Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964

Identifying challenges in water quality measurement and proposing IoT-based solution

Seyed Hashem Mirbahari [1], Asadollah Shahbahrami [2]✉, Soodabeh Poorzaker Arabani[3]

[1] Ph.D. Student of Software Engineering, Department of Computer, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: mirbahari@gmail.com

[2] Corresponding Author, Professor, Computer Engineering Department, University of Guilan, Rasht, Iran., and Department of Computer, Rasht Branch, Islamic Azad University, Rasht, Iran. E-mail: shahbahrami@guilan.ac.ir

[3] Assistant Professor, Department of Computer Engineering and Information Technology, Lahijan Branch, Islamic Azad University, Lahijan, Iran. E-mail: soodabeharabani@gmail.com

ABSTRACT

Rivers serve as vital resources for human communities and ecosystems, necessitating precise and continuous monitoring to ensure their health. Rivers are subjected to contamination by numerous chemical, physical and biological pollutants. Water quality assessment is a process wherein experts and researchers from organizations such as environmental agencies and universities traditionally measure parameters affecting water quality, such as water temperature, pH, transparency, turbidity, dissolved oxygen, nitrate levels, among others. Subsequently, the Water Quality Index (WQI) is calculated according to specific standards, such as IRWQIsc and NSFWQI. The objective of this paper encompasses two sections. In the first section, using the Delphi-Fuzzy method, we identify parameters critical to water quality assessment, the existing challenges in traditional methods, and new requirements based on artificial intelligence and IoT technologies. This was accomplished with the assistance of selected experts using the snowball sampling method from relevant organizations such as the Environmental Protection Agency and the Water and Sewerage Department. The data analysis results, processed by appropriate softwares, indicated that the measurement of heavy metals and chlorophyll-a ranked the highest and the lowest in priority, respectively. Additionally, challenges such as outdated water quality assessment practices, high assessment costs, significant errors, and a shortage of expert professionals in organizations were identified. Furthermore, all experts agreed that the current traditional methods are inadequate for meeting new requirements, such as automated pattern extraction and parameter prediction, which can be achieved with an intelligent assistant. In the second section of the paper, an IoT-based method for measuring the critical and prioritized parameters in river water quality assessment is proposed, designed, and implemented. The proposed system consists of four layers: perception, network, platform, and application. This system was installed and operated in a real-world river environment. The proposed system not only addresses the issues present in traditional methods used by organizations but also meets the new requirements.

Keywords: Water Quality Measurement, Snowball method, Delphi-fuzzy, Internet of Things, Artificial Intelligence

Article Type: Research Article
Article history: Received: 24 April 2024 **Revised:** 22 July 2024 **Accepted:** 07 August 2024 **ePublished:** 22 September 2024

1. Introduction

Water, as one of the vital and fundamental resources in human life and ecosystem survival, is directly and indirectly affected by pollutants such as heavy metals, pesticides, agricultural toxins, soil erosion, animal waste, and human sewage. This issue has raised significant concerns regarding public health and environmental safety. Rivers, as one of the most important sources of freshwater, are heavily impacted by these changes, emphasizing the necessity of protecting their quality. This text examines methods for assessing water quality and demonstrates how the use of new technologies such as artificial intelligence and the Internet of Things can aid in improving the water quality assessment process. For example, calculating parameter values and converting them into qualitative values can be enhanced using artificial intelligence. According to Zhi et al.'s (2024) research, the determination of all water quality is characterized by traditional measurement methods, which may be time-consuming, expensive, and sometimes in the later stages of evaluation due to the large volume of non-constructible data. It is not reusable. Additionally, this text categorizes challenges and new requirements in this field, indicating that intelligentizing the water quality assessment process through the use of new technologies leads to significant improvements in this area.

2. Methodology

The methodology of this study consists of several important stages. Initially, by reviewing relevant literature and existing standards in the field of water quality assessment, the necessary foundations for the study were established. Subsequently, through the formation of a Delphi panel and using the snowball sampling method, the opinions of experts and specialists on issues related to water quality assessment were collected and analyzed. In the following steps, by creating a suitable portal for data collection and questionnaire, the required data were gathered from experts and specialists. Then, using the Delphi-fuzzy analysis method, the results obtained from interviews and questionnaires were analyzed by suitable softwares to gain a more precise understanding of the challenges and requirements in water quality assessment. This methodology employs a combined approach, which integrates literature review, expert and specialist participation, questionnaire data collection, and detailed result

analysis. After that, we have proposed an IoT-based method for measuring some parameters in river for water quality assessment. The proposed system has been tested in a real environment.

3. Results and discussion

Results of the research indicated that heavy metal measurement emerged as the most important parameter in water quality assessment, while chlorophyll-a measurement was deemed as the least significant of all. Challenges associated with traditional assessment methods, including the need for expert personnel, costly and time-consuming task, and potential outdatedness of results, were identified. Furthermore, the inadequacy of water sampling conditions underscored the necessity for more online assessment methods. Experts recommended using new technologies such as artificial intelligence and the Internet of Things (IoT) for data collection, storage, processing, and pattern extraction. Based on these findings, a proposed IoT-based system for river water quality assessment was designed, comprising hardware and software components across four layers: perception, network, platform, and application. This system aims to address the limitations of traditional methods while meeting the emerging requirements driven by artificial intelligence.

4. Conclusions

Water quality assessment, especially the quality of river water, is a highly important process that is traditionally and often manually conducted by some organizations, such as environmental agencies, water and wastewater authorities, and fisheries departments. In this process, experienced experts are dispatched to predetermined locations along the rivers at specific time periods, where some parameters are measured on-site while others are sampled by water and analyzed in laboratories, ultimately resulting in water quality assessment. This paper employed the Delphi-Fuzzy methodology to prioritize influential parameters in water quality and identify existing challenges in the manual water quality assessment process through the assistance of selected experts and professionals via questionnaires and interviews. The analysis of the gathered data revealed that heavy metal assessment parameter holds the highest importance, while chlorophyll-a parameter, holds the least significance in water quality assessment. Furthermore, the challenges in traditional water quality methods, which require sending expert water specialists with suitable equipment to relevant locations at the right time, incurring high costs and time-consuming procedures, were highlighted. Additionally, the results obtained from assessments may become outdated in some cases and lack necessary valuable data. Moreover, water sampling in certain circumstances occurs under unsuitable conditions, necessitating a greater emphasis on online monitoring. Furthermore, experts believed that, considering the aforementioned needs, new technologies such as artificial intelligence and the IoT should be utilized for data collection, storage, processing, and pattern extraction. Based on the conducted research and its outcomes, an IoT-based system for river water quality assessment was proposed. This system comprises a collection of hardware and software in four layers: perception, network, platform, and application. Various sensors in the perception layer are utilized to measure priority parameters. The collected data in the platform layer are processed by different algorithms, and suitable patterns can be extracted using artificial intelligence algorithms and data mining techniques. This proposed system, besides addressing the challenges of traditional methods, possesses the capability to meet the new requirements based on the utilization of artificial intelligence.

5. References

Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J., & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. Nature Water, 1-14. https://doi.org/10.1038/s44221-024-00202-z

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

7. Acknowledgments

We would like to express our gratitude and appreciation to Dr. Mahmoud Moradi, the faculty member of the Knowledge Management Department at the University of Guilan, Rasht, Iran who collaborated with us in designing the questionnaire, selecting the research methodology, and supervising the research process. We also extend our thanks to all the esteemed experts from the Environmental Protection Agency of the Guilan province, the laboratory experts from the Water and Wastewater Department, and the Caspian Sea Studies Institute, including the honorable Dr. Kalantari, Dr. Hajari, Dr. Moosavi, and Dr. Mahmoud Mohseni, who supported us throughout the research process from beginning to end with their invaluable comments. We are deeply grateful for their help and support.

Cite this article: Mirbahari, S.H., Shahbahrami, A., & Poorzaker Arabani, S. (2024). Identifying challenges in water quality measurement and proposing IoT-based solution. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(3), 76-98. DOI: 10.22126/ATWE.2024.10730.1125

Publisher: Razi University

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب
وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

شناسایی چالش‌های سنجش کیفیت آب و ارائه راهکار مبتنی بر اینترنت اشیا

سید هاشم میربهاری [۱]، اسدالله شاه بهرامی [۲]✉، سودابه پورذاکر عربانی [۳]

[۱] دانشجوی دکتری تخصصی نرم‌افزار، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران. رایانامه: mirbahari@gmail.com
[۲] نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه گیلان، رشت، ایران،، و گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت، رشت، ایران. رایانامه: shahbahrami@guilan.ac.ir
[۳] استادیار، گروه کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران. رایانامه : soodabeharabani@gmail.com

چکیده

آب رودخانه‌ها به‌عنوان منابع حیاتی برای جوامع انسانی و اکوسیستم‌ها، نیازمند پایش دقیق و مستمری است تا از سلامت آنها اطمینان حاصل شود. چراکه رودخانه‌ها توسط آلوده‌کننده‌های متعدد شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی آلوده می‌شوند. سنجش کیفیت آب فرآیندی است که در آن کارشناسان و پژوهشگران برخی از سازمان‌ها از قبیل محیطزیست و دانشگاه‌ها در یک‌روند سنتی و مرسوم، پارامترهای مؤثر در کیفیت آب مانند دما، pH، شفافیت، کدری، اکسیژن محلول، نیترات و غیره را اندازه‌گیری و درنهایت شاخص کیفیت آب را با توجه به استانداردهای مورداستفاده را طبق شاخص‌های IRWQIsc و NSFWQI محاسبه می‌کنند. هدف این پژوهش شامل دو بخش است. در بخش اول ابتدا پارامترهای مؤثر در سنجش کیفیت آب، شناسایی مشکلات موجود درروش سنتی و مرسوم، شناسایی نیازمندی‌های جدید مبتنی بر فناوری‌های هوش مصنوعی و اینترنت اشیا، با کمک کارشناسان و خبرگان انتخاب‌شده به روش گلوله برفی در سازمان‌های مربوطه از قبیل سازمان محیطزیست و اداره آب و فاضلاب با استفاده از روش دلفی–فازی، انجام شد. نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌ها در وب‌سایت مربوط به مصاحبه، جمع‌آوری شد و تحلیل‌ها بعد از دانلود نتایج به فرمت اکسل و بارگذاری و محاسبه در محیط پایتون نشان داد که پارامترهای اندازه‌گیری فلزات سنگین و کلروفیل a به ترتیب دارای بیشترین و کمترین اولویت در سنجش کیفیت آب هستند. همچنین چالش‌های بروز نبودن سنجش کیفیت آب، هزینه بالای سنجش، خطای زیاد، کمبود کارشناسان خبره در سازمان و غیره شناسایی شد. علاوه بر این‌همه کارشناسان بر این عقیده بودند که روش سنتی و مرسوم جاری توانایی پاسخگویی به نیازهای جدید از قبیل استخراج خودکار الگوها، پیش‌بینی پارامترها و غیره که توسط یک دستیار هوشمند قابل حصول هستند را ندارد. در بخش دوم مقاله روشی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش پارامترهای مؤثر و اولویت‌دار در سنجش کیفیت آب رودخانه‌ها، ارائه، طراحی و پیاده‌سازی گردید. سیستم پیشنهادی چهار لایه‌ای دارای لایه‌های، ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است. سیستم پیشنهادی در یک رودخانه نصب و راه‌اندازی گردید که این سیستم علاوه بر برطرف کردن مشکلات روش سنتی موجود در سازمان‌ها، قابلیت برآورده سازی نیازمندی‌های جدید را دارد.

واژه‌های کلیدی: سنجش کیفیت آب، روش گلوله برفی، دلفی–فازی، اینترنت اشیا، هوش مصنوعی

نوع مقاله: مقاله پژوهشی
سابقه مقاله: دریافت: ۰۵ اردیبهشت ۱۴۰۳ **اصلاح:** ۰۱ مرداد ۱۴۰۳ **پذیرش:** ۱۷ مرداد ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۱ مهر ۱۴۰۳

استناد: میربهاری، س.ه.، شاه بهرامی، ا.، و پورذاکر عربانی، س. (۱۴۰۳). شناسایی چالش‌های سنجش کیفیت آب و ارائه راهکار مبتنی بر اینترنت اشیا، *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۳)، ۹۸-۷۶، شناسه دیجیتال: 10.22126/ATWE.2024.10730.1125

ناشر: دانشگاه رازی © نویسندگان.

مقدمه

آب به‌عنوان مایه حیات و یکی از اساسی‌ترین منابع طبیعی، نقش بی‌بدیلی در زندگی انسان‌ها و بقای اکوسیستم دارد. با گسترش شهرنشینی، صنعتی شدن و تغییرات اقلیمی، کیفیت آب به‌شدت تحت تأثیر عواملی همچون آلاینده شیمیایی، فلزات سنگین، آفت‌کش‌ها، سموم کشاورزی، عوامل فیزیکی مانند فرسایش خاک و ریز جامدات و عوامل بیولوژیکی مانند فضولات دامی و فاضلاب انسانی قرارگرفته است. نگرانی‌های فراوانی در رابطه با سلامت عمومی و محیطزیست ایجادشده است. رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین، بیشترین تأثیر را از این تغییرات می‌پذیرند و حفاظت از کیفیت آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. تحقیقات متعددی در زمینه پایش کیفیت آب انجام‌شده است، برای نمونه دوک[1] (۲۰۲۰) در پژوهش و ارزیابی خود فقط به برخی از پارامترهای شیمیایی مانند یون نیترات، اسیدیته یا بازیته و سختی آب و پارامترهای فیزیکی مانند دما و شفافیت آب و پارامترهای بیولوژیکی مانند کلفیرم مدفوعی تمرکز داشته است. روش‌های ارزیابی کیفیت آب در سازمان‌های مختلف مانند سازمان محیطزیست، طبق دستورالعمل معاونت محیطزیست انسانی (۱۳۹۲) و در اداره آب و فاضلاب، طبق دستورالعمل مشترک معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور (۱۳۸۸) و در سازمان شیلات ایران، طبق دستورالعمل سازمان شیلات ایران (۱۳۹۷) است. همچنین دانشگاه‌ها مطابق با پژوهش‌های انجام‌شده همچون پژوهش قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، الف) و همچنین استانداردهای جهانی[2] برای تعیین کیفیت آب و پساب اقدام می‌نمایند. طبق تحقیقات ژی و همکاران[3] (۲۰۲۴) تقریباً تعیین همه پارامترهای کیفی آب به روش‌های سنتی سنجش می‌شود که فرآیند آن معمولاً طولانی، هزینه‌بر و گاهی در مراحل بعدی فرآیند سنجش به دلیل حجم بالای داده‌های غیر ساخت‌یافته، قابلیت استفاده مجدد را ندارد.

هدف این پژوهش اولویت‌دهی به پارامترهای مختلف مؤثر در سنجش آب رودخانه‌ها و شناسایی مشکلات روش‌های سنتی مرسوم موجود در سازمان‌ها است. این اولویت‌دهی پارامترها و شناخت دقیق چالش‌های موجود، به متخصصین و طراحان کمک می‌کند که چگونه از تکنولوژی‌های جدیدی مانند هوش مصنوعی[4]، اینترنت اشیا[5]، رایانش ابری[6] و غیره در جهت برطرف کردن مشکلات موجود و افزایش کارایی در محاسبه، پیش‌بینی، دسترسی و عملکرد سریع استفاده کنند. برای مثال، محاسبه مقادیر پارامترها و تبدیل آن‌ها به مقدار کیفی، کاری که تاکنون همواره به‌صورت دستی انجام می‌گیرد را می‌توان به هوش مصنوعی واگذار نمود تا با سرعت و ابتکار خاص خود به این فرآیند کمک کند. برای تبدیل پارامترهای آلودگی آب به مقادیر کیفی، از استاندارد NSFWQI[7] که دارای ۹ پارامتر است، در کشورهایی همچون آمریکا، پرتغال، برزیل و ایران استفاده می‌گردد (حسنی و همکاران، ۱۳۹۰، و کارجکود و همکاران[8]، ۲۰۱۹). لازم به ذکر است که علاوه بر این پارامترها، پارامترهای دیگری نیز وجود دارد که هر سازمان مبتنی بر شرح وظایف خودش یک سری شاخص‌ها را مدنظر قرار می‌دهد. برای مثال سازمان محیطزیست معمولاً برای سنجش کیفیت آب از استاندارد NSFWQI با ۹ پارامتر و استاندارد $IRWQI_{SC}$ با ۱۱ پارامتر استفاده می‌کند در حالیکه اداره آب علاوه بر ۹ پارامتر، پارامترهای هیدرولوژیکی یا کمی آب، مانند فشار آب لوله‌ها، حجم عبوری، ارتفاع آب در کانال‌ها و غیره را نیز مورداستفاده قرار می‌دهد. طراحی و ساخت دستگاهی مبتنی بر اینترنت اشیا و یادگیری عمیق[9] برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی، پردازش و استخراج الگوهای مناسب از داده‌ها

---

1 Dhok
2 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
3 Zhi et al
4 Artifical Inteligent
5 Internet of Things
6 Cloud Computing
7 National Sanitation Foundation Water Quality Index
8 Kachroud et al
9 Deep Learing

برای ۹ پارامتر در مقایسه با چند پارامتر با اولویت بالاتر بسیار ازنظر طراحی، نصب، راه‌اندازی و هزینه تفاوت دارد. در کاربردهایی همچون صنعت فولاد، سنجش چند پارامتر با اولویت بالاتر در امر تصمیم‌گیری کفایت می‌کند (صفاییان و همکاران، ۱۳۹۵).

برای دست‌یابی به این اهداف، ابتدا با مطالعه ادبیات موضوعی و استانداردهای موجود، به بررسی اسناد بالادستی پرداخته شد. سپس با تشکیل یک پنل دلفی[۱] و استفاده از روش نمونه‌گیری گلوله برفی[۲]، نظرات کارشناسان و متخصصان با مصاحبه و پرسشنامه محقق[۳] ساخته از طریق یک پرتال جمع‌آوری و با روش دلفی- فازی[۴] تجزیه‌وتحلیل شد. نتایج تحلیل‌شده، نشان داد که سنجش فلزات سنگین بیشترین و سنجش کلروفیل aکمترین اهمیت را در سنجش کیفیت آب داشت. مشکلاتی مانند هزینه‌بر بودن، اعزام و کمبود کارشناسان زبده به منطقه موردنظر، سختی و خطرات نمونه‌برداری، تنوع ظروف نمونه‌برداری و آلودگی ظروف، خطر ابتلا کارشناسان به بیماری‌های ناشی از آب‌های بسیار آلوده و کمبود تجهیزات سنجش و اندازه‌گیری شناسایی شد. همچنین نیازمندی‌های جدیدی مانند جمع‌آوری برخط[۵]، استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده قبلی در جهت پیش‌بینی و استخراج الگوهای مناسب و مقایسه پارامترهای پیش‌بینی‌شده با داده‌های واقعی و طبقه‌بندی داده‌ها و نمایش بصری آن‌ها شناسایی گردید. لازم به ذکر است که برآورده کردن این نیازمندی‌ها مستلزم هوشمند سازی فرآیند سنجش کیفیت آب با استفاده از فناوری‌های جدید است و روش‌های مرسوم توانایی پاسخ به این نیازها، چالش‌ها و مشکلات را ندارند. مجموعه این تحلیل‌ها و نتایج منجر به طراحی و پیاده‌سازی دستگاهی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش چند پارامتر اساسی سنجش کیفیت آب شد. سیستم پیشنهادی در این پژوهش، بعد از طراحی و پیاده‌سازی در مکانی در رودخانه پسیخان رشت نصب و راه‌اندازی گردید. سیستم پیشنهادی مبتنی بر اینترنت اشیا، برخی از چالش‌های فوق را برطرف و برخی از نیازمندی‌های مطرح‌شده را برآورده می‌کند.

در این پژوهش مراحل انجام کار به ترتیب زیر است: ابتدا مرور ادبیات و تحقیقات پیشین موردبحث و بررسی قرارگرفته، سپس متدولوژی استفاده‌شده در پژوهش و درنهایت نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده و سیستم پیشنهادی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش چند پارامتر کیفیت آب ارائه و نتیجه‌گیری مطرح می‌گردد.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مک‌کاب و همکاران[۶] (۲۰۱۷) بر این باورند که اندازه‌گیری‌ها و جمع‌آوری داده‌ها اساس اکتشافات علمی است. این فرآیند امکان فرموله کردن فرضیه‌ها و توسعه مدل‌های مفهومی و عددی را فراهم می‌کند. بااین‌حال، داده‌های پارامترهای کیفیت آب در مقایسه با پارامترهای هیدرولوژیکی آب، به دلیل پیچیدگی، اغلب پراکنده‌تر، ناسازگارتر و از نظر زمان، مکان و فرکانس محدودتر هستند. این دیدگاه با یافته‌های ژی و همکاران (۲۰۲۴) و سعید و همکاران[۷] (۲۰۲۴) نیز همخوانی دارد. سعید و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که در برخی تحقیقات، تمرکز پژوهشگر بر پاره‌ای از پارامترهای آب است که شامل برخی از موارد مانند دما، کل جامدات معلق[۸]، اکسیژن محلول در آب[۹]، نیاز اکسیژن بیولوژیکی[۱۰] و نیاز اکسیژن

---

1 Delphi Panel
2 SnowBall Sampeling
۳ پرسشنامه محقق ساخته: نوعی از پرسشنامه است که پژوهشگر در راستای اهداف تحقیق خود آن را طراحی می‌کند.
4 Delphi-fuzzy
5 On Line
6 McCabe et al
7 Saeed et al
8 TSS (Total Suspended Solids)
9 DO (Dissolved Oxygen)
10 BOD (Biological Oxygen Demand)

شیمیایی[۱]، رسانایی الکتریکی[۲]، کدورت[۳]، اسیدیته یا قلیائیت[۴]، نیترات[۵]، نیتروژن کل[۶]، فسفر کل[۷] و فلزات سنگین، به‌عنوان‌مثال آرسنیک[۸] و سرب[۹] است. این نتایج با پژوهش‌های قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲ب)، شکوهی و همکاران (۲۰۱۹) و ژی و همکاران (۲۰۲۴) همخوانی دارد.

آشوری و همکاران (۱۴۰۲) و رانگزان و همکاران[۱۰] (۲۰۲۰) اشاره‌کرده‌اند که برخلاف داده‌های هیدرولوژیکی که اغلب به‌صورت خودکار اندازه‌گیری می‌شوند (مانند بارش، حجم آب عبوری، تبخیر و تعرق، عمق برف)، بسیاری از متغیرهای کیفیت آب هنوز به اندازه‌گیری‌های دستی و کار فشرده نیاز دارند. این اندازه‌گیری‌ها معمولاً از طریق نمونه‌برداری و آنالیز شیمیایی با استفاده از ابزارهای تحلیلی بزرگ و پیچیده انجام می‌شوند. اگرچه حسگرها برای صدها متغیر کیفیت آب توسعه داده‌شده‌اند، اما استقرار آن‌ها در محل برای اندازه‌گیری‌های خودکار ازنظر مکان، مدت‌زمان و متغیرهای کیفیت آب (مانند دما، DO، رسانایی خاص، مواد مغذی مانند نیترات و فسفات، کربن آلی محلول) محدود است.

سیستم‌های پایش برخط قدیم SCADA[11] با محدودیت‌هایی که به دلایل مختلف مثل تعداد سنسورها و کلاینت‌ها ایجاد می‌شوند، مواجه هستند. زیرساخت فیزیکی این فناوری، نیاز به کابل‌کشی و تجهیزات اضافی را افزایش می‌دهد و این در حالی است که ظرفیت این شبکه محدود است. این محدودیت‌ها با افزایش حجم داده‌های منتقل‌شده می‌توانند منجر به اشباع شبکه و کاهش کارایی سیستم شوند. نیچ یبیوت[۱۲] و همکاران (۲۰۱۳) اعلام داشتند که افزایش تعداد سنسورها نیاز به قدرت پردازش و ذخیره‌سازی بیشتری دارد و مدیریت و نگهداری سیستم را پیچیده‌تر می‌سازد، احتمال خطا و کاهش بهره‌وری را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، نرم‌افزار SCADA ممکن است دارای محدودیت‌هایی در پشتیبانی از تعداد بالای سنسورها و کلاینت‌ها باشد. برای کاهش این محدودیت‌ها، استفاده از تکنولوژی‌های نوین، ارتقا سخت‌افزارها، نرم‌افزارها و بهبود امنیت شبکه ضروری است.

شکوهی و همکاران (۲۰۱۹) در پژوهشی اعلام داشتند که روش‌های سنتی اندازه‌گیری کیفیت آب با چالش‌ها و محدودیت‌های متعددی مواجه هستند. این روش‌ها معمولاً به نمونه‌برداری دستی و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه نیاز دارند که فرآیندی زمان‌بر و پرهزینه است و امکان تحلیل لحظه‌ای و مداوم را فراهم نمی‌کند. علاوه بر این، احتمال آلودگی نمونه‌ها در حین انتقال و دست‌کاری انسانی نیز وجود دارد که می‌تواند به نتایج نادرست منجر شود. تجهیزات و مواد شیمیایی موردنیاز برای آنالیزهای آزمایشگاهی هزینه‌بر بوده و نیاز به تخصص بالا دارند. این مشکلات باعث می‌شود که روش‌های سنتی نتوانند به‌طور کارآمدی سنجش کیفیت آب را در زمان واقعی، پایش و کنترل کنند. این دیدگاه با پژوهش زیانورین و همکاران[۱۳] (۲۰۲۲) نیز مطابقت دارد.

بنا بر پژوهش پارکر و همکاران[۱۴] (۲۰۱۹)، استفاده از روش گلوله برفی[۱۵] برای یافتن کارشناسان خبره به‌منظور اخذ نظر و رای آن‌ها، یکی از تکنیک‌های نمونه‌گیری غیرتصادفی است که به‌ویژه برای دسترسی به خبره‌های خاص و پنهان مناسب است. در این روش، فرایند با انتخاب یک یا چند کارشناس اولیه که به جمعیت کارشناسان موردنظر دسترسی دارند، آغاز می‌شود. از این افراد اولیه خواسته می‌شود تا سایر ذینفعان مرتبط با

---

1 COD (Chemical Oxygen Demand)
2 EC (Electrical Conductivity)
3 Turbidity
4 pH (Potential of Hydrogen)
5 NO3 (Nitrate)
6 TN (Total Nitrogen)
7 TP (Total Phosphorus)
8 Arsenic
9 Lead
10 Rangzan et al
11 Supervisory Control And Data Acquisition
12 Nechibvute et al
13 Zainurin et al
14 Parker et al
15 Snowball Sampling

جمعیت هدف را معرفی کنند. سپس این فرآیند به‌صورت زنجیره‌ای تکرار می‌شود این روند تا زمانی ادامه می‌یابد که نمونه‌های کافی جمع‌آوری شوند یا معرفی افراد جدید متوقف شود. این روش به دلیل استفاده از روابط اجتماعی برای شناسایی نمونه‌ها، به‌ویژه در مطالعات شبکه‌های اجتماعی و جمعیت‌های غیرقابل‌دسترس، بسیار کاربردی است. بااین‌حال، به دلیل غیر تصادفی بودن نمونه‌گیری و احتمال سوگیری، نتایج آن ممکن است قابل‌تعمیم به‌کل جمعیت نباشد (یادگاری و آسوشه، ۱۴۰۲).

در پژوهش نوری و همکاران[1] (۲۰۲۰)، روش دلفی–فازی برای تدوین برنامه تأمین بهینه آب استفاده‌شده است. این روش با استفاده از نظرات کارشناسان به ارائه تصمیمات مؤثرتری برای مدیریت بهتر منابع آب در شرایط اقلیمی پژوهش انجام‌شده که منطقه نیمه‌خشک است کمک می‌کند و با توجه به نیازهای محلی، انتخاب سناریوهای بهینه را تسهیل می‌کند.

در مقاله یادگاری و آسوشه (۱۴۰۲)، برای دستیابی به مدلی فناورانه در ارائه خدمات اصلی، خدمات ارزش‌افزوده و زیرساخت در بیمارستان، از نظرات کارشناسان استفاده شد. در این روش با استفاده از نمونه‌گیری گلوله برفی، انتخاب کارشناسان انجام شد و با تشکیل پنل خبرگان توسط این کارشناسان نیازهای عملکردی و غیر عملکردی مشخص شد و مدل کلی بیمارستان طراحی گردید.

در پژوهش ایم[2] و همکاران (۲۰۲۲)، اعلام داشته‌اند که رویکردهای یادگیری عمیق در سنجش کیفیت آب دقت بالایی در پیش‌بینی و تحلیل داده‌ها ارائه می‌دهند. این روش‌ها انعطاف‌پذیری بالایی دارند و می‌توانند از داده‌های جدید بدون نیاز به تغییرات گسترده در ساختار مدل استفاده کنند. همچنین این روش‌ها، با قابلیت یکپارچگی و مقیاس‌پذیری، می‌توانند از داده‌های متنوع و بزرگ استفاده کرده و در زمینه‌های مختلفی ازجمله داده‌های زمانی و مکانی به تحلیل و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و سریع‌تری بپردازند. این تحقیق با پژوهش مک‌کابل و همکاران (۲۰۱۷) هم‌راستا است.

سعید و همکاران (۲۰۲۴)، در تحقیقات خود ادغام مدل‌های کیفیت آب با مدل‌های اکولوژیکی و سپس تحلیل با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی را پیشنهاد می‌کنند که می‌تواند به درک بهتر روابط پیچیده بین کیفیت آب، زیستگاه و سلامت اکوسیستم کمک کند.

نیکنام و همکاران[3] (۲۰۲۴)، در پژوهش خود اعلام کرده‌اند که الگوریتم یادگیری عمیق، همراه الگوریتم یادگیری فدرال(FL[4]) ، یک روش مؤثر پیش‌بینی کیفیت آب است. در معماری مبتنی بر FL پیشنهادی، مدل‌های مختلف یادگیری ماشین در بخش نزدیک به سنسورها یا لبه، برای آموزش مدل با مجموعه داده محلی استفاده می‌شود. سپس از سرور برای جمع‌آوری یافته‌های لبه محلی و آموزش یک مدل داده سرتاسری برای افزایش دقت پیش‌بینی کیفیت آب استفاده می‌شود. ویلنجیری و همکاران[5] (۲۰۲۳) نیز در پژوهش خود نشان دادند که مدل‌های هوش مصنوعی در برخی مسائل، نتایج بهتری در پیش‌بینی سری‌های زمانی ارائه می‌دهند.

ولیام و همکاران[6] (۲۰۲۳) و ژی و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهش‌های خود نشان دادند که شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN[7]) و سایر تشخیص‌دهنده‌های الگوی پیچیده مانند ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM[8])، نمونه‌هایی از فناوری‌های حسگر پیشرفته هستند که به‌عنوان راه‌حل‌هایی برای شناسایی ناهنجاری‌ها و برآورد شدت چنین بی‌نظمی‌هایی پیاده‌سازی شده‌اند.

---

[1] Noori et al
[2] Im et al
[3] Niknam et al
[4] Federated learning
[5] Vellingiri et al
[6] William et al
[7] Artificial Neural Network
[8] Support Vector Machine

یافته‌های نصیر و همکاران[۱] (۱۴۰۱) در بخش طبقه‌بندی کیفیت و توصیف کیفی آب نشان داد که مدل CATBoost[2] دقیق‌ترین طبقه‌بندی کننده را با دقت ۹۴.۵۱٪ ارائه می‌دهد. ازنظر دقت در طبقه‌بندی کیفیت آب، به ترتیب پاسخ هر یک از الگوریتم‌ها CATBoost (۹۴.۵۱٪)، جنگل تصادفی[۳] (۹۴٪)، MLP[4] (۸۸.۶٪)، XGBoost[5] (۸۸.۱٪)، درخت تصمیم[۶] (۸۱.۶٪)، SVM (۸۰.۷٪) و رگرسیون لجستیک (۷۲.۹٪) دقت در طبقه‌بندی داشته است. بااین‌حال، برای انباشتن مدل‌های مجموعه، دقت ۱۰۰ درصد توسط طبقه‌بندی کننده‌های متعدد، ازجمله درخت تصمیم وCATBoost ارائه شد.

شمس‌الدین و همکاران (۲۰۲۲) بر اساس پژوهشی که انجام داده‌اند، اعتقاددارند بهترین مدلی که بالاترین عملکرد در طبقه‌بندی کیفیت داده‌ها را داشته باشد SVM با دقت ۹۶.۳۵٪ بود. این مدل با دقت ۹۱.۹۷٪ و بازیابی ۸۴.۸۹٪ بر اساس میانگین کلان پشتیبانی می‌شد. مدل SVM همچنین یک مدل چند کلاسه است که در طبقه‌بندی داده‌ها از کلاس‌های مختلف بر اساس یک ماتریس سردرگمی عملکرد خوبی دارد. درنتیجه، مدل SVM به‌عنوان بهترین مدل طبقه‌بندی کننده در این پژوهش انتخاب شد و آزمون t نشان داد که نتایج آزمون در سطح اطمینان ۰/۰۵ ازنظر آماری معنی‌دار است.

در پژوهش حسنی و همکاران (۱۳۹۱)، طراحی شاخص کیفی بر اساس سیستم استنتاج فازی صورت گرفته است. بعد از طراحی، شاخص به‌وسیله داده‌های حاصل از آب قنات‌های منطقه یزد مورد ارزیابی قرار گرفت. یافته‌ها نشان می‌دهد که شاخص کیفی ارائه‌شده در این مطالعه نسبت به شاخص NSF[7] که از ۹ پارامتر برای بیان کیفیت آب استفاده می‌کند، دارای نتایج سخت‌گیرانه‌تری است.

در پژوهش وانگ و همکاران[۸] (۲۰۱۷)، الگوریتم‌های پیش‌بینی سری زمانی برای سنجش کیفیت آب با استفاده از روش‌های شبکه عصبی سنتی مقایسه شده است. در این پژوهش، یک روش جدید پیش‌بینی کیفیت آب مبتنی بر شبکه عصبی سری زمانی حافظه بلندمدت و کوتاه‌مدت LSTM NN[9] برای پیش‌بینی کیفیت آب پیشنهاد شده است. در مرحله اول، یک مدل پیش‌بینی مبتنی بر LSTM NN ایجاد می‌شود. این یافته تحقیقی با نظر حق[۱۰] و هاری‌گویندان (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

هوش مصنوعی در حوزه‌های مختلفی ازجمله در امور آب و آبیاری به محققان کمک می‌کند. در پژوهش آشوری و همکاران (۱۴۰۲)، هوش مصنوعی در پیش‌بینی فرونشست زمین در استان سمنان با درصد خطای کمتری پیش‌بینی موفقیت‌آمیزی داشته است.

مک‌کابل و همکاران (۲۰۱۷) نشان دادند که استفاده از رویکردهای آماری سنتی در پیش‌بینی کیفیت آب مؤثر است. این روش‌ها معمولاً با محدودیت‌هایی مواجه هستند. آن‌ها قادر به شبیه‌سازی پویایی و تغییرات زمانی کیفیت آب به‌صورت دقیق نیستند و برای این کار به مدل‌های پیچیده‌تر و غیرخطی نیاز است. همچنین، محدودیت‌های مربوط به تفسیر و استنتاج از مدل‌های آماری و نیاز به داده‌های زمانی و مکانی دقیق، می‌تواند مانع از دقت و کارایی در پیش‌بینی کیفیت آب شود. در مقابل، روش‌های مبتنی بر فرآیند، اگرچه روش بهتری در مکانیسم‌های دینامیک کیفیت آب ارائه می‌دهند، اما با چالش‌هایی همچون نیاز به داده‌های دقیق و جامع، پیچیدگی محاسباتی و نیاز به کالیبراسیون مداوم روبرو هستند.

---

[1] Nasir et al
[2] CATBoost (Categorical Boosting)
[3] Random Forest
[4] Multilayer Perceptron
[5] eXtreme Gradient Boosting
[6] Decision Tree
[7] NSF (National Sanitation Foundation Water Quality Index)
[8] Wang et al
[9] LSTM (Long Short-Term Memory) Neural Network
[10] Haq et al

به‌طورکلی، هر دو روش دارای مزایا و محدودیت‌های خود هستند و استفاده از آن‌ها به شرایط محیطی و اهداف مطلوب مدل‌سازی کیفیت بستگی دارد.

در مقاله ناندی و همکاران[1] (۲۰۲۴)، مقوله هوا و آب هر دو با استفاده از شبکه‌های عصبی برای کشور هندوستان بررسی شده است. در این پژوهش، در ۲۱ شهر از هندوستان آلودگی آب‌وهوا در درجه نگران‌کننده‌ای قرار دارد و آنالیز کیفیت آن مورد تحلیل قرار گرفته است. در این تحقیق نیز از الگوریتم‌های LSTM و ANN استفاده شد.

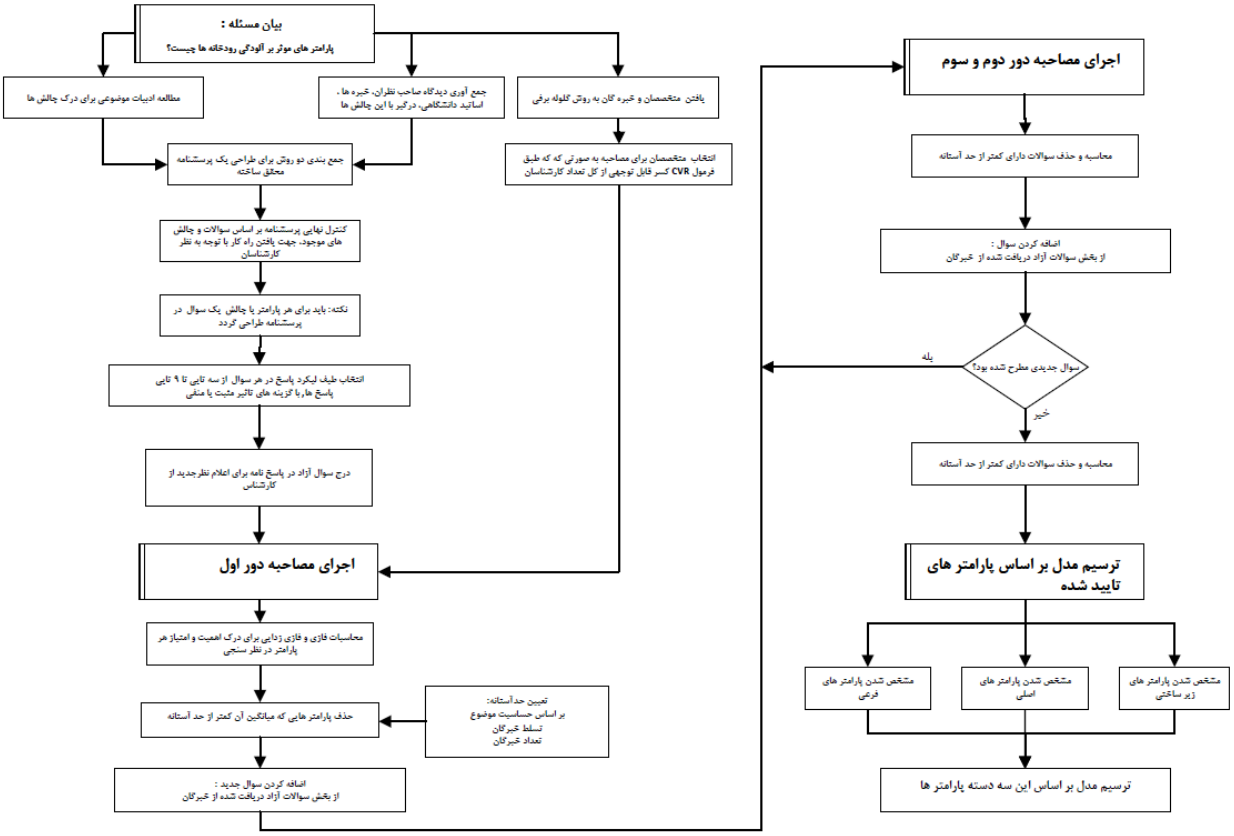
در مطالعات گذشته و ادبیات موضوعی، مشکلات روش‌های سنتی پایش کیفیت آب و همچنین اولویت‌بندی پارامترها به‌طور کامل بررسی و تحلیل نشده است و هنوز فناوری نوینی که بتواند این فرآیندهای سنجش کیفیت آب را بهبود بخشد معرفی نگردیده است. هوش مصنوعی باوجود پیشرفت‌های چشمگیر در حوزه‌های مختلف، هنوز نتوانسته است به شکل مؤثری در تجهیزات پایش کیفیت آب به کمک کارشناسان بیاید. این واقعیت‌ها نشان‌دهنده نیاز به رویکردهای نوآورانه‌تری ازجمله اینترنت اشیا است که بتوانند کارآمدی و دقت در پایش کیفیت آب را افزایش دهد.

روش پژوهش

همانطوریکه قبلاً اشاره شد اولویت‌بندی پارامترهای سنجش کیفیت آب و همچنین شناسایی مشکلات موجود در روش‌های مرسوم تعیین کیفیت آب در جهت ارائه یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیا بسیار مهم است. چراکه قبل از طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم سخت‌افزاری که شامل قطعات مختلفی ازجمله سنسورها، عملگرها، پردازنده‌ها، زیرساخت شبکه و غیره است نیاز است که بدانیم چه پارامترهای مهمی قابل‌اندازه‌گیری هستند که می‌توانند مشکلات موجود را حل یا آن‌ها را کاهش دهند. لذا در این پژوهش ابتدا، از روش‌های گلوله برفی و دلفی-فازی استفاده شد. از روش گلوله برفی برای شناسایی کارشناسان خبره در زمینه کیفیت آب و سنجش آن در سازمان‌های مربوطه ازجمله سازمان محیط‌زیست، اداره آب و فاضلاب، سازمان شیلات و غیره بهره گرفته شد. در این روش از کارشناسان اولیه که به‌صورت تصادفی انتخاب‌شده بودند، درخواست شد تا کارشناسان متبحر دیگری را معرفی کنند. این فرآیند به افزایش تعداد کارشناسان و تشکیل پنل دلفی کمک کرد. به‌این‌ترتیب، فهرستی از افرادی را که در زمینه پایش آلودگی آب دارای تخصص بودند، گردآوری شد (نوری و همکاران،۲۰۲۰، و شاهینی و همکاران، ۱۴۰۲).

درروش دلفی-فازی، شرکت‌کنندگان در پنل دلفی می‌توانند نظرات خود را درباره موضوع موردنظر بیان کنند و سپس میزان توافق به‌صورت فازی محاسبه می‌شود. این روش برای یافتن نقاط قوت و ضعف موضوع موردبحث، تعیین اولویت‌ها و ارائه پیشنهادها برای حل مسائل بسیار مؤثر است. درنهایت، به کمک کارشناسان شناسایی‌شده و تشکیل پنل دلفی، به اهداف پژوهش پرداخته شد. نتیجه این پنل شامل پاسخ به چالش‌های مطرح‌شده در مورد اولویت‌بندی پارامترها و شناسایی مشکلات موجود در سنجش کیفیت آب، نوع مشکلات سنجش دستی و انتظارات از فناوری‌های روز همچون هوش مصنوعی بود. مراحل مختلف پنل دلفی که در این پژوهش مورداستفاده قرارگرفته است در شکل (۱) نشان داده شده است.

[1] Nandi et al



شکل ۱. نمایش مراحل اجرای روش پژوهش دلفی-فازی.

یافته‌ها

در این بخش نتایج حاصل از تجزیه‌وتحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده ارائه می‌گردد. ابتدا اولویت‌بندی پارامترها، بعد شناسایی چالش‌های موجود و همچنین نیازمندی‌های جدید سازمان‌ها موردبحث و بررسی قرار می‌گیرد.

اولویت‌بندی پارامترها:

داده‌های جمع‌آوری‌شده از کارشناسان خبره در سازمان‌های مختلف، با استفاده از کد نوشته‌شده در نرم‌افزار پایتون و روابط مربوط به فازی‌سازی مقادیر و سپس فازی‌زدایی آن مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل برای اولویت‌بندی پارامترهای مختلف آب از دیدگاه سازمان‌های مختلف؛ تجمیع کردن تمام پارامترهای موردنیاز، معمولاً ۱۸ پارامتر؛ در جدول (۱) ارائه گردیده است. بر اساس نظرات کارشناسان در بخش‌های مختلف سازمان‌ها و اداره‌های مربوطه، سنجش میزان آلودگی‌های فلزات سنگینی مانند کروم، سرب و آرسنیک دارای بالاترین اولویت هستند. این نشان‌دهنده اهمیت بالای فلزات سنگین به‌عنوان یکی از عوامل اصلی آلودگی آب در تمام سازمان‌های مربوطه است که نیازمند نظارت دقیق و مستمر است. در مقابل، کمترین اهمیت به سنجش پارامتر کلروفیل a داده شد که نشان می‌دهد این پارامتر در مقایسه با سایر عوامل آلودگی از اولویت کمتری برخوردار است. لازم به ذکر است که این ۱۸ پارامتر آب، نیازمندی‌های سازمان‌های مختلف بوده که توسط کارشناسان مربوطه درروش پژوهش به‌دست‌آمده است.

جدول ۱. اولویت‌بندی سنجش پارامترهای آب مبتنی بر نظر کارشناسان به روش دلفی-فازی

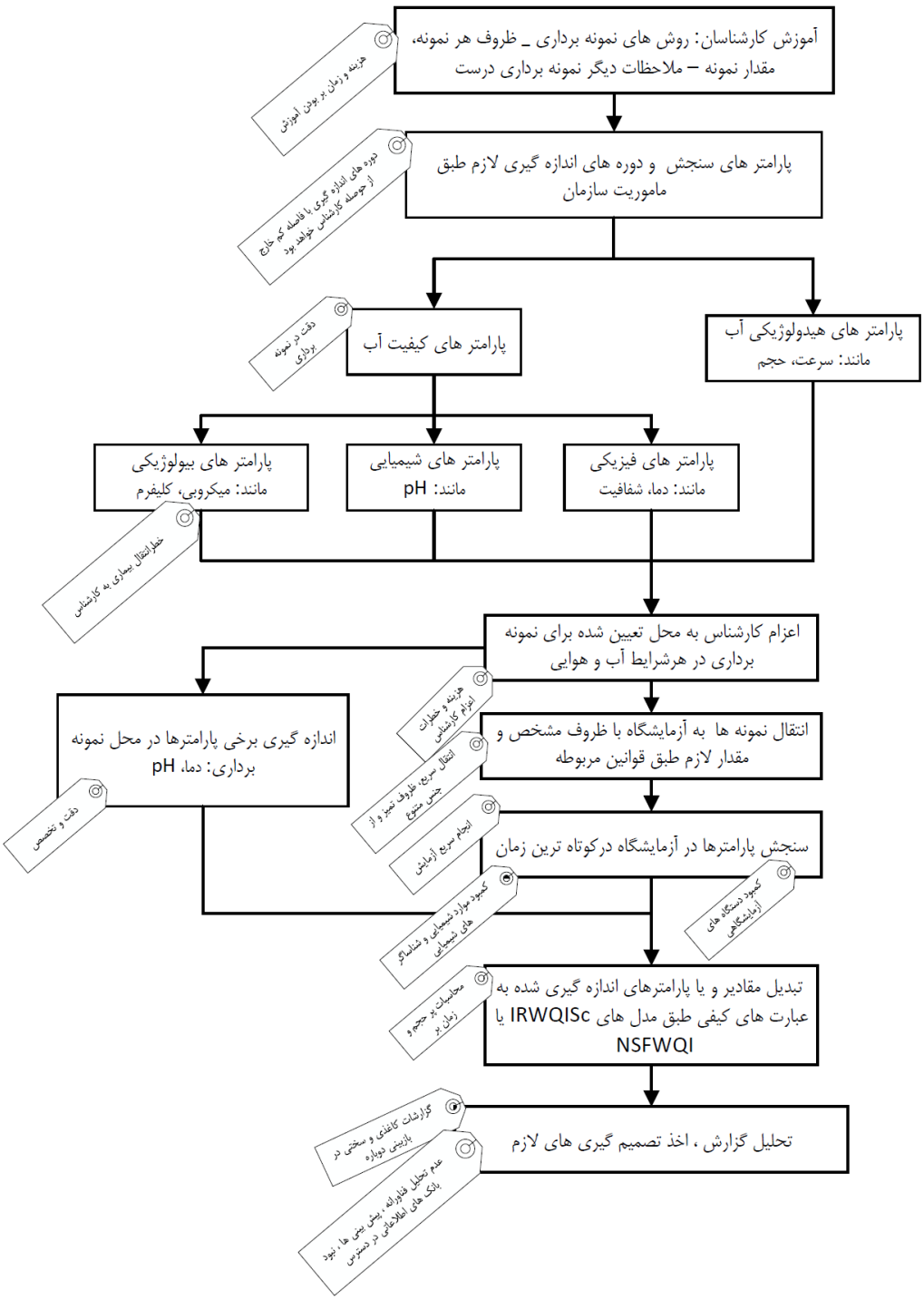
ردیف	پارامتر سنجش آب
۱	فلزات سنگین (مانند سرب، جیوه، کادمیوم، کروم و نیکل)
۲	سطح اکسیژن محلول (DO)
۳	مقدار pH
٤	یون نیترات
٥	میزان اکسیژن مورد نیاز برای اکسایش شیمیایی (COD)
٦	هدایت الکتریکی (EC)
۷	سختی یا مجموع مواد معلق در آب (TSS)
۸	یون آمونیوم
۹	سنجش TOC (کل کربن آلی)
۱۰	کدورت یا شفافیت
۱۱	یون فسفات
۱۲	مقدار روغن و گریس معلق در آب (GREASE & OIL)
۱۳	نرخ مصرف اکسیژن توسط میکروارگانیسم‌ها (BOD – نیاز اکسیژنی بیولوژیک)
۱٤	کلیفرم مدفوعی
۱٥	سختی کل (مجموع غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم)
۱٦	سموم و فنل
۱۷	مقدار کلر محلول در آب
۱۸	کلروفیل a

شناسایی مشکلات موجود

نتایج تحقیق صورت گرفته با اجرای پنل مصاحبه در وب‌سایت اینترنتی انجام و نتایج به فرمت نرم‌افزار اکسل در برنامه پایتون بارگذاری شد، نتایج محاسبه به زبان پایتون به روش دلفی-فازی نشان می‌دهد که تمامی ادارات و سازمان‌هایی که مسئولیت پایش آلودگی آب را بر عهده‌دارند، ناچار هستند که برخی از پارامترهای آب از قبیل دما و pH را در محل رودخانه اندازه‌گیری کنند. این پارامترها به دلیل نوع و ویژگی آن‌ها که در تعیین کیفیت آب‌دارند، قابل‌اندازه‌گیری از نمونه‌های آب برداشت‌شده و انتقال داده‌شده به آزمایشگاه نمی‌باشند؛ اما در مورد دیگر پارامترها شرایط متفاوت است چراکه نمونه‌های برداشت‌شده از مکان‌های مختلف رودخانه باید در ظروف خاص و به مقدار لازم ریخته و نگهداری و سپس حمل گردد. باید این نمونه‌ها حداکثر تا زمان مشخصی به آزمایشگاه انتقال داده شود و در آنجا موردسنجش و اندازه‌گیری قرار گیرد، دراین‌بین خطر

سرایت بیماری به کارشناسان در حین نمونه‌برداری و حمل آب آلوده وجود دارد. سازمان حفاظت محیط‌زیست از روش‌های سنتی و دستی برای اندازه‌گیری پارامترهای کیفی آب استفاده می‌کند. این روش‌ها عموماً زمان‌بر و پرهزینه هستند و ممکن است با مسائلی مانند دقت کمتر و نیاز به دوره‌های آزمایش طولانی‌تر مواجه شوند. در مقابل اداره آب و فاضلاب به دلیل ضرورت و سرعت پاسخ به وقایع و حوادث، از نظارت برخط برای برخی پارامترهای خاص سازمانی و آن‌هم اغلب پارامترهای هیدرولوژیکی آب شامل فشار، دبی، ارتفاع آب و برخی پارامترهای آلودگی محدود مانند pH، کدورت، رسانایی و غلظت کلر استفاده می‌کند. همچنین اداره شیلات یا آبخیزداری به روش‌های دستی و سنتی، اعزام کارشناسان به محل موردنظر و نمونه‌گیری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و غیره برای پایش آلودگی آب متکی است و بر اندازه‌گیری پارامترهایی مانند دما، اکسیژن، آمونیاک و آمونیوم تأکید دارد.

فلوچارت کلی مراحل روش سنتی و مرسوم که در اکثر سازمان‌ها برای سنجش پارامترهای آب رودخانه‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد. همانطوری‌که در شکل (۲) مطرح‌شده، آموزش کارشناسان مربوطه با روند کار سنجش و تهیه نمونه‌های مناسب از مکان‌های موردنظر در زمان‌های مشخص جز اولین مراحل روش موجود است. همچنین مشکلات موجود در هر مرحله با روش دلفی–فازی و تاییدکارشناسان مربوطه شناسایی که در شکل (۲) به‌طور مختصر نشان داده است.



شکل ۲. فلوچارت روش سنتی و مرسوم موجود در اکثر سازمان‌ها برای سنجش پارامترهای آب رودها و مشکلات موجود در هر مرحله

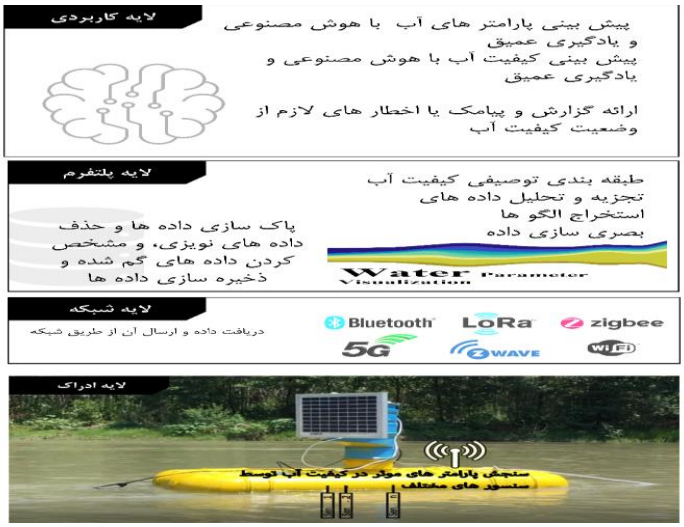
برخی از این چالش‌ها شامل کمبود نیروی ماهر برای نمونه‌برداری و اندازه‌گیری، طولانی بودن دوره‌های نمونه‌برداری، کاهش دقت به دلیل مداخله انسانی، خطرات بهداشتی و بیماری برای کارکنان، هزینه‌های بالا، نیاز به ظروف تمیز و نگهداری مناسب آن‌ها، الزام سرعت و دقت در انتقال نمونه به آزمایشگاه‌ها، پیچیدگی محاسبات و تبدیل واحدها برای شناسه‌های کیفی است. این چالش‌ها در شکل (۲) نشان داده‌شده است.

با توجه به در این پژوهش صورت گرفته در شناسایی مشکلات در روش مرسوم پایش کیفیت آب و همچنین افزایش داده‌های استخراج‌شده از آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها، دقت کم همراه نتایج با هزینه بالای آزمایش‌ها، تعداد زیاد رودخانه‌ها و غیره، همه کارشناسان موافق استفاده از فناوری‌های جدید مانند اینترنت اشیا، رایانش ابری و هوش مصنوعی برای سنجش پارامترهای آب بودند. نتایج این پژوهش، با نظر الصریفی و همکاران (۱۴۰۲) مطابقت داشت. برخی از نیازمندی‌های جدید سازمان‌ها عبارت‌اند از: نیاز به فناوری برخط برای جمع‌آوری داده‌های سنسورها و ذخیره‌سازی دیجیتالی داده‌ها در بانک‌های اطلاعاتی است. همچنین پاک‌سازی خطای داده‌های ارسالی از سنسورها شامل داده‌های گم‌شده[1]، داده‌های خارج از محدوده[2] و آنالیز داده‌ها با عملیات پیش‌پردازش داده‌های حوزه‌های دیگر مشترک است. از دیگر نیازمندی‌های استخراج‌شده از نظرات کارشناسان؛ تحلیل تغییرات پارامترها و ارتباط بین پارامترها، طبقه‌بندی هوشمندانه توصیف کیفیت آب، پیش‌بینی آن، وضعیت هر پارامتر در آینده و نهایتاً بصری سازی نتایج و ارائه گزارش‌های برخط مختلف است. لازم به ذکر است که برخی از این نیازمندی‌های استخراج‌شده در این پژوهش با نتایج دیگر پژوهشگران مانند شکوهی و همکاران (۲۰۱۹)، قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، الف) و در قمرنیا و همکاران (۱۴۰۲، ب) مطابقت دارد.

ارائه یک سیستم مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش برخی از پارامترهای سنجش آب

در جهت کاهش مشکلات شناسایی‌شده و برآورده ساختن نیازمندی‌های جدید، یک سیستم چهار لایه‌ای مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش پارامترهای کیفیت آب که شامل لایه ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است ارائه گردید که بلاک دیاگرام[3] کلی آن در شکل (۳) نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که مدل چهار لایه‌ای در منابع نمودیا و آجانکار[4] (۲۰۲۳) و کومار و همکاران[5] (۲۰۱۹) اشاره‌شده است. در لایه ادارک با استفاده از سنسورهای مختلف، برای مثال دما، کدورت، میزان اسیدیته یا بازیته بودن آب و غیره اندازه‌گیری و سپس تبدیل به داده‌های رقمی می‌شوند و از طریق لایه شبکه به لایه پلتفرم ابری ارسال می‌شوند. دراین‌بین امکان نویزی شدن و از دست رفتن برخی از داده‌ها وجود دارد که با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی و پیش‌پردازش، عملیات پاک‌سازی داده‌ها صورت می‌گیرد و درنهایت جهت بهره‌برداری توسط الگوریتم‌های هوش مصنوعی، الگوهای مناسب مانند تأثیر پارامترها بر هم و شاخص کیفیت آب محاسبه و به‌صورت بصری سازی در لایه کاربرد نمایش داده می‌شود. لازم است اشاره گردد در این شکل، لایه ادارک با سیستم سخت‌افزار طراحی و پیاده‌سازی شده جایگزین شده است. در این لایه انواع سنسورها برای اندازه‌گیری پارامترهای مختلف مورداستفاده قرار می‌گیرد.

[1] Missing values
[2] Outliers
[3] Block Diagram
[4] Nimodiya and Ajankar
[5] Kumar et al



شکل ۳. نمونه پیاده‌سازی اولیه، پیشنهادشده بر پایه فناوری اینترنت اشیا برای سنجش کیفیت برخی از پارامترهای آب

جدول ۲. نمونه‌هایی از سنسورهای مختلف، همراه با ویژگی‌ها و مشخصات فنی آن‌ها که برای اندازه‌گیری ۹ پارامتر کیفیت آب طبق استاندارد NSFWQI همراه با روش سنتی مورداستفاده برای سنجش پارامترها.

پارامتر	نام سنسور	نمونه سنسور سنجش در فناوری اینترنت اشیا	روش‌های سنجش سنتی
Dissolved Oxygen (DO)	Dissolved Oxygen Sensor	Hach LDO Model	پروب‌های الکتروشیمیایی، روش وینکلر (Winkler)
pH	pH Sensor	Hanna Instruments HI98191	pH متر الکتریکی، معرف‌های شیمیایی و کاغذهای تست pH
Temperature	Temperature Sensor	DS18B20 (Maxim Integrated)	ترمومترهای دیجیتال یا الکترونیکی
Nitrate (NO3-)	Nitrate Sensor	Vernier NO3-BTA	اسپکتروفتومتر، الکترودهای یون‌سنج
Phosphate (PO4-)	Phosphate Sensor	Eutech Instruments PC 450	اسپکتروفتومتر
Turbidity	Turbidity Sensor	YSI 6136 Turbidity Sensor	توربیدیمتر
Total Dissolved Solids (TDS)	TDS Sensor	HM Digital TDS-3	TDS متر
Biochemical Oxygen Demand (BOD)	BOD Sensor (Indirect measurement via DO)	In-Situ RDO PRO-X	انکوباسیون ۵ روزه در ۲۰ درجه سانتی‌گراد و اندازه‌گیری کاهش DO
Heavy Metals	Specific Heavy Metal Sensors (Indirect measurement)	YSI EXO2 (for multiple metals)	اسپکترومتری جذب اتمی (AAS)، طیف‌سنجی جرمی پلاسما جفت شده القایی (ICP-MS)

کالیبراسیون سنسورها

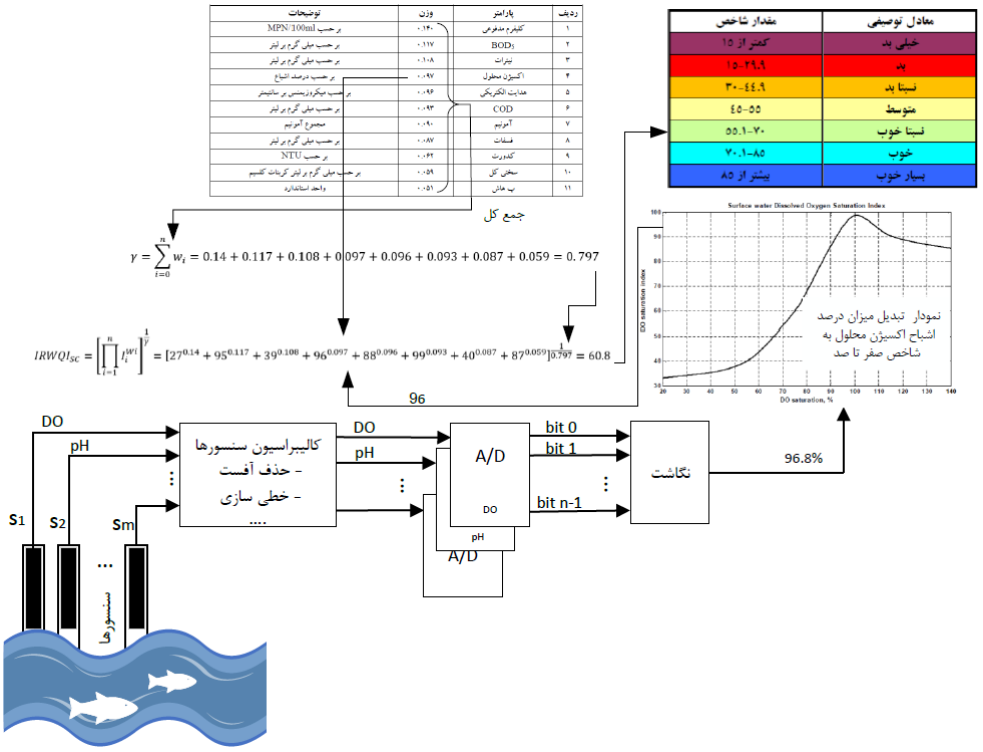
یکی از کارهای اساسی که در نصب و راه‌اندازی سنسورهای اشاره‌شده در جدول (۲) باید انجام داد، کالیبراسیون یا تنظیم دقیق سنسورها است که دارای عملکرد درست و بدون خطا در محیط عملیاتی باشند. به‌عبارت‌دیگر، مقدار اندازه‌گیری شده توسط یک سنسور باید به‌طور دقیق به مقدار واقعی پارامتر نگاشت شود. شاخص کیفیت سنسورها بر اساس دقت اندازه‌گیری، وضوح سرعت تولید داده تعیین می‌شود. دقت اندازه‌گیری به معنای توانایی سنسور در ارائه نتایج برابر با مقدار واقعی است. وضوح یا رزولوشن[۱] سنسور نیز بیانگر حساسیت و توانایی آن در تشخیص تغییرات کوچک و ناچیز در پارامترهای مورداندازه‌گیری است. سرعت تولید داده نیز یکی دیگر از شاخص‌های مهم است که نشان‌دهنده توانایی سنسور در ارائه سریع و به‌موقع داده‌ها از پارامترهای سنجیده شده است. جدا از کیفیت ذاتی سنسورها، عواملی مانند نویزی شدن در مسیر انتقال سیگنال و هیسترزیس یا پسماند اثر می‌توانند باعث ایجاد خطا در عملکرد سنسورها شوند. نویزی شدن می‌تواند به دلیل تداخلات ناشی از قرارگیری در میدان‌های مغناطیسی، الکتریکی و یا الکترومغناطیسی یا دیگر منابع نویز در مسیر انتقال سیگنال رخ دهد و هیسترزیس نیز می‌تواند ناشی از تغییرات شرایط محیطی یا ویژگی‌های مواد سازنده سنسور باشد. این خطاها باعث انحراف داده‌ها از مقدار واقعی شده و نیاز به اصلاح دارند.

شکل (۴) یک نمای کلی از تنظیم این مقادیر اندازه‌گیری شده به مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴) عملکرد سنسورها معمولاً با چند مشکل از قبیل افست اندازه‌گیری، غیرخطی بودن بازه سنجش و سایر موارد مواجه می‌شوند. خطای افست به معنای وجود اختلاف ثابت و همیشگی بین مقدار اندازه‌گیری شده و مقدار واقعی است، درحالی‌که مشکل غیرخطی بودن به عدم تطابق خطی بین ورودی و خروجی سنسور اشاره دارد. همه این مشکلات باید با فرایند کالیبراسیون یا تنظیم مؤلفه‌های سنسورها حل شوند. علاوه بر این، سنسورها به دلایل مختلف ازجمله تفاوت‌های ساخت حتی در انواع مشابه، تأثیر شرایط محیطی، فرسودگی ناشی از استفاده مداوم، نیاز به کالیبراسیون دوره‌ای و یا تعویض دارند. خروجی تنظیم‌شده سنسورها که معمولاً به‌صورت آنالوگ است توسط مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال (A/D) تبدیل می‌شوند. مقادیر دیجیتالی و رقمی با استفاده از تابع نگاشت به مقادیر واقعی پارامتر مربوطه تبدیل می‌شوند. مقادیر واقعی پارامترها با استفاده از نمودار انتقالی، تبدیل به مقادیر نرمال‌سازی می‌شود و بعد با استفاده از جدول مربوطه وزن پارامتر موردنظر به دست می‌آید و درنهایت کیفیت سنجش آب تعیین می‌گردد. در شکل (۴) عملیات فوق برای پارامتر اکسیژن محلول (DO) نشان داده‌شده است.

روش کالیبراسیون استفاده‌شده در دستگاه‌های سنجش آلودگی آب رودخانه با فناوری اینترنت اشیا شامل دو مرحله اصلی است. در مرحله اول، از آبی که مقادیر پارامترهای آن از قبل در یک آزمایشگاه مجهز مشخص تعیین‌شده است (محلول استاندارد) برای کالیبراسیون سنسور استفاده می‌گردد. سپس مقادیر سنجیده شده توسط سنسور با مقادیر تجهیزات استاندارد آزمایشگاهی برای یک نمونه آب نامشخص مقایسه می‌شوند. این مقایسه به تنظیم و تصحیح داده‌های سنسور کمک می‌کند تا اطمینان حاصل شود که داده‌های حاصله دقیق و قابل‌اعتماد هستند. این روش کالیبراسیون، تضمین می‌کند که دستگاه‌های سنجش آلودگی آب می‌توانند به‌درستی شرایط آلودگی را ارزیابی کرده و نتایج دقیق‌تری ارائه دهند.

---

[۱] روزلوشن در تشخیص یک سنسور به معنای دقت یا توانایی سنسور در تشخیص و اندازه‌گیری تغییرات کوچک در محیط است. به طور خاص، روزلوشن به میزان کوچک‌ترین تغییر قابل تشخیص توسط سنسور اشاره دارد.



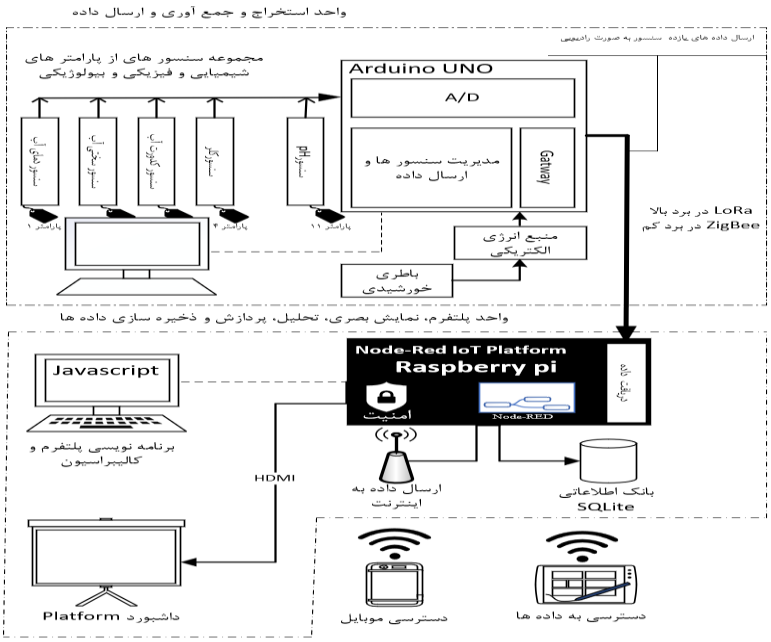
شکل ٤. مراحل کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای سنجیده شده و نگاشت آن‌ها به مقادیر واقعی و محاسبه سنجش کیفیت آب.

در این پژوهش با توجه به نتایج به‌دست‌آمده و امکان تهیه سنسورها به لحاظ دسترس بودن و بودجه تحقیق، پنج سنسور انتخاب شد تا عملکرد و اجرای ساختار اینترنت اشیا ارائه‌شده مورد ارزیابی قرار گیرد. درنهایت برای کنترل صحت عملکرد سنسورها مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها با تجهیزات کالیبره آزمایشگاه مقایسه شد.

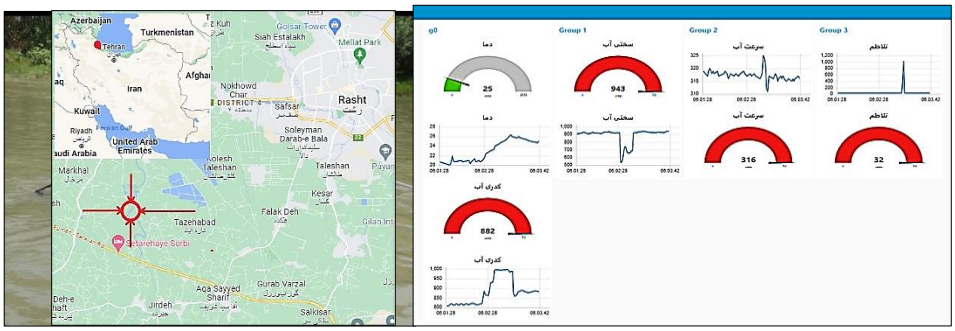
نمونه سخت‌افزاری طراحی و پیاده‌سازی گردید که در شکل (۵) نشان داده‌شده است. لازم به ذکر است که این سیستم به‌طور واقعی در رودخانه پسیخان در ۱۰ کیلومتری رشت مورد تست و ارزیابی قرار گرفت. با انجام مطالعات دقیق، یک راهکار مناسب برای ساخت شناور، استفاده از لوله‌های پلیکا با قطر بالا به‌عنوان ماده‌ای مقاوم در برابر آب انتخاب گردید. شکل (۶) داشبورد مدیریت بصری سازی داده‌ها، همچنین یک نمونه از دستگاه ساخته‌شده و مکان جغرافیای نصب و راه‌اندازی دستگاه را نشان می‌دهد. دستگاه بعد از سنجش پارامترهای مختلف کیفیت آب، داده‌های مربوطه را بر طبق استانداردهای لازم و دوره‌های زمانی تعریف‌شده به پلتفرم ابری ارسال و در پایگاه داده ذخیره و مورد پردازش و بصری سازی قرار می‌گیرند. لازم به ذکر است که کلیه مراحل طراحی، پیاده‌سازی، پروتکل‌های استفاده‌شده، کدهای برنامه‌نویسی شده در ماژول آردینو و رزپری‌پای، داده‌های جمع‌آوری‌شده از محیط واقعی و غیره در سایت گیت هاب[1] گزارش‌شده است.

شکل (۵) جزییات بیشتری از لایه ادارک که شامل سخت‌افزارها از قبیل آردینو، رزپری‌پای، سنسورها، منابع تغذیه انرژی و غیره است را نمایش می‌دهد (میربهاری و همکاران، ۱۴۰۲).

[1] https://github.com/Mirbahariuni/Mirbahariuni-Designing-a-device-based-on-the-Internet-of-Things-to-detect-water-quality/issues



شکل ۵. جزییات سخت‌افزاری سیستم پیشنهادشده برای پایش کیفیت آب مبتنی بر اینترنت اشیا (میر بهاری و همکاران، ۱۴۰۲).



شکل ٦. داشبورد نمایش پارامترها در پلتفرم اینترنت اشیا، یک نمونه از دستگاه سنجش کیفیت آب رودخانه و محل جغرافیایی تست دستگاه ساخته شده (میربهاری و همکاران، ۱۴۰۲).

بحث

سنجش کیفیت آب مخصوصاً کیفیت آب رودخانه‌ها یک فرآیند بسیار مهمی است که در برخی از سازمان‌ها از قبیل محیط‌زیست، آب و فاضلاب و اداره شیلات و غیره به روش سنتی و معمولاً دستی انجام می‌گیرد. در این فرآیند کارشناسان خبره در بازه‌های زمانی مشخص به مکان‌های تعیین‌شده در مسیر رودخانه‌ها اعزام و برخی از پارامترها را در همان مکان اندازه‌گیری و برخی دیگر از پارامترها را با نمونه‌گیری از آب و انتقال نمونه‌های آب به آزمایشگاه اندازه‌گیری و درنهایت کیفیت آب محاسبه می‌شود. در این پژوهش با کمک روش دلفی–فازی اولویت‌بندی پارامترهای مؤثر در کیفیت آب و همچنین مشکلات موجود در فرآیند دستی سنجش کیفیت آب با کمک کارشناسان و خبرگان از طریق پرسشنامه و مصاحبه انجام شد.

نتیجه‌گیری

تجزیه‌وتحلیل داده‌های جمع‌آوری‌شده به روش دلفی–فازی با محاسبه امتیازات کسب‌شده با نرم‌افزار پایتون در پنل خبرگان نشان داد که پارامترهای سنجش فلزات سنگین بیشترین و کلروفیل a کمترین میزان اهمیت را در سنجش کیفیت آب دارند. بعلاوه مشکلات در روش‌های سنتی و مرسوم کیفیت آب مستلزم ارسال کارشناسان خبره آب با تجهیزات مناسب در زمان مناسب به مکان‌های مربوطه است که این روال هزینه زیادی را برای سازمان‌ها دارد و نیز وقت‌گیر است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از سنجش، در برخی موارد قدیمی شده و اعتبار لازم را نخواهد داشت. همچنین نمونه‌برداری از آب در برخی موارد به علت محدودیت‌ها در ظروفی صورت می‌گیرد که مناسب نیستند، لذا لزوم سنجش برخط بیشتر احساس می‌گردد، علاوه بر این‌ها کارشناسان عقیده داشتند که با توجه به نیازهای یادشده باید از فناوری‌های جدید هوش مصنوعی و اینترنت اشیا برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و پردازش و استخراج الگوها از داده‌ها استفاده شود. تحقیق انجام‌شده و نتایج آن منجر به پیشنهاد سیستمی مبتنی بر اینترنت اشیا برای سنجش کیفیت آب رودخانه‌ها گردید. این سیستم شامل مجموعه از سخت‌افزارها و نرم‌افزارها در چهار لایه، ادراک، شبکه، پلتفرم ابری و کاربردی است. سنسورهای مختلفی با توجه به امکان تهیه و دسترسی، در لایه ادراک برای سنجش پارامترهای اولویت‌دار مورداستفاده قرار گرفتند. داده‌های جمع‌آوری‌شده در لایه پلتفرم توسط الگوریتم‌های مختلف پاک‌سازی می‌شوند و می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی و داده‌کاوی، الگوهای مناسب را استخراج کرد. این سیستم پیشنهادی علاوه بر برطرف کردن مشکلات روش‌های مرسوم سنتی، توانایی برآورده کردن نیازمندی‌هایی جدید را که مبتنی بر استفاده از هوش مصنوعی هستند دارا است.

تقدیر و تشکر

از آقای دکتر محمود مرادی استاد گروه مدیریت دانشگاه گیلان که در مراحل طراحی پرسشنامه محقق ساخته برای اجرای مصاحبه پنل دلفی، انتخاب متدولوژی تحقیق و نظارت بر روند تحقیق با ما همکاری داشتند تشکر و قدردانی می‌نماییم. همچنین از همه کارشناسان محترم سازمان محیطزیست استان، از کارشناسان آزمایشگاه اداره آب و فاضلاب و موسسه تحقیقات بین‌المللی تاسماهیان دریای خزر ازجمله خانم دکتر کلانتری، خانم دکتر حجاری، خانم دکتر موسوی و آقای دکتر محمود محسنی که در روند پژوهش از ابتدا تا انتها با نظرات تخصصی خود ما را در انجام این پژوهش یاری نمودند، همچنین از آقای پروفسور علی رسول زاده از دانشکده مهندسی آب دانشگاه محقق اردبیلی، خانم دکتر فرزانه آزادی از دانشگاه فنی و حرفه‌ای در حوزه شیمی تجزیه، نهایت تشکر و قدردانی را می نماییم.

منابع

آشوری، رضا.، امامقلی زاده، صمد.، حاجی کندی، هومن.، و جمالی، سعید. (۱۴۰۲). بررسی تغییرات مکانی فرونشست دشت دامغان و پیش‌بینی آن با استفاده مدل شبکه عصبی مصنوعی. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۳)، ۸۷-۶۸. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9801.1065

الصریفی، رسول جواد.، عباس.، شیرین آبادی، رضا.، ربیعی فر، حمید رضا.، و نجارچی، محسن. (۱۴۰۲). پیش بینی نوسانات تراز آب زیرزمینی دشت سنقر با استفاده از روشهای یادگیری ماشین. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۴(۱)، ۱۱۸-۹۹. https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10418.1117

حسنی، قاسم.، محوی، امیرحسین.، ناصری، سیمین.، عرب علی بیک، حسین.، یونسیان، مسعود.، و قریبی، حامد. (۱۳۹۰). طراحی شاخص کیفی آب های زیرزمینی با استفاده از منطق فازی. http://healthjournal.arums.ac.ir/article-1-79-fa.html

سازمان شیلات ایران. (۱۳۹۷). دستورالعمل اجرایی نظارت و کنترل بر کیفیت آب در مراکز تکثیر. معاونت توسعه آبزی پروری: معاونت توسعه آبزی پروری. https://www.fisheries.ir/Articlefile/.docx

شاهینی، شبنم.، فرج پهلو، عبدالحسین.، خادمی زاده، شهناز.، و نادران طحان، مرجان. (۱۴۰۲). ارائه معماری پیشنهادی به کارگیری اینترنت اشیاء در کتابخانه‌های دانشگاهی ایران. پژوهشنامه پردازش و مدیریت اطلاعات، ۳۸(۴)، ۱۴۹۸-۱۴۵۷. https://doi.org/10.22034/jipm.2023.701680

صفائیان توپکانلو، الهه.، مظاهری، سید احمد.، و ملکزاده شفارودی، آزاده. (۱۳۹۵). بررسی کیفیت آب با استفاده از شاخصهای کیفی منابع آب معدن فیروزه نیشابور (شمال غرب شهرستان نیشابور، خراسان رضوی). هفتمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران، مشهد، ایران. https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1049398.html

قمرنیا، هوشنگ.، پالاش، زلیخا.، و پالاش، میثم. (۱۴۰۲، الف). ارزیابی کیفیت آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص NSFWQI. فناوری های پیشرفته در بهره وری آب، ۳(۲)، ۶۷-۵۱. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9040.1048

قمرنیا، هوشنگ.، پالاش، زلیخا.، و پالاش، میثم. (۱۴۰۲، ب). بررسی کیفی آب رودخانه گلین در استان کرمانشاه با استفاده از شاخص کیفیت آب کانادا (CWQI) جهت احداث مراکز پرورش ماهی. محیط زیست و مهندسی آب، ۳(۳)، ۳۳۴-۳۲۰. https://doi.org/10.22034/ewe.2022.339853.1771

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور. (۱۳۸۸). دستورالعمل پایش کیفیت آب های سطحی (جاری) (نشریه شماره ۵۲۲). معاونت نظارت راهبردی دفتر فنی و اجرایی: وزارت نیرو، دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا. https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/522-s.pdf

معاونت محیط زیست انسانی. (۱۳۹۲). شاخص کیفیت آب کشور و طبقه بندی آن. بهمن ۱۳۹۲. دفتر آب و خاک: سازمان حفاظت محیط زیست. https://dl.hsenk.ir/uploads/2023/06/HSEnk-2154.pdf

میربهاری، سید هاشم.، شاه بهرامی، اسدالله.، و پورذاکر عربانی، سودابه. (۱۴۰۲). شناسایی چالش‌های پایش کیفیت آب و ارائه راهکاری فناورانه مبتنی بر اینترنت اشیا، نخستین کنفرانس ملی اینترنت اشیا با تمرکز بر صنعت کشاورزی، اهواز، ایران.https://civilica.com/doc/1905139

یادگاری، فاطمه.، و آسوشه، عباس. (۱۴۰۲). ارائه مدل خدمات بیمارستان هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیاء. مجله انفورماتیک سلامت و زیست پزشکی، ۹(۴)، ۲۷۶-۲۶۷. http://dx.doi.org/10.34172/jhbmi.2023.06

References

Al-Sarifi, A. R. J., Shirinabadi, R., Rabieifar, H. R., & Najarchi, M. (2024). Prediction of groundwater level fluctuations in Songhor plain using machine learning methods. Advanced Technologies in Water Productivity, 4(1), 99-118. https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10418.1117 [In Persian]

American Public Health Association. (2023), American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24th ed. Washington DC: APHA Press. https://www.standardmethods.org/doi/10.2105/SMWW.2882.219

Ashoori, R., Imamgholizadeh, S., Hajikandi, H., & Jamali, S. (2023). Investigation of spatial changes in the subsidence of Damghan plain and its prediction using artificial neural network model. Advanced Technologies in Water Productivity, 3(3), 68-87. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9801.1065 [In Persian]

Deputy of Human Environment. (2014). Environmental quality index of the country and its classification. Water and Soil Office: Environmental Protection Organization. https://dl.hsenk.ir/uploads/2023/06/HSEnk-2154.pdf [In Persian]

Deputy of Planning and Strategic Supervision of the President. (2009). Guidelines for monitoring the quality of surface waters (Publication No. 522). Strategic Supervision Deputy, Office of Technical and Executive: Ministry of Energy, Office of Water and Wastewater Engineering Standards. https://waterstandard.wrm.ir/uploaded_files/DCMS/WRMResearch_files/522-s.pdf [In Persian]

Dhok, R. P. (2020). Water Quality Index of Groundwater of Karha River Basin Area, Baramati, India. Journal of Emerging Technologies and Innovation Research, 7, 280-289.

Ghamarnia, H., Palash, Z., & Palash, M. (2023a). Evaluation of water quality of Golin River in Kermanshah Province using NSFWQI index. Advanced Technologies in Water Productivity, 3(2), 51-67. https://doi.org/10.22126/atwe.2023.9040.1048 [In Persian]

Ghamarnia, H., Palash, Z., & Palash, M. (2023b). Evaluation of the water quality of Golin River in Kermanshah Province using the Canadian Water Quality Index for establishing fish farming centers. Environmental and Water Engineering, 9(3), 320-334. https://doi.org/10.22034/ewe.2022.339853.1771 [In Persian]

Haq, K. R. A., & Harigovindan, V. P. (2022). Water quality prediction for smart aquaculture using hybrid deep learning models. Ieee Access, 10, 60078-60098.

Hassani, Q., Mahvi, A., Naseri, S., Arabalibeyk, H., Younesian, M., & Gharibi, H. (2012). Designing a groundwater quality index using fuzzy logic. Retrieved from http://healthjournal.arums.ac.ir/article-1-79-fa.html [In Persian]

https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3bb3f82ffeef4525885c362144343119be5040ab

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3180482

https://eprints.glos.ac.uk/id/eprint/6781

https://www.researchgate.net/profile/Rajaram-Dhok/publication/358659911_water_quality_index_of_groundwater_of_karha_river_basin_area_baramati_india/links/620dfaeef02286737ca4ce35/water-quality-index-of-groundwater-of-karha-river-basin-area-baramati-india.pdf

Im, Y., Song, G., Lee, J., & Cho, M. (2022). Deep learning methods for predicting tap-water quality time series in South Korea. Water, 14(22), 3766. https://doi.org/10.3390/w14223766

Iran Fisheries Organization. (2019). Executive guidelines for monitoring and controlling water quality at reproduction centers (Version 1, Document Code: MT/02/031). Aquaculture Development Deputy: Iran Fisheries Organization. https://www.fisheries.ir/Articlefile/.docx [In Persian]

Kachroud, M., Trolard, F., Kefi, M., Jebari, S., & Bourrié, G. (2019). Water quality indices: Challenges and application limits in the literature. Water, 11(2), 361. https://doi.org/10.3390/w11020361

Kumar, S., Tiwari, P., & Zymbler, M. (2019). Internet of Things is a revolutionary approach for future technology enhancement: a review. Journal of Big data, 6(1), 1-21. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0268-2

McCabe، M. F., Rodell, M., Alsdorf, D. E., Miralles, D. G., Uijlenhoet, R., Wagner, W., & Wood, E. F. (2017). The future of Earth observation in hydrology. Hydrology and earth system sciences, 21(7), 3879-3914. https://doi.org/10.5194/hess-2017-54

Mirbahari, S. H., Shahbahrami, A., & Arabani, S. P. (2023). Identification of challenges in water quality monitoring and presentation of a technological solution based on the Internet of Things. First National Conference on Internet of Things with a focus on agriculture industry, Ahvaz, Iran. https://civilica.com/doc/1905139 [In Persian]

Nandi, B. P., Singh, G., Jain, A., & Tayal, D. K. (2024). Evolution of neural network to deep learning in prediction of air, water pollution and its Indian context. International Journal of Environmental Science and Technology, 21(1), 1021-1036. https://doi.org/10.1007/s13762-023-04911-y

Nasir, N., Kansal, A., Alshaltone, O., Barneih, F., Sameer, M., Shanableh, A., & Al-Shamma'a, A. (2022). Water quality classification using machine learning algorithms. Journal of Water Process Engineering, 48, 102920. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102920

Nechibvute, A., & Mudzingwa, C. (2013). Wireless sensor networks for scada and industrial control systems. International Journal of Engineering and Technology, 3(12), 1025-1035.

Niknam, A. R. R., Sabaghzadeh, M., Barzkar, A., & Shishebori, D. (2024). Comparing ARIMA and various deep learning models for long-term water quality index forecasting in Dez River, Iran. Environmental Science and Pollution Research, 1-17. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32228-x

Nimodiya, A. R., & Ajankar, S. S. (2022). A Review on Internet of Things. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology, 113(1), 135-144. https://www.researchgate.net/profile/Aditi-Nimodiya/publication/357783537_A_Review_on_Internet_of_Things/links/649ba1b095bbbe0c6ef8f8cb/A-Review-on-Internet-of-Things.pdf

Noori, A., Bonakdari, H., Morovati, K., & Gharabaghi, B. (2020). Development of optimal water supply plan using integrated fuzzy Delphi and fuzzy electre III methods—Case study of the Gamasiab basin. Expert Systems, 37(5), e12568. https://doi.org/10.1111/exsy.12568

Parker, C., Scott, S., & Geddes, A. (2019). Snowball sampling. SAGE research methods foundations.

Rangzan, K., Kabolizadeh, M., & Karimi, D. (2020). Evaluation of Sentinel-2 and Landsat-8 Satellite images capability and evaluation of image fusion capability in seasonal zoning of NSFWQI and IRWQIsc qualitative indices in surface water. Geography and Environmental Planning, 31(1), 73-102. https://doi.org/10.22108/gep.2020.123228.1309

Saeed, A., Alsini, A., & Amin, D. (2024). Water quality multivariate forecasting using deep learning in a West Australian estuary. Environmental Modelling & Software, 171, 105884. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105884

Safaian Toopkanloo, E., Mozaheri, S. A., & Malekzadeh Shafaroudi, A. (2015). Assessment of water quality using quality indices of Firouzeh mineral water resources in Nishapur (northwest of Nishapur city, Razavi Khorasan). Seventh Symposium of the Iranian Economic Geology Association, Mashhad, Iran. https://profdoc.um.ac.ir/paper-abstract-1049398.html [In Persian]

Shahini, S., Farajpahlou, A., Khadami Zadeh, S., & Naderan Tahan, M. (2023). Presenting a proposed architecture for employing the Internet of Things in Iranian academic libraries. Journal of Information Processing and Management, 38(4), 1457-1498. https://doi.org/10.22034/jipm.2023.701680 [In Persian]

Shamsuddin, I. I. S., Othman, Z., & Sani, N. S. (2022). Water quality index classification based on machine learning: A case from the Langat River Basin model. Water, 14(19), 2939. https://doi.org/10.3390/w14192939

Shokoohi, A. R., & Modaberi, H. (2019). Evaluating and comparing the sensitivity of NSFWQI and IRWQISC models to water quality parameters. Iran-Water Resources Research, 14(5), 118-132. https://www.iwrr.ir/article_65746_en.html?lang=fa

Vellingiri, J., Kalaivanan, K., Gopinath, M. P., Gobinath, C., Subramaniam, P. R., & Rangarajan, S. (2023). Strategies for classifying water quality in the Cauvery River using a federated learning technique. International Journal of Cognitive Computing in Engineering, 4, 187-193. https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2023.04.004

Vo, D. T., Nguyen, X. P., Nguyen, T. D., Hidayat, R., Huynh, T. T., & Nguyen, D. T. (2021). A review on the internet of thing (IoT) technologies in controlling ocean environment. Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects, 1-19. https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1960932

Wang, Y., Zhou, J., Chen, K., Wang, Y., & Liu, L. (2017). Water quality prediction method based on LSTM neural network. In 2017 12th international conference on intelligent systems and knowledge engineering (pp. 1-5). IEEE. https://doi.org/10.1109/ISKE.2017.8258814

William, P., Oyebode, O. J., Ramu, G., Gupta, M., Bordoloi, D., & Shrivastava, A. (2023). Artificial intelligence-based models to support water quality prediction using machine learning approach. In 2023 International Conference on Circuit Power and Computing Technologies, 1495-1501. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICCPCT58313.2023.10245020

Yadegari, F., & Asoosheh, A. (2023). Presenting a smart hospital services model based on the Internet of Things. Journal of Health and Biomedical Informatics, 9(4), 267-276. http://dx.doi.org/10.34172/jhbmi.2023.06 [In Persian]

Zainurin, S. N., Wan Ismail, W. Z., Mahamud, S. N. I., Ismail, I., Jamaludin, J., Ariffin, K. N. Z., & Wan Ahmad Kamil, W. M. (2022). Advancements in monitoring water quality based on various sensing methods: a systematic review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(21), 14080. https://doi.org/10.3390/ijerph192114080

Zhi, W., Appling, A. P., Golden, H. E., Podgorski, J., & Li, L. (2024). Deep learning for water quality. Nature Water, 1-14. https://doi.org/10.1038/s44221-024-00202-z