی بر اساس روش کتاب‌سنجی و دلفی بوده است. در این پژوهش، به منظور گردآوری داده‌های علمی، جستجویی نظام‌مند در پایگاه اسکوپوس^۲ انجام شد که تمامی حوزه‌های مرتبط با اینترنت اشیا و سیستم‌های آب شهری را از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴ پوشش می‌داد. این فرایند شامل چند مرحله اصلی بود: ابتدا تعیین واژگان کلیدی مرتبط با اینترنت اشیا و سیستم‌های آب شهری (سیستم‌های توزیع آب، شبکه‌های توزیع آب، سیستم‌های تأمین آب، شبکه‌های تأمین آب، شبکه‌های انتقال آب، سیستم‌های انتقال آب، سیستم‌های آب شهری، شبکه‌های آب شهری و اینترنت اشیا) مورد بررسی قرار گرفت، سپس طراحی و اجرای رشته جستجو (علوم زیستی، علوم فیزیکی، علوم بهداشتی و علوم اجتماعی) با استفاده از عملگرهای منطقی برای دستیابی به جامع‌ترین مجموعه اسناد انجام شد. جستجو در زمینه‌های عنوان مقاله، چکیده و کلمات کلیدی صورت گرفت و تعداد ۲۱۹۵۹۲ استخراج شد. در ادامه، داده‌های بازیابی شده به‌طور دستی غربالگری شدند و حاصل این فرایند دستیابی به ۳۸۸

مقاله علمی بود که شامل ۲۳۱ مقاله کنفرانسی (۵۹/۵ درصد)، ۱۱۷ مقاله مجله (۳۰/۲ درصد)، ۱۵ فصل کتاب (۳/۹ درصد)، ۱۲ مرور کنفرانس (۳/۱ درصد) و ۱۳ مرور مقاله (۳/۳ درصد) می‌باشد. پس از مرحله گردآوری، داده‌ها با رویکرد کتاب‌سنجی و به کمک نرم‌افزار VOSviewer تحلیل شدند.

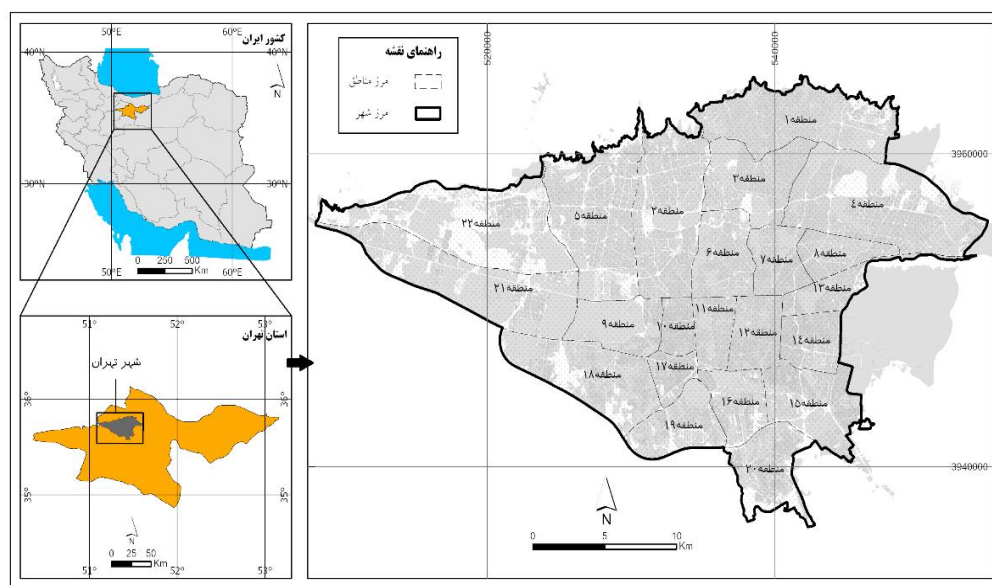
در بخش دوم، ابتدا ۱۴۶ کلیدواژه مرتبط با نقش اینترنت اشیا در آینده سیستم‌های آب شهری شناسایی شد. این کلیدواژه‌ها برای اعتبارسنجی و کنترل بیشتر در اختیار خبرگان قرار گرفت که در نهایت، ۱۴ شاخص کلیدی مؤثر استخراج شد (جدول ۵). جامعه آماری پژوهش شامل خبرگان (متخصصان حوزه آب شهری، فناوری اطلاعات و اینترنت اشیا، مدیران و کارشناسان شرکت آب و فاضلاب تهران، اساتید و پژوهشگران دانشگاهی مرتبط با مدیریت شهری و سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری) می‌باشد که باتوجه‌به نبود پایگاه داده جامع برای فهرست افراد حرفه‌ای، از روش نمونه‌گیری گلوله‌برفی استفاده شده و ۶۰ نفر به عنوان حجم نمونه انتخاب شدند. پرسش‌نامه نیمه‌ساختاریافته بین این کارشناسان توزیع شد و از آنان خواسته شد تا در چارچوب ماتریس اثرات متقاطع، شاخص‌ها را بر اساس میزان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری در طیف ۰ تا ۳ ارزیابی کنند؛ به‌طوری‌که «۰» بدون تأثیر، «۱» تأثیر ضعیف، «۲» تأثیر متوسط، «۳» تأثیر زیاد و «P» تأثیر بالقوه است. داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از نرم‌افزار MICMAC تحلیل شد و برای تدوین سناریوهای نهایی از ابزار Scenario Wizard بهره گرفته شد. شکل (۱) فرایند مرور نظام‌مند و تحلیل ساختاری پژوهش را نمایش می‌دهد.

محدوده مورد مطالعه

شهر تهران، پایتخت سیاسی، اقتصادی و ارتباطی ایران، پرجمعیت‌ترین شهر کشور است و با تراکم جمعیتی ۱۰۵۵۰ نفر در کیلومتر مربع در رده پانزدهم شهرهای متراکم جهان قرار دارد (کورکی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۲). کلان‌شهر تهران با بیشترین رشد جمعیت در دهه‌های اخیر به دلیل مهاجریزی، سبب فشار به منابع آب شده و وضعیت آب را بحرانی کرده است. درحال حاضر، ۲۲ درصد از آب تهران از سدها، ۲۰ درصد از روان‌آب‌ها و ۵۸ درصد از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود (میرزایی و همکاران، ۱۳۹۸). سیستم‌های تأمین و توزیع آب شرب کلان‌شهر تهران شامل سدهای مخزنی، ۶۱۰ حلقه چاه، ۶ تصفیه‌خانه آب، ۲۷ مخزن هوایی، ۱۲۰ مخزن مدفون و نیمه‌مدفون، ۱۲۲ ایستگاه پمپاژ است که نگهداری و بهره‌برداری بهینه از مجموع این تأسیسات، به همراه ایستگاه‌های فشارشکن و تصفیه‌خانه‌های فاضلاب، هم در شرایط عادی و هم در شرایط اضطرار، ضرورت دارد (بشیری و همکاران، ۱۴۰۰) و همین امر، اهمیت استفاده از اینترنت اشیا در مدیریت سیستم‌های آب شهری آن را برجسته می‌کند (شکل ۲).



شکل ۱- فرایند مرور نظام مند و تحلیل ساختاری پژوهش



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی کلان‌شهر تهران

پژوهش شامل علوم رایانه ۲۵۹ (۶۶/۸ درصد)، مهندسی ۲۰۳ (۵۲/۳ درصد)، علوم تصمیم‌گیری ۷۵ (۱۹/۳ درصد)، ریاضیات ۶۹ (۱۷/۸ درصد)، فیزیک ۶۵ (۱۶/۸ درصد)، علوم محیط‌زیست ۶۲ (۱۶/۵ درصد) و انرژی ۴۳ (۱۱/۱ درصد) است که مجموع درصدها بیش از ۱۰۰ درصد است؛ زیرا هر پژوهش می‌تواند به چند حوزه تعلق داشته باشد.

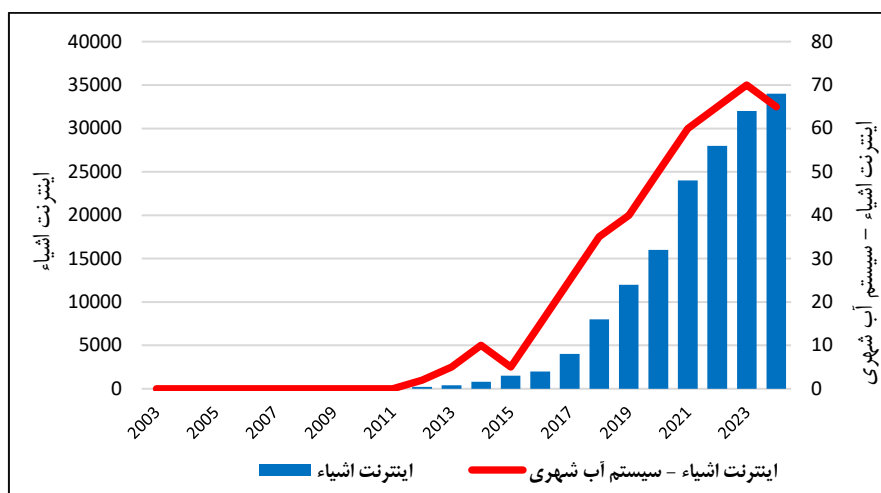
روند زمانی انتشارات: نتایج روند زمانی انتشارات نشان می‌دهد پژوهش‌های مرتبط با اینترنت اشياء از سال ۲۰۱۱ با

یافته‌ها

مرور انتشارات بازایی شده: نتایج نشان داد بین سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۴، ۳۸۸ مقاله مرتبط با اینترنت اشياء در سیستم‌های آب شهری شناسایی شد که حدود ۰/۱۸ درصد از کل ۲۱۹۵۹۲ انتشارات این حوزه را تشکیل می‌دهد. به‌عنوان حوزه‌ای نوظهور، ۲۳۱ مقاله (۵۹/۵ درصد) به‌صورت کنفرانسی منتشر شده و ۱۱۷ مقاله (۳۰/۲ درصد) شامل پژوهش‌های تجربی، آزمایشی یا مطالعات موردی هستند. حوزه‌های اصلی

۲۰۲۴ به ترتیب به ۱۲۰ و ۱۸۰ مقاله افزایش یافته است. این مقایسه بیانگر آن است که اگرچه این حوزه تخصصی در سال‌های اخیر، به‌ویژه پس از ۲۰۱۸، رشد قابل توجهی داشته، اما همچنان سهم اندکی از کل پژوهش‌های اینترنت اشیا را به خود اختصاص داده و در مرحله نوظهور قرار دارد (شکل ۳).

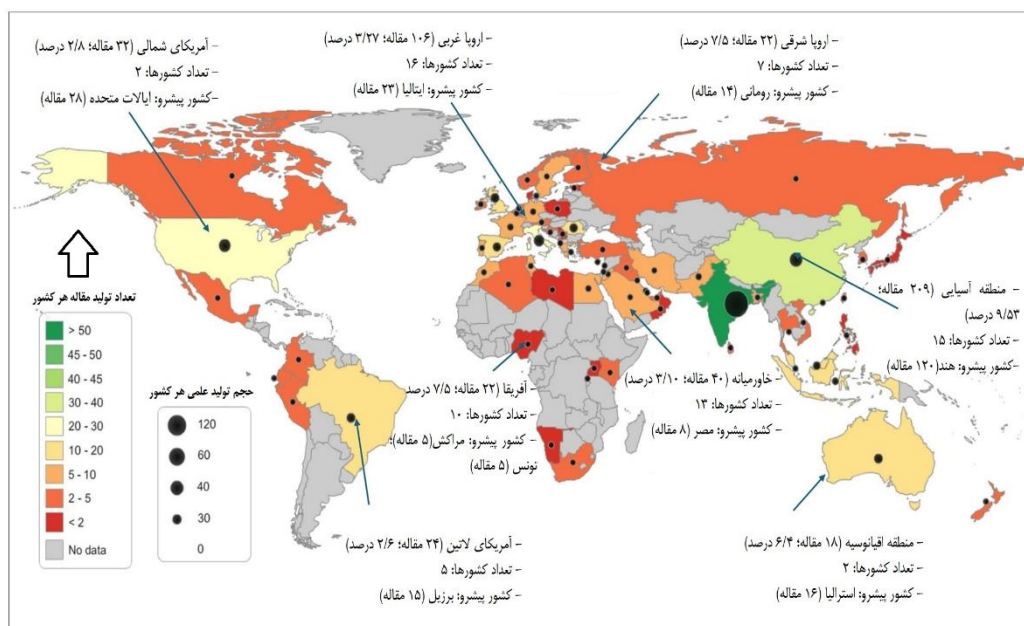
شتابی فزاینده آغاز شده و از ۱۰۰ مقاله در این سال به بیش از ۲۸ هزار مقاله در سال ۲۰۲۲ رسیده است، درحالی‌که مطالعات اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری با تأخیری نزدیک به یک دهه از سال ۲۰۱۲ شروع شده و تنها به ۶۵ مقاله در سال ۲۰۲۲ رسیده است. با ادامه این روند، تعداد مقالات مطالعات اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری در سال‌های ۲۰۲۳ و



شکل ۳- نمودار روند زمانی انتشارات (۲۰۲۴-۲۰۰۳)

عملکرد کشوری انتشارات: نتایج تولید علمی مرتبط با اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد هند با ۱۲۰ مقاله (۳۰/۹ درصد) پیش‌تاز این حوزه است و فاصله چشمگیری با سایر کشورها دارد. چین با ۳۳ مقاله (۸/۵ درصد) و ایالات متحده با ۲۸ مقاله (۷/۲ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند. کشورهای اروپای غربی مانند ایتالیا (۹/۵ درصد)، بریتانیا (۴/۱ درصد) و اسپانیا (۳/۶ درصد) نیز سهم قابل توجهی در تولید دانش این حوزه ایفا کرده‌اند. علاوه بر کشورهای توسعه‌یافته، کشورهایمانند مالزی، اندونزی، پاکستان، مصر، ایران و عربستان سعودی نقش موثری در گسترش این حوزه نوظهور دارند. در میان ۲۰ کشور برتر، ترکیبی از ۱۱ کشور توسعه‌یافته و ۱۳ کشور درحال توسعه نشان‌دهنده ماهیت جهانی و چندمرکزی این حوزه پژوهشی است (جدول ۱).

عملکرد منطقه‌ای انتشارات: نتایج تولید علمی مرتبط با اینترنت اشیا در سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد ۷۰ کشور در این حوزه فعال هستند. از نظر تعداد مقاله، آسیا با ۲۰۹ مقاله (۵۳/۹ درصد) بیشترین سهم را دارد. پس از آن اروپای غربی با ۱۰۶ مقاله (۳/۲۷ درصد)، خاورمیانه با ۴۰ مقاله (۳/۱۰ درصد)، آمریکای شمالی با ۳۲ مقاله (۲/۸ درصد)، آمریکای لاتین با ۲۴ مقاله (۲/۶ درصد)، آفریقا و اروپای شرقی هر کدام با ۲۲ مقاله (۷/۵ درصد) و اقیانوسیه با ۱۸ مقاله (۶/۴ درصد) قرار دارند. از نظر تعداد کشورهای مشارکت‌کننده، اروپای غربی با ۱۶ کشور در صدر است. پس از آن آسیا با ۱۵ کشور، خاورمیانه با ۱۳ کشور، آفریقا با ۱۰ کشور، اروپای شرقی با ۷ کشور، آمریکای لاتین با ۵ کشور و آمریکای شمالی و اقیانوسیه هر کدام با ۲ کشور دنبال می‌شوند. مجموع درصدها بیش از ۱۰۰ درصد است، زیرا هم‌نویسندگی میان نویسندگان و کشورها باعث همپوشانی مطالعات شده است (شکل ۴).



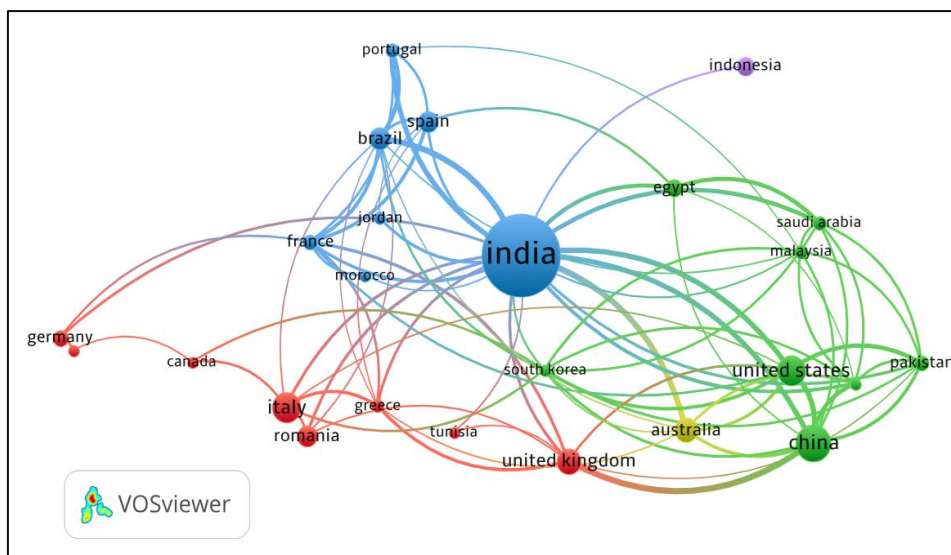
شکل ۴- تولید پژوهشی در سطح ملی درباره سیستم‌های آب شهری مبتنی بر اینترنت اشیا

جدول ۱- کشورهای برتر با بیشترین مشارکت در پژوهش‌های اینترنت اشیا - سیستم‌های آب شهری

رتبه	کشور	تعداد مقاله‌ها	درصد	رتبه	کشور	تعداد مقاله‌ها	درصد
۱	هند	۱۲۰	۳۰/۹	۱۲	پاکستان	۹	۲/۳
۲	چین	۳۳	۸/۵	۱۴	مصر	۸	۲/۱
۳	آمریکا	۲۸	۷/۲	۱۴	آلمان	۸	۲/۱
۴	ایتالیا	۲۳	۵/۹	۱۶	پرتغال	۷	۱/۸
۵	استرالیا	۱۶	۴/۱	۱۷	اردن	۶	۱/۵
۵	بریتانیا	۱۶	۴/۱	۱۸	بنگلادش	۵	۱/۳
۷	برزیل	۱۵	۳/۹	۱۸	یونان	۵	۱/۳
۸	رومانی	۱۴	۳/۶	۱۸	ایران	۵	۱/۳
۸	اسپانیا	۱۴	۳/۶	۱۸	مراکش	۵	۱/۳
۱۰	مالزی	۱۲	۳/۱	۱۸	عربستان	۵	۱/۳
۱۱	اندونزی	۱۰	۲/۶	۱۸	سوئد	۵	۱/۳
۱۲	فرانسه	۹	۲/۳	۱۸	تونس	۵	۱/۳

پیشرو در تولید پژوهش از طریق همکاری‌های بین‌المللی معرفی می‌شود. خوشه سوم (قرمز) شامل کشورهای اروپایی و آمریکای شمالی مانند ایتالیا، رومانی، یونان، بریتانیا، کانادا و آلمان است که بریتانیا و ایتالیا بیشترین میزان همکاری را نشان می‌دهند. خوشه چهارم (بنفش) تنها شامل اندونزی است و خوشه پنجم (زرد) شامل استرالیا است که با کشورهای مختلف خوشه‌های دیگر تعامل دارد. قوی‌ترین پیوندهای هم‌نویسندگی در این شبکه میان هند و چین، چین و بریتانیا، و ایالات متحده و بریتانیا مشاهده می‌شود و با خطوط ضخیم‌تر بر روی نقشه مشخص شده‌اند (شکل ۵).

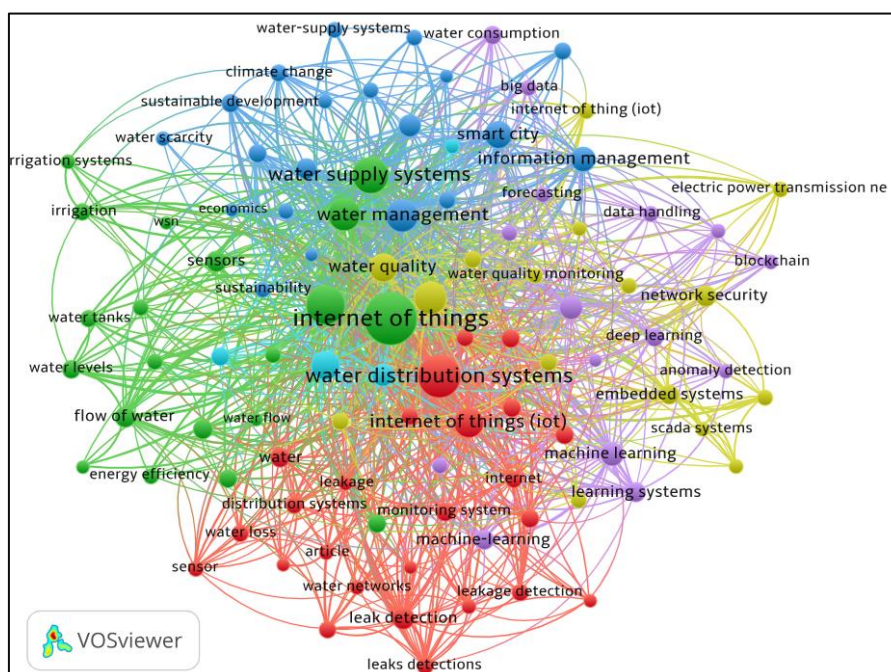
خوشه‌بندی کشورها در نقشه همکاری‌های هم‌تألیفی: نتایج
 بصری‌سازی شبکه همکاری‌های پژوهشی بین‌المللی در حوزه اینترنت اشیا و سیستم‌های آب شهری نشان می‌دهد کشورها در پنج خوشه اصلی با رنگ‌های متفاوت سازماندهی شده‌اند. خوشه اول (سبز) شامل کشورهایی مانند چین، ایالات متحده، پاکستان، مالزی، عربستان و مصر است که چین با بیشترین تعداد پیوندها و ضخامت خطوط ارتباطی، نقش محوری دارد. خوشه دوم (آبی) شامل هند، برزیل، اسپانیا، پرتغال و چند کشور دیگر است که هند با بیشترین پیوندها و قدرت همکاری (۲۰ از مجموع ۷۲) به‌عنوان کشور



شکل ۵- نقشه خوشه‌بندی کشورها در همکاری‌های هم‌تألیفی حوزه اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری

خوشه سوم (آبی) بر مفاهیمی همچون تأمین آب، مدیریت مصرف، تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار تأکید می‌کند؛ خوشه چهارم (زرد) به امنیت شبکه، سیستم‌های تعبیه‌شده، یادگیری عمیق، زنجیره بلوکی و سامانه‌های کنترل و نظارت خودکار اختصاص دارد؛ و خوشه پنجم (بنفش) نیز شامل واژه‌هایی مانند شهر هوشمند، داده‌های کلان و مدیریت اطلاعات است. در مجموع، یافته‌ها نشان می‌دهد کلیدواژه‌های اینترنت اشیاء، سامانه‌های توزیع آب و سامانه‌های تأمین آب بیشترین وزن و مرکزیت را در شبکه داشته و به‌عنوان محورهای اصلی پژوهش‌های علمی در این حوزه محسوب می‌شوند (شکل ۶).

شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها: نتایج تحلیل شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها نشان داد از میان ۹۴۹۷ واژه استخراج شده از مقالات مرتبط با اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری، ۲۴۴ واژه حداقل آستانه تکرار مورد نظر را داشتند و پس از اعمال معیار امتیاز مرتبط بودن با مقدار ۶۰ درصد، در نهایت ۱۴۶ واژه کلیدی به‌عنوان مفاهیم اصلی شناسایی شدند. این واژه‌ها در پنج خوشه اصلی سازمان‌دهی شده‌اند: خوشه نخست (قرمز) شامل موضوعاتی مانند تشخیص نشتی، شبکه‌های توزیع آب، حسگرها، سیستم‌های نظارت و یادگیری ماشین است؛ خوشه دوم (سبز) به مقوله‌هایی نظیر مدیریت آب، کیفیت آب، آبیاری هوشمند، پایداری و بهره‌وری انرژی اختصاص دارد؛



شکل ۶- نقشه شبکه هم‌رخدادی واژه‌ها در حوزه اینترنت اشیاء در سیستم‌های آب شهری

تحلیل ساختاری-آینده پژوهی

شناسایی متغیرهای کلیدی: در این بخش، ۱۴ شاخص کلیدی با رویکردی مروری-نظام مند در حوزه نقش اینترنت اشیاء

درآینده سیستم های آب شهری شناسایی شده اند. این شاخص ها به منظور تحلیل ساختاری با استفاده از نرم افزار MICMAC در مسیر برنامه ریزی آینده کلان شهر تهران انتخاب شده اند (جدول ۲).

جدول ۲- شاخص کلیدی جامعه شناختی زیرساخت سبز شهری

شماره	شاخص	تعریف عملیاتی
۱	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	فرآیندهای مدیریت و توزیع آب با استفاده از کنترل خودکار کنترل می شوند
۲	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند	شبکه های هوشمند آب شهری در برابر حملات سایبری و تهدیدات دیجیتال محافظت می شوند
۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	الگوریتم ها برای پیش بینی، بهینه سازی و تصمیم گیری در مدیریت آب بهره گیری می شوند
۴	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری	داده های حجیم و بلادرنگ شبکه پردازش و تحلیل می شوند
۵	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب	نشت ها با کمک حسگرهای اینترنت اشیاء کشف و مکان یابی می شوند
۶	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	وضعیت لوله ها، پمپ ها و تجهیزات شهری به صورت هوشمند پایش می شود
۷	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	شاخص های فیزیکی و شیمیایی آب به صورت مستمر سنجش می شوند
۸	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	مصرف آب فضای سبز شهری با سامانه های هوشمند بهینه سازی می شود
۹	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	توزیع آب در مناطق مختلف شهر با سامانه های هوشمند مدیریت و عدالت آن بهبود می یابد
۱۰	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	الگوهای مصرف خانگی، تجاری و صنعتی با کنتورهای هوشمند پایش و تحلیل می شوند
۱۱	مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی	اثرات منفی محیط زیستی با استفاده از اینترنت اشیاء کاهش می یابند
۱۲	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تاب آوری و مدیریت پایدار منابع با به کارگیری فناوری تقویت می شوند
۱۳	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	جریان و فشار در شبکه بهبود و تلفات با داده های اینترنت اشیاء کاهش می یابند
۱۴	ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری	کارایی کل سیستم با کاهش هدررفت و بهبود خدمات افزایش می یابد

تحلیل الگوی تأثیرگذاری و تأثیرپذیری شاخص ها: نتایج نشان

داد در میان شاخص ها، کاربرد آبیاری هوشمند در شهر (۲۵۶۴۵) بیشترین تأثیرگذاری غیرمستقیم را دارد، درحالی که پایش وضعیت زیرساخت های آبی (۱۸۰۲۹) کمترین میزان را نشان می دهد. از منظر تأثیرپذیری غیرمستقیم، پایش وضعیت زیرساخت های آبی (۲۵۵۶۹) در جایگاه نخست قرار گرفته و بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری (۱۸۸۷۹) کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. در بعد تأثیرگذاری مستقیم، شاخص های کاربرد آبیاری هوشمند در شهر و پایش کیفیت آب به صورت هوشمند هر دو (۳۳) را ثبت کرده اند، درحالی که پایش وضعیت زیرساخت های آبی (۲۲) در کمترین سطح قرار گرفته است. همچنین در

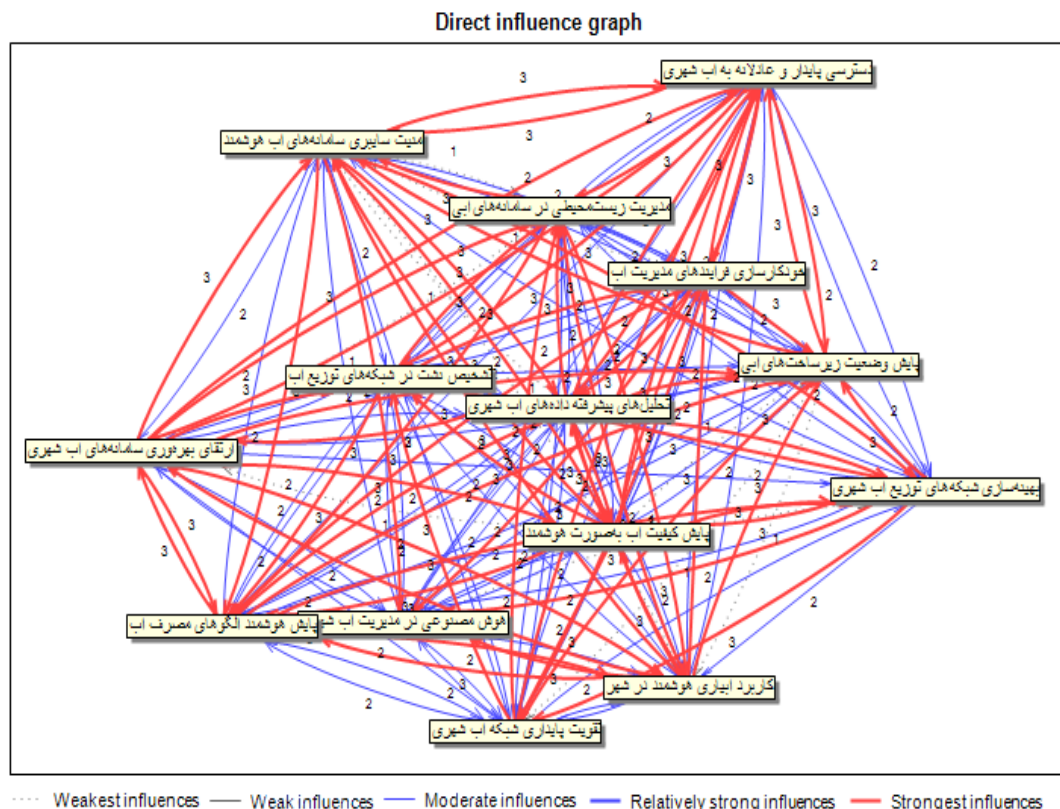
تأثیرپذیری مستقیم، زیادترین مقدار به پایش وضعیت زیرساخت های آبی (۳۳) و کمترین آن به بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری (۲۳) تعلق دارد (جدول ۳). باتوجه به جدول (۴)، نمودار تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم نشان دهنده روابط پیچیده شاخص ها و شدت تأثیر آن ها با خطوط رنگی است؛ خطوط نقطه چین کم اثر، مشکی ضعیف، آبی متوسط، آبی پررنگ نسبتاً قوی و قرمز قوی ترین تأثیرات غیرمستقیم را نمایش می دهند. این نمودار شاخص های کلیدی با بیشترین تأثیر را مشخص کرده و به تحلیل جامعه شناختی زیرساخت سبز شهری در مسیر توسعه آینده کلان شهر تهران کمک می کند (شکل های ۷ و ۸).

جدول ۳- میزان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم شاخص ها بر همدیگر

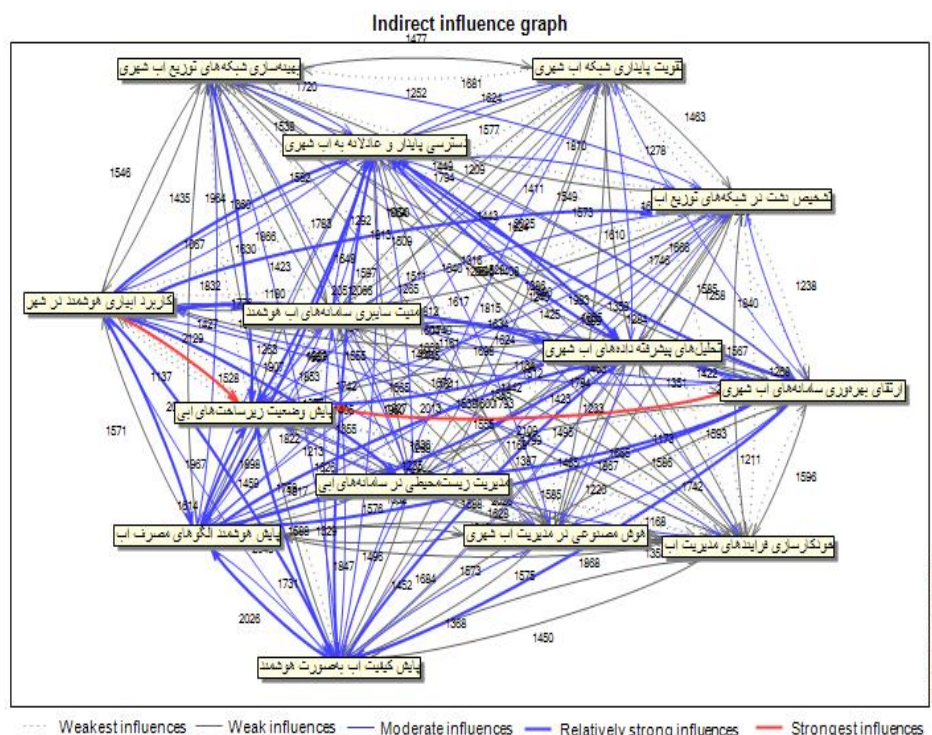
ردیف	شاخص	میزان تأثیرات غیرمستقیم تأثیرگذاری	میزان تأثیرات مستقیم تأثیرپذیری	میزان تأثیرات مستقیم تأثیرپذیری
۱	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	۱۹۵۰۹	۱۹۸۲۲	۲۵
۲	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند	۲۲۳۶۷	۲۲۰۶۹	۲۸
۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	۱۸۵۱۲	۲۰۹۷۲	۲۷
۴	تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری	۲۴۳۲۱	۲۵۰۰۷	۳۲
۵	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب	۱۹۶۹۷	۲۲۳۹۷	۲۵
۶	پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی	۱۸۰۲۹	۲۵۵۶۹	۲۲
۷	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	۲۵۰۰۷	۲۲۷۲۸	۳۲
۸	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	۲۵۶۴۵	۱۹۹۰۰	۳۳
۹	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	۲۴۹۴۳	۲۴۰۸۳	۳۲
۱۰	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	۲۴۰۱۲	۲۴۸۷۶	۳۱
۱۱	مدیریت محیط زیست محیطی در سامانه‌های آبی	۱۹۵۸۵	۲۲۸۱۶	۲۴
۱۲	تقویت پایداری شبکه آب شهری	۱۹۹۶۴	۲۰۴۳۸	۲۶
۱۳	بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری	۲۲۲۶۴	۱۸۸۷۹	۲۹
۱۴	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری	۲۵۲۴۷	۱۹۵۴۶	۳۰
	کل	۳۹۳	۳۹۳	۳۹۳

آبی زیادتیرین رتبه را در شاخص‌های تأثیرپذیر مستقیم و غیرمستقیم به خود اختصاص داده است و جایگاه برجسته این دو شاخص در هر چهار بعد نشان‌دهنده نقش محوری آن‌ها در سیستم آب شهری تهران است (جدول ۴).

رتبه‌بندی شاخص‌های تأثیرگذار و تأثیرپذیر مستقیم و غیرمستقیم: نتایج نشان می‌دهد کاربرد آبیاری هوشمند در شهر بیشترین رتبه را در شاخص‌های تأثیرگذار مستقیم و غیرمستقیم دارد، درحالی‌که پایش وضعیت زیرساخت‌های



شکل ۷- نمودار تأثیر مستقیم با پوشش ۱۰۰ درصد



شکل ۸- نمودار تأثیر غیرمستقیم با پوشش ۱۰۰ درصد

جدول ۴- میزان تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم شاخص ها بر همدیگر

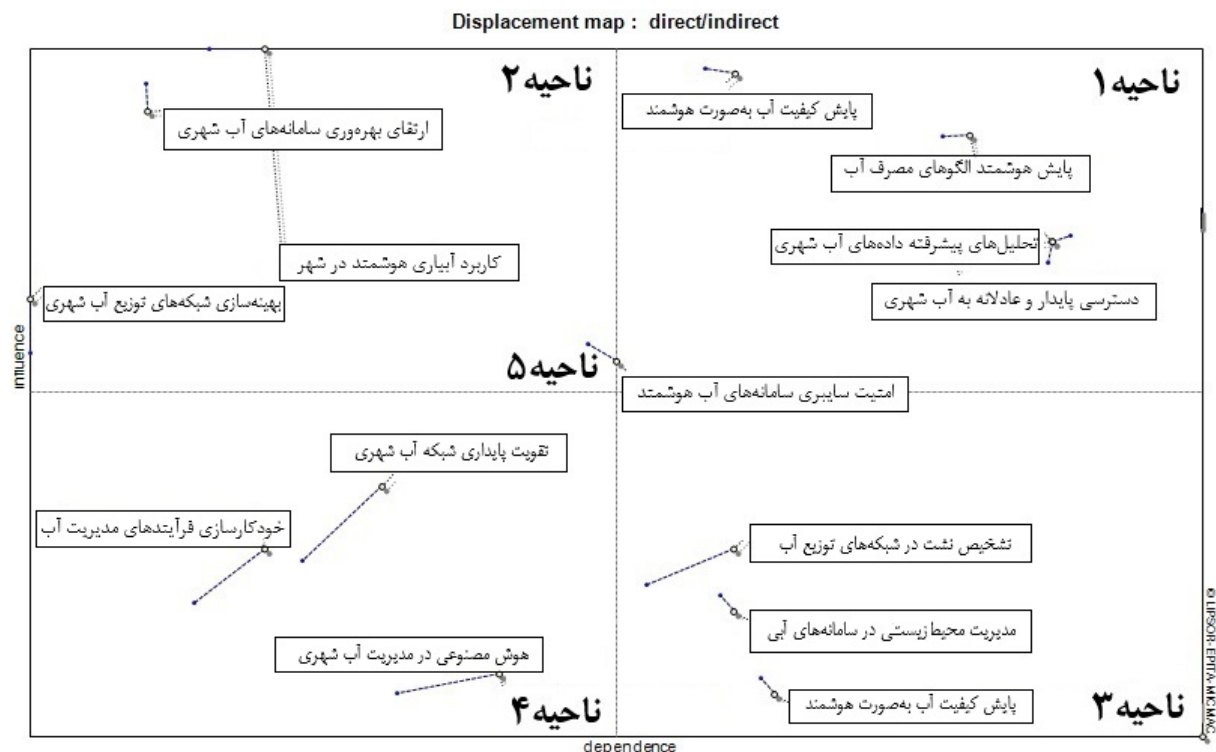
رتبه	شاخص های تأثیرگذار مستقیم	شاخص های تأثیرگذار غیرمستقیم	شاخص های تأثیر پذیر مستقیم	شاخص های تأثیر پذیر غیرمستقیم
۱	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	پایش وضعیت زیرساخت های آبی
۲	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	ارتقای بهره‌وری سامانه های آب شهری	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری
۳	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب
۴	ارتقای بهره‌وری سامانه های آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری
۵	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری	تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب	مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی
۶	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	پایش وضعیت زیرساخت های آبی
۷	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	پایش هوشمند الگوهای مصرف آب	مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب
۸	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند
۹	تقویت پایداری شبکه آب شهری	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری
۱۰	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تقویت پایداری شبکه آب شهری	تقویت پایداری شبکه آب شهری
۱۱	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب	مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر
۱۲	مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب
۱۳	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری	ارتقای بهره‌وری سامانه های آب شهری	ارتقای بهره‌وری سامانه های آب شهری
۱۴	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	پایش وضعیت زیرساخت های آبی	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری

طبقه‌بندی شاخص‌های پیشران در تأثیرگذاری و تأثیرپذیری: طبقه‌بندی شاخص‌های پیشران در تأثیرگذاری و تأثیرپذیری، بر اساس جدول (۵) نشان می‌دهد که شاخص‌ها در پنج ناحیه تحلیلی با درجات مختلف تأثیرگذاری و تأثیرپذیری قرار دارند. نواحی دوجهی و تأثیرگذار نقش حیاتی در جهت‌دهی سیستم ایفا می‌کنند، درحالی‌که نواحی وابسته و مستقل

بیشتر منعکس‌کننده عملکرد سامانه‌ها هستند و ناحیه تنظیمی به تعادل‌بخشی و پایدارسازی روند توسعه کمک می‌کند. این طبقه‌بندی، چارچوبی راهبردی برای اولویت‌بندی اقدامات و هموارسازی مسیر توسعه آینده بهره‌گیری از اینترنت اشیاء در پایش و مدیریت هوشمند آب شهری کلان‌شهر تهران را تسهیل می‌کند (شکل ۹).

جدول ۵- طبقه‌بندی نیروهای پیشران

ناحیه	نوع شاخص‌ها	ویژگی	سمت تأثیرگذاری و تأثیرپذیری	شاخص‌ها
ناحیه ۱	دو وجهی	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری بر نواحی ۳ و ۴، تأثیرپذیری از ناحیه ۱ و تا حدی ۴	پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب، تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری، دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری
ناحیه ۲	تأثیرگذار	تأثیرگذاری زیاد، تأثیرپذیری کم	تأثیرگذاری بر نواحی ۲ و ۳، بدون تأثیرپذیری	ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آب شهری، بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع آب شهری
ناحیه ۳	وابسته	تأثیرگذاری کم، تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری بر ناحیه ۴، تأثیرپذیری از نواحی ۱ و ۲	تشخیص نشت در شبکه‌های توزیع آب، مدیریت محیط‌زیستی در سامانه‌های آبی، پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی
ناحیه ۴	مستقل	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری کم	تأثیرگذاری بر ناحیه ۳، تأثیرپذیری تا حدی از ناحیه ۲	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب، هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری، تقویت پایداری شبکه آب شهری
ناحیه ۵	تنظیمی	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری زیاد	تأثیرگذاری و تأثیرپذیری نسبتاً زیاد و متعادل	امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند



شکل ۹- نمودار پراکنش شاخص‌ها در پلان تأثیرگذاری و تأثیرپذیری

تدوین سناریوهای احتمالی آینده: در چارچوب سناریونویسی ویزارد مبتنی بر تحلیل ساختاری میک مک، آینده مدیریت آب شهری در کلان شهر تهران بر اساس شدت و نوع تأثیر نیروها و پیشران ها در پنج ناحیه تحلیلی قابل ترسیم است. در سناریوی مطلوب، نیروها فعال و تأثیرگذار هستند و پایش کیفیت آب هوشمند، تحلیل پیشرفته داده ها، آبیاری هوشمند، مدیریت نشت و زیرساخت ها، خودکارسازی و هوش مصنوعی و امنیت سایبری به طور کامل و هماهنگ اجرا می شوند. در سناریوی محتاط، نیروها فعال محدود عمل

می کنند و عملکرد سامانه ها کنترل شده و مرحله ای است. سناریوی رکود با نیروهای کم اثر مشخص شده و منجر به پایش ناقص، بهره وری کم، شبکه های ناکارآمد و مدیریت محیط زیست محیط زیستی کم اثر می شود. در سناریوی ناهماهنگ، نیروها ناسازگار عمل کرده و عملکرد نواحی پراکنده، غیرمنسجم و ناسازگار است و در سناریوی وابسته منفعل، نیروها منفعل و کم اثر هستند که پایش و تحلیل حداقلی، شبکه های ناکارآمد، بهره وری کم، هوش مصنوعی ناکافی و امنیت سایبری محدود را به همراه دارد (جدول ۶).

جدول ۶- سناریوهای احتمالی آینده

نیروها / پیشران ها	سناریوی مطلوب فعال و تأثیرگذار	سناریوی محتاط فعال محدود	سناریوی رکود کم اثر	سناریوی ناهماهنگ ناسازگار	سناریوی وابسته منفعل
ناحیه ۱ - دووجهی	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند محدود و مرحله ای، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب محدود و مرحله ای، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری محدود و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری کنترل شده	پایش کیفیت آب به صورت ناقص، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب ناقص، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری ناقص و دسترسی محدود	پایش کیفیت آب به صورت هوشمند الگوهای مصرف آب ناسازگار، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری ناسازگار و دسترسی غیرمنسجم	پایش کیفیت آب به صورت حداقلی، پایش هوشمند الگوهای مصرف آب حداقلی، تحلیل های پیشرفته داده های آب شهری حداقلی و دسترسی ناکافی
ناحیه ۲ - تأثیرگذار	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر، ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری و بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر محدود، ارتقای بهره وری سامانه های آب شهری محدود و بهینه سازی شبکه های توزیع آب شهری جزئی	کاربرد ناکافی آبیاری هوشمند در شهر، بهره وری کم سامانه های آب شهری و شبکه توزیع آب شهری ناکارآمد	آبیاری هوشمند در شهر پراکنده، بهره وری سامانه های آب شهری ناسازگار و شبکه توزیع آب شهری غیرمنسجم	کاربرد آبیاری هوشمند در شهر حداقلی، بهره وری سامانه های آب شهری کم و شبکه توزیع آب شهری ناکارآمد و غیرمنسجم
ناحیه ۳ - وابسته	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب، مدیریت محیط زیستی در سامانه های آبی و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب محدود، مدیریت محیط زیستی کنترل شده و پایش جزئی وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب ناقص، مدیریت محیط زیستی محیط زیستی ناقص کم اثر و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب پراکنده، مدیریت محیط زیستی ناسازگار و پایش وضعیت زیرساخت های آبی	تشخیص نشت در شبکه های توزیع آب حداقلی، مدیریت محیط زیستی محیط زیستی ضعیف و پایش حداقلی وضعیت زیرساخت های آبی
ناحیه ۴ - مستقل	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب، هوش مصنوعی در مدیریت آب شهری و تقویت پایداری شبکه آب شهری	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب محدود، هوش مصنوعی جزئی در مدیریت آب شهری و تقویت محدود پایداری شبکه آب شهری	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب ناکامل، هوش مصنوعی کم اثر در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری ضعیف	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب پراکنده، هوش مصنوعی ناسازگار در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری غیرمنسجم	خودکارسازی فرآیندهای مدیریت آب حداقلی، هوش مصنوعی ناکافی در مدیریت آب شهری و پایداری شبکه آب شهری ضعیف و غیرقابل پیش بینی
ناحیه ۵ - تنظیمی	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند و هماهنگی و تنظیم متعادل	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند محدود، هماهنگی و تنظیم محدود و کنترل محافظه کارانه	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند ناکافی و هماهنگی و تنظیم ناکارآمد	امنیت سایبری سامانه های آب هوشمند پراکنده و هماهنگی و تنظیم ناکام	امنیت سامانه های آب هوشمند حداقلی، هماهنگی و تنظیم مانیتورینگ محدود و واکنش کند

تحولات اخیر در حوزه مدیریت آب شهری نشان‌دهنده نقش رو به رشد اینترنت اشیاء در بهبود کارایی و پایداری سیستم‌های آب شهری است. در این پژوهش، بیش از ۳۰۰ مقاله بین‌المللی منتشرشده در بازه‌های زمانی اخیر بررسی شد تا روندهای جهانی، پیشرفت‌های فناورانه و مرزهای پژوهشی در کاربرد اینترنت اشیاء در شبکه‌های آب شهری شناسایی شود. نتایج نشان داد توجه پژوهشگران به کاربرد اینترنت اشیاء در مدیریت آب شهری به‌طور پیوسته در حال افزایش است و کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه بسته به ظرفیت‌های اقتصادی، زیرساختی و علمی خود، مسیرهای متفاوتی برای پذیرش این فناوری اتخاذ کرده‌اند. یافته‌ها کاربردهای متنوع اینترنت اشیاء در این حوزه را از جمله پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند، تشخیص نشت و اتلاف آب، اندازه‌گیری هوشمند مصرف، مدیریت تقاضا و یکپارچه‌سازی داده‌ها برای بهینه‌سازی تخصیص منابع برجسته می‌کند. این کاربردها به‌طور ملموسی منجر به کاهش اتلاف آب، افزایش بهره‌وری شبکه‌های توزیع و ارتقای کیفیت خدمات شده‌اند. بااین‌حال، چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های مدرن، محدودیت‌های انرژی، امنیت داده‌ها، قابلیت تعامل و آموزش ناکافی نیروهای متخصص، مانع بهره‌برداری کامل از پتانسیل اینترنت اشیاء هستند. بررسی روندهای آینده نیز نشان می‌دهد ادغام فناوری‌های نوین همچون هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، بلاک‌چین و شبکه‌های کم‌مصرف و تقویت سیاست‌ها و استانداردهای دولتی، می‌تواند به توسعه پایدار و مقاوم سیستم‌های آب شهری کمک کند. در مجموع، این تحلیل نشان می‌دهد اینترنت اشیاء نه تنها فرصت‌های عملیاتی و مدیریتی را افزایش می‌دهد، بلکه زمینه‌ساز سیاست‌گذاری راهبردی و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در مدیریت آب شهری خواهد بود.

در بخش دوم پژوهش، نتایج با استفاده از روش آینده‌پژوهی نشان داد شاخص‌های فناورانه و عملیاتی مانند کاربرد آبیاری هوشمند در شهر و پایش کیفیت آب به‌صورت هوشمند بیشترین تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم را دارند و شاخص پایش وضعیت زیرساخت‌های آبی بیشترین تأثیرپذیری را نشان می‌دهد. این نتایج با مطالعات [Amador-Castro و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است و اهمیت پایش دقیق و پیش‌بینی مصرف آب در کلان‌شهر تهران را تأیید می‌کند. بااین‌حال، نتایج نشان داد فناوری بدون زیرساخت‌های پایدار نمی‌تواند اثرگذاری کامل داشته باشد و شاخص‌هایی مانند تحلیل‌های پیشرفته داده‌های آب شهری و دسترسی پایدار و عادلانه به آب شهری نیز در تمامی ابعاد اثرگذاری و تأثیرپذیری رتبه بالاتری دارند

که اهمیت هم‌افزایی فناوری، داده و عدالت دسترسی را برجسته می‌کند. این یافته‌ها با مطالعات [Hamel و همکاران \(۲۰۲۴\)](#)، [Alshami و همکاران \(۲۰۲۴\)](#) و [Pagano و همکاران \(۲۰۲۵\)](#)، همسو است و نشان می‌دهد که بهره‌گیری از اینترنت اشیاء و داده‌های هوشمند می‌تواند علاوه بر بهینه‌سازی مصرف، پایداری و عدالت شبکه را نیز ارتقاء دهد. طبقه‌بندی شاخص‌ها در پنج ناحیه تحلیلی نشان داد که شاخص‌های دوجبهی و تأثیرگذار نقش هدایت‌کننده سیستم را ایفا می‌کنند، شاخص‌های وابسته و مستقل بازتاب‌دهنده عملکرد عملیاتی و حساسیت سیستم هستند و شاخص‌های تنظیمی مانند امنیت سایبری سامانه‌های آب هوشمند فرآیند تعادل‌بخشی و پایداری سیستم را تضمین می‌کنند. این یافته‌ها با نتایج [Dharmarathne و همکاران، ۲۰۲۵](#) و [نورمند \(۱۴۰۱\)](#)، همخوانی دارد و نشان می‌دهد که شاخص‌های تنظیمی باوجود توجه کمتر در مطالعات پیشین، در مدیریت کلان‌شهری اهمیت ویژه‌ای دارند. تحلیل سناریوهای آینده نیز بیانگر آن است که هماهنگی کامل میان پایش هوشمند، تحلیل داده‌ها، آبیاری هوشمند، هوش مصنوعی و امنیت سایبری مسیر تحقق مدیریت آب شهری هوشمند، مقاوم و پایدار را فراهم می‌کند. در مقایسه با سناریوهای محتاط و رکود، شدت و کیفیت عملکرد شاخص‌ها تعیین‌کننده سطح بهره‌وری، کاهش هدررفت آب و ارتقای عدالت دسترسی است که با یافته‌های [Sheeba و همکاران \(۲۰۲۵\)](#) و [Mondal \(۲۰۲۴\)](#)، همسوست و ضرورت هماهنگی فناوری و مدیریت زیرساخت را تقویت می‌کند.

تحولات اخیر در مدیریت آب شهری نشان می‌دهد بهره‌گیری از اینترنت اشیاء و فناوری‌های هوشمند، ظرفیت قابل توجهی برای بهبود کارایی، پایداری و عدالت در دسترسی به آب در کلان‌شهر تهران ایجاد کرده است. این فناوری‌ها امکان پایش دقیق کیفیت و مصرف آب، تشخیص اتلاف و نشت، و بهینه‌سازی تخصیص منابع را فراهم می‌کنند و می‌توانند تصمیم‌گیری مدیریتی مبتنی بر داده را تقویت کنند. بااین‌حال، محدودیت‌هایی مانند کمبود زیرساخت‌های مدرن، چالش‌های امنیت داده‌ها، عدم هماهنگی سامانه‌ها و نیاز به آموزش نیروی متخصص، مانع بهره‌برداری کامل از پتانسیل فناوری هستند. پژوهش‌های آینده می‌توانند بر توسعه زیرساخت‌های مقاوم، افزایش هماهنگی میان سامانه‌ها، تقویت سیاست‌ها و استانداردهای مدیریت آب و توانمندسازی نیروی انسانی تمرکز کنند. در پایان باتوجه‌به نتایج، پیشنهادهای کاربردی به صورت زیر ارائه شده است:

- راه‌اندازی و گسترش سامانه‌های پایش هوشمند کیفیت و مصرف آب در کلان‌شهر تهران
- ارتقای زیرساخت‌های شبکه آب برای کاهش هدررفت و بهبود بهره‌وری

- networks: Current trends and future research directions. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 13(1), Article 4, 1-41. <https://doi.org/1145/10/3005719>.
- Alshami, A., Ali, E., Elsayed, M., Eltoukhy, A. E. E., & Zayed, T. (2024). IoT innovations in sustainable water and wastewater management and water quality monitoring: A comprehensive review of advancements, implications, and future directions. *IEEE Access*, 12, 58427-58453. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3392573/2024>.
- Amador-Castro, F., González-López, M. E., Lopez-Gonzalez, G., Garcia-Gonzalez, A., Díaz-Torres, O., Carbajal-Espinosa, O., & Gradilla-Hernández, M. S. (2024). Internet of Things and citizen science as alternative water quality monitoring approaches and the importance of effective water quality communication. *Journal of Environmental Management*, 352, 119959. <https://doi.org/1016/10/j.jenvman.119959/2023>.
- Boyle, C., Ryan, G., Bhandari, P., Law, K. M. Y., Gong, J., & Creighton, D. (2022). Digital transformation in water organizations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 148(7), 03122001. [https://doi.org/1061/10/\(ASCE\)WR.1943-0001555/5452](https://doi.org/1061/10/(ASCE)WR.1943-0001555/5452).
- Cerasi, C. C., & Akturk, C. (2023). A bibliometric analysis of smart cities and the internet of things. *Serbian Journal of Electrical Engineering*, 20(1), 49-66. <https://doi.org/2298/10/SJEE2301049C>.
- Chundru, S., Thirunagalingam, A., Maraju, P., Dutta, P. K., Yadav, H., & Whig, P. (2025). Internet of water: Quantifying Internet of Things' impact on urban water management and resource optimization in smart cities. *IET Conference Proceedings*, 2024(37). <https://doi.org/1049/10/icp.0968/2025>.
- Dai, Z., Zhang, Q., Zhu, X., & Zhao, L. (2021). A comparative study of Chinese and foreign research on the internet of things in education: Bibliometric analysis and visualization. *IEEE Access*, 9, 130127-130140. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3113805/2021>.
- تقویت امنیت سایبری و قابلیت تعامل بین سامانه‌های مدیریت آب
- آموزش و توانمندسازی کارشناسان و نیروهای عملیاتی در استفاده از فناوری‌های نوین آب
- تدوین سیاست‌ها و چارچوب‌های راهبردی برای مدیریت پایدار و عادلانه منابع آب
- منابع**
- ایزدی فر، محمدرضا. (۱۴۰۳). کاربرد هوش مصنوعی و اینترنت اشیا در نظارت و مدیریت منابع آب شهری. همایش بین‌المللی مدیریت محیط‌زیست شهری، شیراز. <https://civilica.com/doc/2151651>.
- بشیری، سعید، بیات، بهرام، جمشیدی، شروین، و صالح‌زاده، رضا. (۱۴۰۰). تبیین ابعاد و مولفه‌های تاب‌آوری در مدیریت بحران آب (مورد مطالعه: شهر تهران). *مطالعات بین‌رشته‌ای دانش راهبردی*، ۱۱(۴۴)، ۶۱-۹۶. <https://doi.org/20.1001.1.24234621.1400.11.44.3.2۹۶>.
- کورکی‌نژاد، محمدحسن، شمسی‌پور، علی‌اکبر، و حبیبی، کیومرث. (۱۴۰۲). رویکردی نوین در نگاشت نقشه‌های تحلیلی آب و هوای شهری: مطالعه موردی شهر تهران. *فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۳۲(۱۲۷)، ۷۷-۹۴. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2023.552685.2865>.
- میرزایی، عزت‌الله، جلالی، عبدالله، جودکی، حمیدرضا، و اربابی سبزواری، آزاده. (۱۳۹۸). تحلیل میزان تاب‌آوری شهری در برابر بحران آب: مطالعه موردی شهر تهران. *نشریه علمی شهر ایمن*، ۲(۵)، ۹۳-۱۰۴. https://www.ispdrc.ir/article_705486.htm.
- نورمند، بهرزا. (۱۴۰۱). مروری بر کاربردها و چالش‌های اینترنت اشیا در مهندسی عمران (آب و سازه هیدرولیکی). *نشریه آنالیز سازه - زلزله*، ۱۹(۲)، ۸۹-۹۶. <https://doi.org/30495/10/civil.694268/2022>.
- Adedeji, K. B., Ponnle, A. A., Abu-Mahfouz, A. M., & Kurien, A. M. (2022). Towards digitalization of water supply systems for sustainable smart city development-Water 4.0. *Applied Sciences*, 12(18), 9174. <https://doi.org/10.3390/app12189174>.
- Adeleke, I. A., Nwulu, N. I., & Ogbolumani, O. A. (2023). A hybrid machine learning and embedded IoT-based water quality monitoring system. *Internet of Things*, 22, 100774. <https://doi.org/1016/10/j.iot.100774/2023>.
- Adu-Manu, K. S., Tapparello, C., Heinzelman, W., Katsriku, F. A., & Abdulai, J.-D. (2017). Water quality monitoring using wireless sensor

- [kumarkumaran/436](#).
- Kiyan, A., Gheibi, M., Moezzi, R., & Behzadian, K. (2023). Smart dashboard of water distribution network operation: A case study of Tehran. *Environmental Industry Letters*, 1(1), 46–63. <https://doi.org/15157/10/eil.1/2023.46/1-63>.
- Kulangara Velayudhan, N., Pradeep, P., Rao, S. N., Devidas, A. R., & Ramesh, M. V. (2022). IoT-Enabled Water Distribution Systems–A Comparative Technological Review. *IEEE Access*, 10, 101042–101070. <https://doi.org/1109/10/ACCESS.3208142/2022>.
- Li, W., & Yang, Z. (2024). Landscape design of urban culture transmission based on the regional information security of Internet of Things. *Heliyon*, 10(15), e35042. <https://doi.org/1016/10/j.heliyon.2024.e35042>.
- Mehmood, K., Kautish, P., Rashid, M., Joshi, Y., & Iftikhar, Y. (2025). Digitalization in the circular economy: Synergistic impact of big data analytics, green Internet of Things, and ambidextrous green innovation. *Journal of Cleaner Production*, 509, 145610. <https://doi.org/1016/10/j.jclepro.145610/2025>.
- Mengash, H. A., Mahgoub, H., Alshuhail, A., Darem, A. A., Majdoubi, J., Yafoz, A., Alsini, R., & Alghushairy, O. (2025). Agricultural consumer Internet of Things devices: Methods for optimizing data aggregation. *Alexandria Engineering Journal*, 125, 692–699. <https://doi.org/1016/10/j.aej.03/2025.134>.
- Mohammadi, S., Najafzadeh, M., Gheibi, M., Kian, Z., Takhtavan, A., & Aghlmand, R. (2021). Presenting a conceptual model of leakage management system in urban water supply network from two preventive and operational perspectives (Case study of Tokyo and Tehran metropolises). *Annals of Environmental Science and Toxicology*, 5(1), 051–058. <https://doi.org/17352/10/aest.000037agriscigroup.us+2agriscigroup.us+2>.
- Mondal, P. (2024). AI and IoT in smart water management for urban sustainability. *Uncertainty Discourse and Applications*, 1(2), 151–157. <https://doi.org/10.48313/uda.v1i2.36>.
- Naith, Q. H., & Mancy, H. (2025). An IoT-Enabled Hybrid DRL-XAI Framework for Transparent
- Das, R. (2024). Smart urban water management: Integrating AI and IoT for optimization and waste reduction. *OPT*, 1(2). <https://doi.org/22105/10/opt.v1i62/2>.
- Dharmarathne, G., Abekoon, A. M. S. R., Bogahawaththa, M., Alawatugoda, J., & Meddage, D. P. P. (2025). A review of machine learning and internet-of-things on the water quality assessment: Methods, applications and future trends. *Results in Engineering*, 26, 105182. <https://doi.org/1016/10/j.rineng.105182/2025>.
- Doorn, N. (2021). Artificial intelligence in the water domain: Opportunities for responsible use. *Science of the Total Environment*, 755, 142561. <https://doi.org/1016/10/j.scitotenv.142561/2020>.
- Hamel, P., Ding, N., Cherqui, F., Zhu, Q., Walcker, N., Bertrand-Krajewski, J.-L., Champrasert, P., Fletcher, T. D., McCarthy, D. T., Navratil, O., & Shi, B. (2024). Low-cost monitoring systems for urban water management: Lessons from the field. *Water Research X*, 22, 100212. <https://doi.org/1016/10/j.wroa.100212/2024>.
- He, P., Almasifar, N., Mehbodniya, A., Javaheri, D., & Webber, J. L. (2022). Towards green smart cities using Internet of Things and optimization algorithms: A systematic and bibliometric review. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 36, 100822. <https://doi.org/1016/10/j.suscom.100822/2022>.
- Infant, S. S., Vickram, S., Saravanan, A., Muthu, C. M. M., & Yuarajan, D. (2025). Explainable artificial intelligence for sustainable urban water systems engineering. *Results in Engineering*, 25, 104349. <https://doi.org/1016/10/j.rineng.104349/2025>.
- Jan, F., Min-Allah, N., & Düşteğör, D. (2021). IoT based smart water quality monitoring: Recent techniques, trends and challenges for domestic applications. *Water*, 13(13), 1729. <https://doi.org/3390/10/w13131729>.
- Kalyanam, A. K. (2023). Water management and its industrial impact (A comprehensive overview of water management and the role of IoT). *Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science*, 1(2), 1984–1989. <https://doi.org/51219/10/JAIMLD/ashok->

- 43(2), 126–133.
<https://doi.org/10.14429/djlit.43.2.18710>.
- Ramadhan, A. J. (2020). Smart water-quality monitoring system based on enabled real-time Internet of Things. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(6), 3514–3527.
<https://www.researchgate.net/publication/347443470>.
- Rao, C. K., Sahoo, S. K., & Yanine, F. F. (2025). A comprehensive review of smart energy management systems for photovoltaic power generation utilizing the Internet of Things. *Unconventional Resources*, 7, 100197.
<https://doi.org/10.16/10/j.uncres.100197/2025>.
- Sheeba, R., Alsolai, H., Allafi, R., Nithya, K., Arasi, M. A., Karthikeyan, B., Sudarvizhi, D., & Vivek, S. (2025). A comprehensive IoT and blockchain-integrated framework for autonomous water management in sustainable urban ecosystems. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 47, 101171.
<https://doi.org/10.16/10/j.suscom.101171/2025>.
- Vadruccio, R., Scarpino, C., & Tumino, A. (2025). Unveiling Industrial Internet of Things potential for sustainable manufacturing: A Triple Bottom Line approach. *Procedia Computer Science*, 253, 1083–1092.
<https://doi.org/10.16/10/j.procs.01/2025.170>.
- World Health Organization (WHO). (2022). State of the world's drinking water: An urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all. World Health Organization. Geneva, Switzerland.
- Yuan, Z., Olsson, G., Cardell-Oliver, R., van Schagen, K., Marchi, A., Deletic, A., Urich, C., Rauch, W., Liu, Y., & Jiang, G. (2019). Sweating the assets – The role of instrumentation, control and automation in urban water systems. *Water Research*, 155, 381–402.
<https://doi.org/10.16/10/j.watres.02/2019.034>.
- Zhang, J., Wang, Y., Yang, Y., Ma, Y., & Dai, Z. (2024). Fault diagnosis and intelligent maintenance of Industry 0/4 power system based on Internet of Things technology and thermal energy optimization. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55, 102902.
- Urban Water Management. CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences, 144(1), 387–405.
<https://doi.org/32604/10/cmcs.066917/2025>.
- Nasrinasrabadi, M., Hejazi, M. A., Chaharmahali, E., & Hussein, M. (2025). A comprehensive review of blockchain integration in smart grid with a special focus on Internet of Things. *Energy Conversion and Management: X*, 27, 101196.
<https://doi.org/10.16/10/j.ecmx.101196/2025>.
- Obunga, P. O., Rwanga, S. S., & Dinka, M. O. (2025a). Comparative analysis on deployment of Internet of Things in management of non-revenue water in water distribution networks. *Digital Water: Knowledge Application & Hydroinformatics*, 3(1), 1–30.
<https://doi.org/10.80/10/2025/28375807.2517573>.
- Obunga, P. O., Rwanga, S. S., Dinka, M. O., & Otieno, B. O. (2025b). Review of the emerging technologies in the water sector with a focus on the deployment of Internet of Things solutions. *npj Clean Water*, 8, 53.
<https://doi.org/10.38/10/s41545-025-00487-x>.
- Okoli, N. J., & Kabaso, B. (2024). Building a smart water city: IoT smart water technologies, applications, and future directions. *Water*, 16(4), 557. <https://doi.org/3390/10/w16040557>.
- Pagano, A., Garlisi, D., Tinnirello, I., Giuliano, F., Garbo, G., Falco, M., & Cuomo, F. (2025). A survey on massive Internet of Things for water distribution systems: Challenges, simulation tools, and guidelines for large-scale deployment. *Ad Hoc Networks*, 168, 103714.
<https://doi.org/10.16/10/j.adhoc.103714/2024>.
- Patel, A., Kethavath, A., Kushwaha, N. L., Naorem, A., Jagdale, M., K. R., S., & P. S., R. (2023). Review of artificial intelligence and Internet of Things technologies in land and water management research during 1991–2021: A bibliometric analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123(Part B), 106335.
<https://doi.org/10.16/10/j.engappai.106335/2023>.
- Patil, K. (2023). Integration of internet of things and blockchain technologies in healthcare: A bibliometric and network analysis. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*,

comprehensive global analysis of insights, trends, and research priorities. Discover Internet of Things, 5, 31. <https://doi.org/1007/10/s43926-025-00129-1>.

پی‌نوشت‌ها

- 1- SDG6
- 2- Scopus

<https://doi.org/1016/10/j.tsep.102902/2024>.

Zorzenon, R., Lizarelli, F. L., & Braatz, D. (2025). The impact of the Internet of Things on health and safety performance at work: An empirical study of Brazilian companies. Safety Science, 187, 106866. <https://doi.org/1016/10/j.ssci.106866/2025>.

Zyoud, S. (2025). Exploring the promising role of Internet of Things in urban water systems: A