



رویکردهای نوین مدیریت هوشمند کیفیت آب: مرور تحلیلی کاربرد اینترنت اشیا و هوش مصنوعی

ایمان حاجی راد^{۱*}، پریا پورمحمد^۲، عرفان فضلی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکدهگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه

(i.hajirad@ut.ac.ir)

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده مناطق طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران، رایانامه

(pariapourmohammad.79@gmail.com)

۳- محقق، بخش تحقیقات شناسایی خاک و ارزیابی اراضی، مؤسسه تحقیقات خاک و آب، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، ایران،

رایانامه (erfanfazli@ut.ac.ir)

خلاصه

مدیریت هوشمند کیفیت آب، به عنوان یکی از چالش های اساسی در شبکه های شهری و صنعتی، مستلزم بهره گیری از فناوری های نوین برای پایش، تحلیل و پیش بینی تغییرات پارامترهای کیفی است. این مطالعه با رویکرد مرور تحلیلی، به بررسی فناوری ها و روش های هوشمند به کاررفته در مدیریت کیفیت آب پرداخته و نقش اینترنت اشیا و هوش مصنوعی را در ارتقای دقت، سرعت و کارایی سامانه های پایش و تصمیم گیری مورد تحلیل قرار می دهد. نتایج مرور منابع نشان می دهد که حسگرهای پیشرفته و الگوریتم های مبتنی بر یادگیری ماشین، امکان شناسایی الگوهای پیچیده، پیش بینی تغییرات و واکنش پیشگیرانه به نوسانات کیفیت آب را فراهم می سازند. با این حال، چالش هایی مانند دقت و پایداری حسگرها، پیچیدگی یکپارچه سازی سامانه ها، امنیت داده ها و کمبود نیروی انسانی متخصص، از موانع اصلی پیاده سازی گسترده این فناوری ها به شمار می روند. در مقابل، روندهای نوآورانه همچون توسعه حسگرهای مقاوم و خودکالیبره، الگوریتم های یادگیری عمیق و اتوماسیون فرایندها، فرصت های نوینی را برای بهبود عملکرد، افزایش قابلیت اعتماد و توسعه پایدار شبکه های آب فراهم می کنند. این مرور تحلیلی، تصویری جامع از چشم انداز فناوری های هوشمند در مدیریت کیفیت آب ارائه داده و مسیر تحقیقات آینده در این حوزه را روشن می سازد.

کلمات کلیدی: تحلیل داده های بزرگ، الگوریتم های یادگیری ماشین، پایش بلادرنگ، حسگرهای هوشمند.

۱. مقدمه

آب به عنوان یکی از حیاتی ترین منابع طبیعی، اساس بقا، سلامت و توسعه اقتصادی-اجتماعی جوامع انسانی را تشکیل می دهد و نقشی بنیادین در پایداری اکوسیستم های طبیعی و تحقق توسعه پایدار دارد. با رشد سریع جمعیت جهانی، افزایش تقاضا برای غذا و انرژی، گسترش شهرنشینی و توسعه فعالیت های صنعتی، فشار بر منابع آب شیرین در دهه های اخیر به شدت افزایش یافته است. این شرایط منجر به افت کمی و کیفی منابع آب شده و مدیریت پایدار آن را به یکی از چالش های اصلی قرن بیست و یکم تبدیل کرده است. بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، بیش از ۸۰ درصد پساب های شهری و صنعتی بدون تصفیه کافی به محیط زیست تخلیه می شوند و نزدیک به دو میلیارد نفر از مردم جهان به منابع آبی آلوده دسترسی دارند.



چنین وضعیتی، ضرورت توجه جدی به مدیریت کارآمد و هوشمند کیفیت آب را بیش از پیش نمایان می‌سازد [۱۰]. آلودگی‌های شیمیایی، میکروبی و فیزیکی ناشی از فعالیت‌های انسانی، در کنار تغییرات اقلیمی و رخدادهای پیش‌بینی‌ناپذیر طبیعی، کیفیت منابع آبی را به‌طور چشمگیری تهدید می‌کنند. پیامدهای این پدیده نه‌تنها شامل گسترش بیماری‌های منتقله از آب و تهدید سلامت عمومی است، بلکه تخریب اکوسیستم‌های آبی، کاهش تنوع زیستی و افت بهره‌وری کشاورزی و صنعتی را نیز به همراه دارد. بنابراین، پایش مستمر و مدیریت پویای کیفیت آب در شبکه‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به ضرورتی راهبردی و حیاتی بدل شده است [۲۴].

روش‌های سنتی پایش کیفیت آب که عمدتاً بر نمونه‌برداری‌های دوره‌ای و آزمایش‌های آزمایشگاهی تکیه دارند، به دلیل زمان‌بر بودن، هزینه بالا و فقدان توانایی در ارائه داده‌های بلادرنگ، پاسخگوی نیازهای پیچیده و پویای امروز نیستند. این روش‌ها پوشش مکانی و زمانی محدودی دارند و در مواجهه با تغییرات ناگهانی کیفیت آب، امکان تصمیم‌گیری سریع را فراهم نمی‌کنند. از این‌رو، گذار از الگوهای سنتی به سمت رویکردهای نوین و هوشمند برای پایش، تحلیل و مدیریت کیفیت آب، امری اجتناب‌ناپذیر است [۲۳]. در دهه‌های اخیر، پیشرفت سریع فناوری‌های دیجیتال، به‌ویژه در حوزه‌های اینترنت اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI) و تحلیل کلان‌داده‌ها، افق‌های تازه‌ای در زمینه‌ی مدیریت هوشمند کیفیت آب گشوده است. حسگرهای هوشمند متصل به شبکه‌های IoT، امکان جمع‌آوری مداوم و بلادرنگ داده‌ها از نقاط مختلف شبکه‌های آبی را فراهم می‌کنند. این داده‌ها می‌توانند شامل دما، pH، کدورت، رسانایی، اکسیژن محلول و سایر پارامترهای کلیدی کیفیت آب باشند. در ادامه، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و مدل‌های هوش مصنوعی با تحلیل این داده‌ها قادرند الگوهای پنهان را شناسایی کرده، ناهنجاری‌ها را به‌صورت خودکار تشخیص دهند و تغییرات احتمالی کیفیت آب را پیش‌بینی کنند. چنین سامانه‌هایی با فراهم کردن امکان پایش بلادرنگ، واکنش سریع، و تصمیم‌گیری داده‌محور، نقش مهمی در کاهش خطرات زیست‌محیطی و ارتقای کارایی سیستم‌های مدیریت منابع آب ایفا می‌کنند [۱۱]. کاربرد فناوری‌های هوشمند در مدیریت کیفیت آب، تنها محدود به پایش نیست، بلکه شامل پیش‌بینی کیفیت، شناسایی منابع آلاینده، بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها، و حتی طراحی سامانه‌های هشدار سریع نیز می‌شود. افزون بر این، ترکیب AI و IoT می‌تواند به ایجاد شبکه‌های هوشمند آب منجر شود که با استفاده از داده‌های بلادرنگ، به تصمیم‌گیری خودکار و پیش‌نگرانه در سطح شبکه کمک می‌کنند. این تحولات، با هم‌افزایی فناوری‌های دیجیتال، زمینه‌ساز گذار از مدیریت واکنشی به مدیریت پیش‌نگر و سازگار در حوزه کیفیت آب هستند. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، بهره‌گیری مؤثر از این فناوری‌ها با چالش‌هایی نظیر هزینه بالای استقرار حسگرها، یکپارچه‌سازی داده‌ها، امنیت سایبری، و نیاز به استانداردسازی پروتکل‌های ارتباطی روبه‌رو است. از این‌رو، انجام مرورهای تحلیلی برای شناسایی روندها، شکاف‌ها و چالش‌های پژوهشی در این حوزه ضروری است. بر این اساس، هدف این مقاله ارائه‌ی یک مرور جامع و تحلیلی از رویکردهای نوین مدیریت هوشمند کیفیت آب با تمرکز بر کاربرد اینترنت اشیا و هوش مصنوعی است. این مقاله ضمن بررسی مفاهیم، فناوری‌ها و چارچوب‌های موجود، به تحلیل مزایا، محدودیت‌ها و فرصت‌های توسعه آینده نیز می‌پردازد.

۲- روش تحقیق

۲-۱- فناوری‌های پایش کیفیت آب^۱

پایش کیفیت آب یکی از ارکان اساسی مدیریت منابع آب است و نقش حیاتی در حفظ سلامت انسان، توسعه صنعتی و پایداری محیط زیست دارد. افزایش پیچیدگی شبکه‌های توزیع آب، رشد جمعیت شهری و فشارهای ناشی از فعالیت‌های صنعتی باعث شده است که روش‌های سنتی پایش کیفیت آب که عمدتاً بر نمونه‌گیری دوره‌ای و آزمایشگاهی مبتنی هستند، دیگر پاسخگوی نیازهای روزافزون نباشند [۲۶]. این روش‌ها با محدودیت‌هایی مانند تأخیر زمانی در دریافت نتایج، عدم

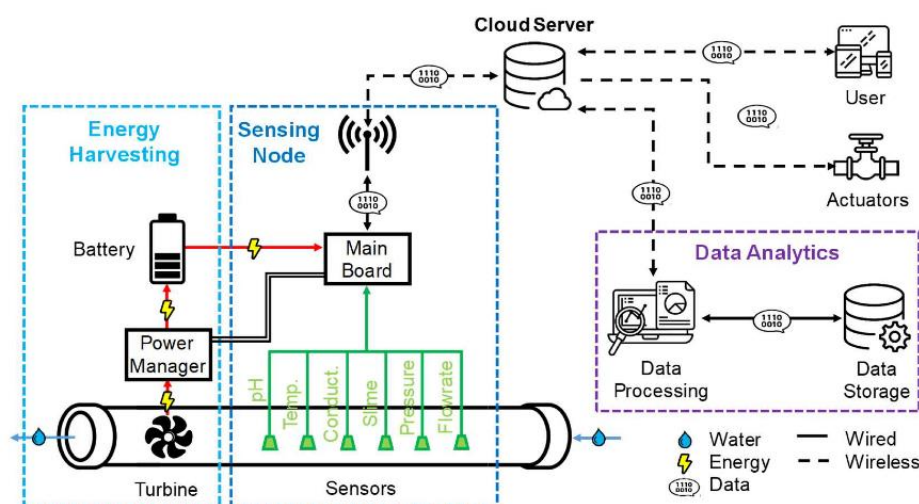
^۱ Water Quality Monitoring Technologies



توانایی پوشش گسترده و محدودیت در شناسایی تغییرات ناگهانی مواجه‌اند. در نتیجه، توسعه فناوری‌های نوین پایش کیفیت آب به یک نیاز استراتژیک تبدیل شده است [۱۸].

۱- حسگرهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی

حسگرهای ابزارهای اساسی در پایش کیفیت آب هستند و قادرند پارامترهای متنوعی را در زمان واقعی اندازه‌گیری کنند. حسگرهای شیمیایی معمولاً برای شناسایی آلاینده‌هایی مانند فلزات سنگین، ترکیبات آلی و pH به کار می‌روند. حسگرهای فیزیکی پارامترهایی مانند دما، کدورت و هدایت الکتریکی آب را اندازه‌گیری می‌کنند، در حالی که حسگرهای بیولوژیکی می‌توانند وجود میکروارگانیسم‌ها و شاخص‌های زیستی را پایش کنند. این حسگرها، به ویژه در حالت متصل به شبکه‌های IoT، می‌توانند داده‌ها را بلادرنگ به سامانه‌های مرکزی منتقل کنند و امکان واکنش سریع به تغییرات کیفیت آب را فراهم نمایند. همچنین، برخی حسگرهای پیشرفته قابلیت خودکالیبراسیون و خودتشخیص خطا دارند که دقت پایش را افزایش می‌دهد [۱۴، ۱۵].



شکل ۱- ساختار سامانه‌ای که حسگرهای اندازه‌گیرنده کیفیت آب را از طریق ارتباط رادیویی به سرور

ابری متصل می‌کند تا داده‌ها را تحلیل و کنترل کند [۱۶]

۲- فناوری‌های مبتنی بر اینترنت اشیا

شبکه‌های IoT در مدیریت کیفیت آب، امکان اتصال و هماهنگی تعداد زیادی حسگر پراکنده را فراهم می‌کنند. داده‌های جمع‌آوری‌شده از این شبکه‌ها به سامانه‌های ابری یا سرورهای مرکزی منتقل می‌شوند تا تحلیل‌های بلادرنگ و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی انجام شود. کاربرد IoT در پایش کیفیت آب دارای مزایای زیر است [۲۹، ۱۹].

- نظارت مستمر و بلادرنگ: امکان شناسایی فوری آلاینده‌ها و تغییرات کیفیت آب.
- پیش‌بینی و تحلیل روندها: با استفاده از داده‌های بلندمدت می‌توان الگوهای تغییر کیفیت آب را شناسایی کرد.
- هشداردهی خودکار: سیستم‌های IoT قادرند در صورت عبور پارامترها از حد مجاز، به مدیران و مسئولان شبکه هشدار دهند.

با این حال، چالش‌هایی مانند امنیت داده‌ها، هزینه نصب و نگهداری حسگرها و نیاز به استانداردسازی پروتکل‌ها هنوز در پیاده‌سازی کامل این فناوری‌ها وجود دارد.



۳. پایش از راه دور و سنجش از راه دور

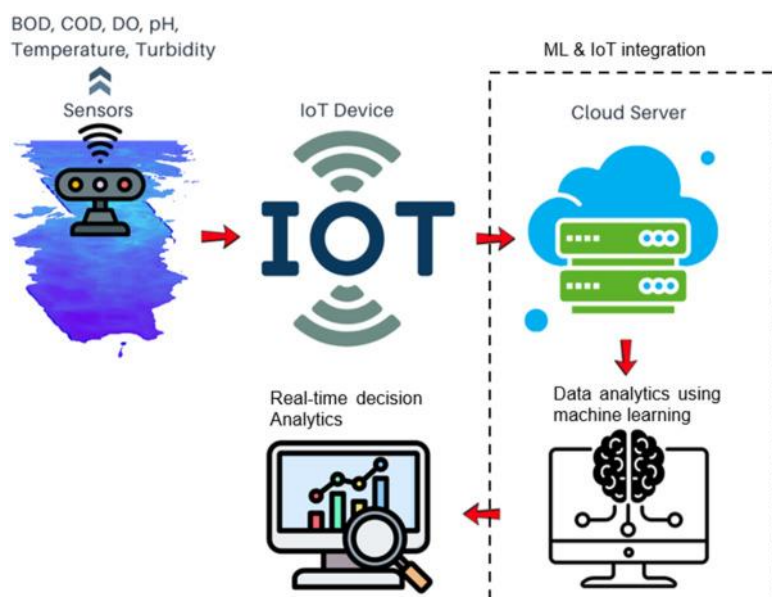
فناوری‌های سنجش از راه دور شامل تصاویر ماهواره‌ای، هواپیماهای بدون سرنشین (پهپاد) و سنسورهای لیزری یا نوری هستند و به خصوص برای پایش منابع گسترده و دشوار مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و مخازن بزرگ آب کاربرد دارند. این فناوری‌ها قادرند پارامترهایی نظیر دما، کدورت، کلروفیل و ذرات معلق را ارزیابی کنند و در مواردی که دسترسی مستقیم به شبکه آب محدود است، جایگزین مناسبی برای پایش سنتی ارائه دهند. مزیت مهم این روش، پوشش وسیع و کاهش نیاز به حضور میدانی مکرر است، اما محدودیت‌هایی مانند هزینه بالای تجهیزات و نیاز به پردازش پیچیده داده‌ها نیز وجود دارد [۱۲، ۲۰].

۴- رویکردهای نوین در مدیریت هوشمند کیفیت آب

پیشرفت‌های چشمگیر در علوم داده، اینترنت اشیا، و هوش مصنوعی موجب تحول عمیقی در نحوه مدیریت و پایش کیفیت آب در شبکه‌های شهری و صنعتی شده است. این تحول، با گذر از رویکردهای سنتی مبتنی بر نمونه‌برداری و تحلیل آزمایشگاهی، به سوی سامانه‌های هوشمند، بلادرنگ و پیش‌بینانه حرکت کرده است. در این راستا، رویکردهای نوین مدیریت هوشمند کیفیت آب با بهره‌گیری از ترکیب فناوری‌های پیشرفته، از جمله یادگیری ماشین، تحلیل کلان‌داده، مدل‌های دوقلوی دیجیتال، و سامانه‌های تصمیم‌یار، امکان پایش گسترده، تحلیل بلادرنگ و واکنش سریع به تغییرات کیفیت آب را فراهم می‌سازند.

۱- یادگیری ماشین و یادگیری عمیق

الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تحلیل داده‌های حجیم و چندبعدی حاصل از شبکه‌های حسگر هوشمند، قادرند الگوهای پنهان و روابط غیرخطی میان متغیرهای کیفیت آب از جمله دما، pH، اکسیژن محلول و غلظت آلاینده‌ها را شناسایی کنند. مدل‌های یادگیری عمیق مانند شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN) و بازگشتی (RNN) توانایی بالایی در تشخیص روندهای پیچیده و پیش‌بینی دقیق تغییرات کوتاه‌مدت و بلندمدت دارند. این قابلیت‌ها امکان تصمیم‌گیری پیشگیرانه، کاهش زمان واکنش به رویدادهای آلودگی و بهینه‌سازی عملکرد تصفیه‌خانه‌ها و شبکه‌های توزیع را فراهم می‌سازد. به کارگیری چنین الگوریتم‌هایی موجب افزایش دقت در تشخیص ناهنجاری‌ها و کاهش ریسک خطاهای انسانی در فرآیندهای کنترل کیفیت آب می‌شود [۲۸].



شکل ۲- استفاده از اینترنت اشیا و یادگیری ماشین برای ارزیابی کیفیت آب [۸]

۲. تحلیل کلان داده^۱

در شبکه‌های گسترده مبتنی بر اینترنت اشیا، حجم عظیمی از داده‌های بلادرنگ از هزاران حسگر جمع‌آوری می‌شود. تحلیل کلان‌داده با استفاده از زیرساخت‌های پردازشی پیشرفته، این داده‌های حجیم، متنوع و ناهمگون را یکپارچه‌سازی کرده و شاخص‌های کلیدی کیفیت آب را استخراج می‌کند. این تحلیل‌ها به مدیران امکان می‌دهد تا رفتار دینامیکی شبکه‌های آبی را در مقیاس‌های مختلف بررسی کرده، الگوهای مکانی و زمانی تغییرات کیفیت را شناسایی و سیاست‌های مدیریتی مبتنی بر داده طراحی کنند. علاوه بر این، تلفیق کلان‌داده با مدل‌های پیش‌بینی‌کننده هوش مصنوعی، زمینه توسعه سیستم‌های پایش تطبیقی و هشداردهی سریع را فراهم می‌سازد [۲].

۳. مدل‌های دوقلوی دیجیتال^۲

مدل‌های دوقلوی دیجیتال با ایجاد بازنمایی مجازی از سامانه‌های واقعی آب، امکان شبیه‌سازی، پایش و ارزیابی بلادرنگ عملکرد شبکه‌ها را فراهم می‌آورند. این مدل‌ها، که بر پایه داده‌های بلادرنگ و الگوریتم‌های هوشمند بنا شده‌اند، قادرند تأثیر تغییرات پارامترهای کیفیت، اختلال حسگرها و سناریوهای مختلف آلودگی را پیش‌بینی کرده و بهترین راهکار مدیریتی را پیشنهاد دهند. دوقلوی دیجیتال به عنوان حلقه اتصال میان داده‌های میدانی، تحلیل‌های هوش مصنوعی و تصمیم‌گیری مدیریتی عمل کرده و بستر مناسبی برای آزمون سیاست‌های مختلف بدون ایجاد اختلال در سیستم واقعی فراهم می‌کند [۱۳].

۴. مدل‌های پیش‌بینی‌کننده و تصمیم‌یار^۳

این مدل‌ها ترکیبی از داده‌های بلادرنگ، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و روش‌های بهینه‌سازی هستند که برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی طراحی شده‌اند. در شرایط بحرانی مانند نشت مواد شیمیایی، افت ناگهانی اکسیژن محلول یا

^۱ Big data

^۲ Digital Twin Models

^۳ Predictive and Decision-Support Models



تغییرات غیرعادی pH، این سیستم‌ها می‌توانند هشدارهای خودکار صادر کرده و پیشنهادهای اصلاحی و کنترلی ارائه دهند. هدف این مدل‌ها، ارتقای سرعت واکنش، کاهش ریسک آلودگی و بهینه‌سازی عملکرد شبکه‌های آب است [۲۱].

۵. سامانه‌های ترکیبی و هوشمند^۱

سامانه‌های ترکیبی با ادغام فناوری‌های مختلف از جمله حسگرهای پیشرفته، شبکه‌های IoT و الگوریتم‌های پردازش و تحلیل داده، امکان مدیریت جامع و هوشمند کیفیت آب را فراهم می‌کنند. این سامانه‌ها قادرند به‌طور همزمان چندین پارامتر را پایش کرده، تغییرات کیفیت را پیش‌بینی و تصمیمات مدیریتی بهینه اتخاذ کنند. شبکه‌های IoT با ایجاد اتصال میان حسگرهای پراکنده، داده‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی را به‌صورت بلادرنگ به مراکز تحلیل منتقل می‌کنند و هوش مصنوعی با تحلیل این داده‌ها، امکان شناسایی سریع ناهنجاری‌ها و صدور هشدارهای خودکار را فراهم می‌سازد. ترکیب این فناوری‌ها منجر به کاهش هدررفت منابع، افزایش کارایی تصفیه‌خانه‌ها، ارتقای سلامت عمومی و ایجاد شبکه‌های آب پایدار و خودتنظیم می‌شود. سیستم‌های هشداردهنده خودکار، به‌عنوان یکی از نتایج این تلفیق فناوریانه، تغییرات ناگهانی کیفیت آب را تشخیص داده و اقدامات لازم را به‌صورت خودکار آغاز می‌کنند و با کاهش فاصله میان تحلیل داده و تصمیم‌گیری عملی، پیوستگی و پایداری عملکرد شبکه‌های آب را تضمین می‌کنند [۳]. جدول (۱)، مروری بر پژوهش‌های اخیر در زمینه مدیریت و پیش‌بینی هوشمند کیفیت آب را نشان می‌دهد. مرور مطالعات انجام‌شده بیانگر آن است که الگوریتم‌های یادگیری عمیق، مدل‌های ترکیبی و سامانه‌های مبتنی بر IoT، دقت بالا، واکنش بلادرنگ و تصمیم‌گیری بهینه را در پایش کیفیت آب فراهم کرده‌اند. به‌ویژه، مدل‌های ترکیبی مانند موجک-هوش مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری بازنمایی، عملکرد برجسته‌ای در محیط‌های کم‌داده و شبکه‌های پیچیده ارائه داده‌اند. همچنین، پژوهش‌ها بر اهمیت یکپارچگی فناوری‌های دیجیتال با نظام‌های حکمرانی آب و تحقق اهداف توسعه پایدار تأکید دارند. نتایج مرور شده در این جدول، روند رو به رشد توسعه سامانه‌های پیش‌بینی‌کننده هوشمند، خودکار و پایدار را نشان می‌دهد که می‌توانند نقش کلیدی در ارتقای کیفیت و امنیت منابع آب ایفا کنند.

جدول ۱- مروری بر رویکردهای نوین مدیریت هوشمند کیفیت آب

شماره	رویکرد	منابع	نتایج
۱	پیش‌بینی کیفیت آب سطحی با استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری عمیق در شرایط کم‌داده	[۳۰]	مدل دقت پیش‌بینی بالایی را در تمام ایستگاه‌ها نشان داد (میانگین کارایی نش-ساتکلیف ۰/۸)، و در پیش‌بینی چندشاخصی عملکرد بهتری داشت؛ عملکرد مدل حتی با نصف داده‌ها نیز عالی ماند که ناشی از مرحله پیش‌آموزش با یادگیری بازنمایی است؛ مدل پتانسیل بالایی برای پیش‌بینی میان‌حوضه‌ای کیفیت آب دارد و می‌تواند به توسعه مدیریت سامانه‌های محیط‌زیست آبی کمک کند.
۲	پیش‌بینی کیفیت آب با استفاده از یادگیری ماشین	[۲۵]	شناسایی روندهای پژوهشی نوین در الگوریتم‌های یادگیری ماشین؛ بررسی کاربرد الگوریتم‌ها در پیش‌بینی کیفیت آب؛ تعیین چالش‌های اصلی شامل همبستگی مدل‌های هیدرودینامیکی و کیفیت آب، بهبود گردآوری داده‌ها، و کاهش عدم قطعیت مدل؛ ارائه چشم‌اندازی جامع از

^۱ Hybrid and Intelligent Systems



فناوری‌های نوظهور در این حوزه		
مدیریت هوشمند آب (Smart Water) ۳ راستای اهداف توسعه پایدار	[۵]	تأکید بر ضرورت تلفیق نوآوری‌های فناورانه با ابعاد نهادی و مدیریتی برای تحقق مدیریت هوشمند آب؛ ارائه بینش‌هایی درباره چالش‌ها و فرصت‌های ناشی از ادغام فناوری‌های دیجیتال، هوش مصنوعی و حکمرانی در مدیریت پایدار منابع آب
پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه با استفاده از ۴ مدل ترکیبی تجزیه سیگنال و یادگیری عمیق	[۹]	مدل ترکیبی پیشنهادی عملکرد بهتری در تعمیم‌پذیری و دقت پیش‌بینی نشان داد؛ در داده‌های کیفیت آب مربوط به مقاطع Xinlian رودخانه Fuhe و Chucha رودخانه Ganjiang اعتبارسنجی شد و دقت بالاتری نسبت به مدل‌های منفرد و ترکیبی معمول داشت؛ این مدل توانایی پیش‌بینی دقیق کیفیت آب را در سامانه‌های پیچیده آبی نشان داد.
پایش و کنترل بلادرنگ ۵ کیفیت آب با استفاده از اینترنت اشیا	[۷]	سامانه طراحی شده توانست پایش و کنترل دقیق پارامترهای کیفیت آب را در زمان واقعی فراهم کند؛ نتایج شبیه‌سازی و نمونه واقعی نشان دادند که استفاده از IoT موجب ارتقای چشمگیر در دقت، سرعت واکنش و خودکارسازی فرایند کنترل کیفیت آب می‌شود؛ این روش گامی مؤثر در تحقق هدف ششم توسعه پایدار سازمان ملل (آب سالم و بهداشت برای همه) است.
سامانه هوشمند پایش ۶ آلودگی آب مبتنی بر اینترنت اشیا	[۱۷]	سامانه پیشنهادی توانست پارامترهای کیفیت آب را به‌صورت پیوسته و بلادرنگ پایش کند؛ انتقال داده‌ها به فضای ابری امکان نظارت از راه دور و تصمیم‌گیری سریع را فراهم ساخت؛ نتایج نشان داد این سامانه از نظر هزینه و کارایی در پایش هوشمند آلودگی آب بسیار مؤثر است و می‌تواند به کاهش خطرات ناشی از آلودگی آب و حفاظت از سلامت انسان و اکوسیستم کمک کند.
پیش‌بینی ماهانه شوری آب رودخانه آجی‌چای (شمال غرب ایران) با ۷ استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و ترکیبی موجک-هوش مصنوعی	[۴]	مدل ANFIS عملکرد بهتری نسبت به ANN داشت؛ مدل‌های ترکیبی موجک-ANFIS و موجک-ANN بهترین نتایج را ارائه دادند. استفاده از موجک db4 باعث بهبود چشمگیر دقت پیش‌بینی شد؛ مدل موجک-ANFIS به‌عنوان کاراترین مدل در پیش‌بینی شوری ماهانه رودخانه معرفی شد.

۵. چالش‌ها و روندهای آینده در مدیریت هوشمند کیفیت آب

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در حوزه مدیریت هوشمند کیفیت آب و توسعه فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی



و اینترنت اشیا، پیاده سازی کامل و مؤثر این سامانه ها همچنان با چالش ها و محدودیت هایی مواجه است. شناسایی و رفع این چالش ها برای دستیابی به بهره برداری پایدار و بهینه از منابع آب، ضروری است. یکی از مهم ترین چالش های فنی، دقت و قابلیت اعتماد حسگرهاست. حسگرهای مورد استفاده در شبکه های IoT ممکن است تحت تأثیر شرایط محیطی، رسوب گذاری، تغییر دما یا کالیبراسیون نامناسب قرار گیرند و کیفیت داده های جمع آوری شده را کاهش دهند. بنابراین، توسعه حسگرهای مقاوم، خودکالبره و با قابلیت تشخیص خطا، به عنوان یکی از نیازهای اساسی سیستم های هوشمند مطرح است. علاوه بر این، یکپارچه سازی سیستم ها نیز یکی از چالش های کلیدی به شمار می رود؛ ترکیب شبکه های حسگر، سامانه های ابری و الگوریتم های هوش مصنوعی نیازمند پلتفرم های هماهنگ و استاندارد شده است تا داده ها به صورت مؤثر جمع آوری، پردازش و تحلیل شوند و تصمیمات مدیریتی به موقع اتخاذ شوند [۳۱]. حجم بالای داده های تولید شده توسط شبکه های IoT، نیازمند سیستم های پردازش سریع و پیشرفته است تا اطلاعات بلادرنگ قابل استفاده و قابل اتکا باشند. الگوریتم های هوش مصنوعی باید توانایی تحلیل داده های حجیم و متنوع، شناسایی الگوهای پیچیده و ارائه پیش بینی های دقیق را داشته باشند. در این میان، امنیت و حریم خصوصی داده ها نیز به عنوان یک نگرانی جدی مطرح است؛ داده های شبکه های آب حساس و حیاتی هستند و حفاظت از آنها در برابر دسترسی غیرمجاز و تهدیدات سایبری، اهمیت ویژه ای دارد. علاوه بر چالش های فنی، محدودیت های اقتصادی و مدیریتی نیز می تواند مانع بهره برداری کامل از فناوری های هوشمند شود. هزینه نصب و نگهداری حسگرها، سامانه های IoT و نرم افزارهای هوش مصنوعی بالا است و نیازمند سرمایه گذاری مستمر و منابع مالی پایدار می باشد. همچنین بهره برداری مؤثر از این فناوری ها نیازمند نیروی انسانی متخصص در حوزه های مهندسی آب، داده کاوی و هوش مصنوعی است و فقدان کارشناسان ماهر می تواند مانع توسعه این سیستم ها شود. پذیرش فناوری و آموزش کاربران نیز از دیگر مؤلفه های حیاتی است؛ مدیران شبکه های آب و کارکنان عملیاتی باید با فناوری های نوین آشنا شده و توانایی بهره برداری مؤثر از آنها را داشته باشند تا ارزش واقعی سیستم های هوشمند محقق شود [۲۲]. با وجود این محدودیت ها، روندهای نوآورانه و فرصت های توسعه آینده نویدبخش هستند. توسعه حسگرهای پیشرفته، مقاوم و خودکالبره که قادر به شناسایی گستره وسیعی از آلاینده ها و پارامترهای فیزیکی و بیولوژیکی آب هستند، می تواند دقت و کارایی پایش کیفیت آب را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. پیشرفت الگوریتم های هوش مصنوعی، به ویژه شبکه های عصبی عمیق و مدل های تحلیل داده های چندمنظوره، امکان پیش بینی دقیق تر و شناسایی الگوهای پیچیده تغییر کیفیت آب را فراهم می کند و به مدیران شبکه ها امکان می دهد تا اقدامات پیشگیرانه بهینه را طراحی کنند. یکپارچه سازی داده ها و سامانه ها، به عنوان روند مهم آینده، زمینه مدیریت جامع، پیش بینانه و خودکار شبکه های آب را فراهم می آورد. این امر می تواند شامل اتوماسیون فرآیندهای تصفیه، توزیع و هشداردهی باشد، به گونه ای که سیستم قادر به واکنش سریع و خودکار نسبت به تغییرات کیفیت آب باشد [۱۱]. همچنین، توسعه استانداردهای بین المللی برای تبادل داده ها و بهره گیری از تجربیات موفق جهانی، می تواند افق همکاری های بین المللی و بهبود عملکرد شبکه ها را هموار سازد و امکان ارتقای سطح مدیریت هوشمند کیفیت آب را در مقیاس جهانی فراهم کند. بدین ترتیب می توان بیان داشت که، با وجود محدودیت های فنی، اقتصادی و مدیریتی، فناوری های هوشمند در مدیریت کیفیت آب فرصت های گسترده ای برای افزایش دقت، کارایی و قابلیت پیش بینی سیستم ها فراهم می کنند. مرور این چالش ها و روندهای نوآورانه، مسیر تحقیقات آینده را روشن ساخته و می تواند راهنمای ارزشمندی برای پژوهشگران، سیاست گذاران و مدیران شبکه های آب در راستای توسعه پایدار و هوشمند منابع آب باشد. این رویکرد نه تنها به بهبود بهره وری و کاهش ریسک های زیست محیطی کمک می کند، بلکه امکان توسعه علمی و عملی سیستم های مدیریت هوشمند کیفیت آب را در سطح شهری و صنعتی فراهم می سازد.

۳- نتایج و بحث

تحولات اخیر در حوزه مدیریت کیفیت آب نشان می دهد که تلفیق فناوری های نوین پایش با هوش مصنوعی و اینترنت



اشیا توانسته است مرزهای روش‌های سنتی مدیریت آب را به‌طور چشمگیری گسترش دهد. در گذشته، سامانه‌های پایش کیفیت آب عمدتاً بر نمونه‌گیری‌های دوره‌ای و آزمایش‌های میدانی تکیه داشتند که با وجود دقت بالا، از نظر زمانی و مکانی محدود بودند. در مقابل، استفاده از حسگرهای شیمیایی، فیزیکی و زیستی متصل به شبکه‌های IoT، امکان جمع‌آوری داده‌های بلادرنگ، پایش گسترده و شناسایی سریع تغییرات پارامترهای کلیدی کیفیت آب مانند دما، pH، هدایت الکتریکی و غلظت آلاینده‌ها را فراهم کرده است. این تحول باعث شده که مدیریت کیفیت آب از یک فرایند واکنشی و پس‌ازوقوع، به فرایندی پیشگیرانه، پویا و تصمیم‌محور تبدیل شود.

ادغام هوش مصنوعی با زیرساخت‌های اینترنت اشیا، ظرفیت پیش‌بینی‌پذیری و تحلیل عمیق‌تری به سیستم‌های مدیریت آب افزوده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی مصنوعی قادرند الگوهای پیچیده، همبستگی‌های غیرخطی و رفتارهای زمانی پارامترهای کیفیت آب را استخراج کرده و تغییرات آینده را با دقت بالا پیش‌بینی کنند. این قابلیت نه تنها واکنش در برابر آلودگی‌ها را کاهش می‌دهد، بلکه به مدیران شبکه‌های شهری و صنعتی امکان می‌دهد تصمیم‌های مدیریتی را بر مبنای تحلیل داده‌های پیش‌بینی‌شده اتخاذ کنند، نه صرفاً داده‌های تاریخی. بررسی‌های اخیر نیز نشان داده‌اند که سامانه‌های ترکیبی AI-IoT می‌توانند دقت پیش‌بینی پارامترهایی نظیر اکسیژن محلول، نیتрат و فلزات سنگین را تا ۳۰٪ بهبود دهند [۲۹]. با وجود این پیشرفت‌ها، پیاده‌سازی کامل این فناوری‌ها با چالش‌های قابل توجهی مواجه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها مربوط به دقت و پایداری حسگرها در شرایط محیطی متغیر است. عواملی مانند نوسانات دما، رسوب‌گذاری، خوردگی و خطاهای کالیبراسیون می‌توانند کیفیت داده‌ها را کاهش دهند. در نتیجه، توسعه حسگرهای خودکالبره و مقاوم به تغییرات محیطی یکی از نیازهای حیاتی آینده است. همچنین، چالش یکپارچه‌سازی زیرسامانه‌ها—از حسگر تا پردازش ابری و تحلیل هوشمند همچنان مانع گسترش سامانه‌های هوشمند در مقیاس ملی و منطقه‌ای است. نبود استانداردهای تبادل داده و پروتکل‌های مشترک میان تولیدکنندگان تجهیزات نیز باعث ایجاد ناسازگاری میان اجزای مختلف سیستم‌ها شده است [۱]. چالش دیگر، مربوط به امنیت و محرمانگی داده‌هاست. داده‌های جمع‌آوری‌شده از شبکه‌های آب، اطلاعات حیاتی درباره سلامت عمومی و زیرساخت‌های شهری را شامل می‌شوند؛ از این‌رو، حفاظت از آنها در برابر حملات سایبری و دسترسی غیرمجاز اهمیت حیاتی دارد. در مطالعات اخیر تأکید شده است که سامانه‌های مبتنی بر IoT بدون به‌کارگیری پروتکل‌های رمزنگاری و لایه‌های امنیتی چندسطحی، در معرض خطرات نفوذ قرار دارند [۱۶]. از منظر مدیریتی و اقتصادی نیز موانعی وجود دارد. هزینه بالای نصب، نگهداری و به‌روزرسانی حسگرها و نرم‌افزارهای تحلیلی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، مانع اصلی اجرای این فناوری‌ها در مقیاس وسیع است. همچنین کمبود نیروی انسانی متخصص در حوزه‌های میان‌رشته‌ای مانند مهندسی آب، علوم داده و هوش مصنوعی، مانع بهره‌برداری کامل از ظرفیت‌های موجود می‌شود. در کنار آن، پذیرش فناوری در سازمان‌های آب و آشنایی ناکافی مدیران با ابزارهای نوین، از جمله عوامل انسانی است که باید از طریق آموزش، ظرفیت‌سازی و تدوین سیاست‌های حمایتی برطرف شود. در مجموع، مرور تحلیلی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که مدیریت هوشمند کیفیت آب دیگر یک گزینه فناورانه نیست، بلکه ضرورتی برای دستیابی به حکمرانی پایدار و داده‌محور در حوزه منابع آب است. این رویکرد، با تکیه بر تحلیل داده‌های بلادرنگ، پیش‌بینی‌های دقیق و تصمیم‌گیری خودکار، می‌تواند کارایی، دقت و پایداری شبکه‌های آبی را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. بنابراین، آینده مدیریت کیفیت آب در گرو همگرایی علم، فناوری و سیاست‌گذاری هوشمند است؛ جایی که داده به‌عنوان منبع اصلی تصمیم‌سازی، جایگزین روش‌های سنتی و مبتنی بر واکنش خواهد شد.

۴- جمع‌بندی

مدیریت هوشمند کیفیت آب با تلفیق فناوری‌های نوین پایش، اینترنت اشیا و هوش مصنوعی افق تازه‌ای در ارتقای بهره‌وری، ایمنی و پایداری شبکه‌های آبی شهری و صنعتی گشوده است. مرور تحلیلی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که استفاده



از حسگرهای چندپارامتری و شبکه‌های مبتنی بر IoT، امکان جمع‌آوری و پایش بلادرنگ داده‌های کیفیت آب را فراهم ساخته است؛ در حالی که تحلیل این داده‌ها از طریق الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی، قابلیت پیش‌بینی تغییرات و تشخیص الگوهای پیچیده را به صورت مؤثر افزایش داده است. این ترکیب فناوریانه، زمینه تصمیم‌گیری پیشگیرانه، واکنش سریع به بحران‌های آلودگی و بهینه‌سازی عملیات مدیریت منابع آب را فراهم می‌کند و از این رو، ارزش علمی و کاربردی قابل توجهی دارد. با وجود پیشرفت‌های چشمگیر، موانعی همچون محدودیت دقت و پایداری حسگرها، چالش‌های امنیت داده، نبود استانداردهای یکپارچه و نیاز به نیروهای متخصص، همچنان از عوامل بازدارنده توسعه این فناوری‌ها به شمار می‌آیند. رفع این موانع مستلزم تلاش هم‌زمان در سطوح فنی، مدیریتی و نهادی از جمله طراحی حسگرهای مقاوم‌تر، ایجاد بسترهای امن انتقال داده، تدوین استانداردهای ارتباطی بین‌المللی و آموزش نیروهای انسانی برای بهره‌گیری مؤثر از سامانه‌های هوشمند است.

۵- مراجع

1. Ahn, J. Y., Hwang, I., Park, N., & Park, S. H. (2021). Laboratory and field study on changes in water quality and increase in dissolved iron during riverbank filtration. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(36), 50142-50152.
2. Alshami, A., Ali, E., Elsayed, M., Eltoukhy, A. 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.
3. Alshami, A., Elsayed, M., Ali, E., Eltoukhy, A. E., & Zayed, T. (2023). Harnessing the power of ChatGPT for automating systematic review process: methodology, case study, limitations, and future directions. *Systems*, 11(7), 351.
4. Barzegar, R., Adamowski, J., & Moghaddam, A. A. (2016). Application of wavelet-artificial intelligence hybrid models for water quality prediction: a case study in Aji-Chay River, Iran. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 30(7), 1797-1819.
5. Caradot, N., Alfonso, L., Montenegro, J. M. F., Brékine, A., Amorsi, N., Le Gall, F., ... & Kim, E. E. (2023). Smart Water Management. In *Springer Handbook of Internet of Things* (pp. 805-824). Cham: Springer International Publishing.
6. Carminati, M., Turolla, A., Mezzera, L., Di Mauro, M., Tizzoni, M., Pani, G., ... & Antonelli, M. (2020). A self-powered wireless water quality sensing network enabling smart monitoring of biological and chemical stability in supply systems. *Sensors*, 20(4), 1125.
7. Chafa, A. T., Chirinda, G. P., & Matope, S. (2022). Design of a real-time water quality monitoring and control system using Internet of Things (IoT). *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2143054>
8. Dharmarathne, G., Abekoon, A. M. S. R., Bogawaththa, 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*, 105182.
9. Dong, J., Wang, Z., Wu, J., Huang, J., & Zhang, C. (2023). A water quality prediction model based on signal decomposition and ensemble deep learning techniques. *Water Science & Technology*, 88(10), 2611-2632.
10. England, M., & Connor, R. (2024). UN World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace.
11. Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*, 10(6).
12. Gholizadeh, S., Dezvareh, R., & Kiani, A. (2024). Comparison of different support vector machine kernels for monitoring of the last decade of the Iranian part of eastern Caspian Lake. *International Journal Of Coastal, Offshore And Environmental Engineering (ijcoe)*, 9(1), 55-63.
13. Ghorbani Bam, P., Rezaei, N., Roubanis, A., Austin, D., Austin, E., Tarroja, B., ... & Rosso, D. (2025). Digital Twin Applications in the Water Sector: A Review. *Water*, 17(20), 2957.
14. Giri, I., Ritika, K. C., & Khadka, U. R. (2022). Water quality status in Bagmati river of Kathmandu valley, Nepal. In *Ecological significance of river ecosystems* (pp. 481-502). Elsevier.
15. Khan, I., & Umar, R. (2024). Machine Learning-driven optimization of water quality index: A synergistic ENTROPY-CRITIC approach using Spatio-Temporal data. *Earth Systems and Environment*, 8(4), 1453-1475.
16. Kim, J., Yu, J., Kang, C., Ryang, G., Wei, Y., & Wang, X. (2022). A novel hybrid water quality forecast model based on real-time data decomposition and error correction. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 553-565.
17. Lakshmikantha, V., Hiriyannagowda, A., Manjunath, A., Patted, A., Basavaiah, J., & Anthony, A. A. (2021). IoT based smart water quality monitoring system. *Global Transitions Proceedings*, 2(2), 181-186.
18. Lee, J. W., Park, S. R., & Lee, S. W. (2023). Effect of Land Use on Stream Water Quality and Biological Conditions



- in Multi-Scale Watersheds. *Water*, 15(24), 4210.
19. Li, Z., Liu, H., Zhang, C., & Fu, G. (2024). Real-time water quality prediction in water distribution networks using graph neural networks with sparse monitoring data. *Water Research*, 250, 121018.
 20. Liu, D., Yang, H., Thompson, J. R., Li, J., Loiselle, S., & Duan, H. (2022). COVID-19 lockdown improved river water quality in China. *Science of the Total Environment*, 802, 149585.
 21. López, M., Hernández, J., & Rodríguez, A. (2025). AI-Enhanced Digital Twin Platform for Smart Water Distribution: Integrating Machine Learning Models with IoT-Driven Predictive Analytics.
 22. Rasekh, A., Hassanzadeh, A., Mulchandani, S., Modi, S., & Banks, M. K. (2016). Smart water networks and cyber security. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 142(7), 01816004.
 23. Wiryasaputra, R., Huang, C. Y., Lin, Y. J., & Yang, C. T. (2024). An IoT real-time potable water quality monitoring and prediction model based on cloud computing architecture. *Sensors*, 24(4), 1180.
 24. World Health Organization. (2024). Compendium of WHO and other UN guidance in health and environment, 2024 update. World Health Organization.
 25. Yan, X., Zhang, T., Du, W., Meng, Q., Xu, X., & Zhao, X. (2024). A Comprehensive Review of Machine Learning for Water Quality Prediction over the Past Five Years. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(1), 159. <https://doi.org/10.3390/jmse12010159>
 26. Yousef, L. A., Yousef, H., & Rocha-Meneses, L. (2023). Artificial intelligence for management of variable renewable energy systems: a review of current status and future directions. *Energies*, 16(24), 8057.
 27. Zhang, S., Lin, J., Li, Y., Zhu, B., Zhang, D., Peng, Q., & Jin, T. (2025). Water Quality by Spectral Proper Orthogonal Decomposition and Deep Learning Algorithms. *Sustainability*, 17(1), 114.
 28. Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J., & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. *Nature water*, 2(3), 228-241.
 29. Zhou, J., Wang, J., Chen, Y., Li, X., & Xie, Y. (2021). Water quality prediction method based on multi-source transfer learning for water environmental IoT system. *Sensors*, 21(21), 7271.
 30. Zhou, Y., Wang, X., Li, W., Zhou, S., & Jiang, L. (2023). Water quality evaluation and pollution source apportionment of surface water in a major city in Southeast China using multi-statistical analyses and machine learning models. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(1), 881.
 31. Zulkifli, C. Z., Garfan, S., Talal, M., Alamoodi, A. H., Alamlah, A., Ahmaro, I. Y., ... & Chiang, H. H. (2022). IoT-based water monitoring systems: a systematic review. *Water*, 14(22), 3621.



Smart Water Quality Management: IoT and AI Applications Review

Iman Hajirad^{1*}, Paria Pourmohammad², Erfan Fazli³

1- Ph.D. Candidate, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, College of Agricultural and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(* Corresponding author: i.hajirad@ut.ac.ir)

2- Ph.D. Student. Department of reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

(pariapourmohammad.79@gmail.com)

3- Research, Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran.

(erfanfazli@ut.ac.ir)

Abstract

Smart water quality management, as a critical challenge in urban and industrial networks, requires the use of advanced technologies for monitoring, analyzing, and predicting changes in water quality parameters. This analytical review examines the intelligent technologies and methods applied in water quality management and analyzes the role of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) in enhancing the accuracy, speed, and efficiency of monitoring and decision-making systems. The literature review indicates that advanced sensors and machine learning-based algorithms enable the identification of complex patterns, prediction of changes, and proactive responses to water quality fluctuations. However, challenges such as sensor accuracy and stability, system integration complexity, data security, and a shortage of skilled personnel remain significant barriers to widespread implementation. Conversely, innovative trends, including the development of resilient and self-calibrating sensors, deep learning algorithms, and process automation, offer new opportunities to improve performance, increase reliability, and promote sustainable water networks. This analytical review provides a comprehensive overview of the smart technologies landscape in water quality management and outlines directions for future research in this field.

Keywords: Big Data Analysis, Machine Learning Algorithms, Real-time Monitoring, Smart Sensors.