Research Paper

Analysis of water quality of urban wells in Mahmoudabad with WQI and NSFWQI indices and a multidimensional approach

Fatemeh Heidari Chenari[1], Mojtaba Khoshravesh[2*]

[1] Ph.D. student in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (f.heydari.1997@gmail.com).
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (khoshravesh_m24@yahoo.com).

10.22125/iwe.2026.569176.1917

Received:
December 28, 2025
Accepted:
March 16, 2026
Available online:
June 25, 2026

Keywords:
Groundwater, Correlation Analysis, Clustering, Water Quality Index (WQI), Drinking Water Quality.

Abstract

Drinking water quality is one of the most important components of public health and sustainable water resource management, and its continuous assessment, especially in urban areas, is of particular importance. In this study, the quality of drinking water wells in Mahmoudabad County was evaluated using the Water Quality Index (WQI) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). The dataset included physical and chemical parameters such as pH, nitrate, total hardness, chloride, sulfate, total dissolved solids, turbidity, and temperature during the period 2020–2025. To achieve a more comprehensive evaluation, in addition to calculating water quality indices, Pearson correlation analysis was applied to examine the relationships among parameters, and the k-means clustering method was used to classify samples into groups with similar quality characteristics. The results indicated that the general water quality in most urban wells of Mahmoudabad ranged from good to excellent; however, in some samples higher index values reflected a relative decline in water quality and the sensitivity of groundwater resources to land-use changes and agricultural activities. Correlation analysis revealed consistent behavior among parameters such as total hardness, sulfate, and total dissolved solids, as well as the significant role of nitrate in reducing water quality. Furthermore, clustering analysis highlighted the spatial variability of water quality and the influence of hydrogeological conditions and human activities. The findings of this study demonstrate the effectiveness of a multidimensional approach for monitoring, management, and targeted planning of urban drinking water resources.

1. Introduction

Access to safe drinking water is one of the most fundamental requirements for human health, sustainable urban development, and environmental protection. In northern Iran, particularly in Mahmoudabad County, Mazandaran Province, groundwater extracted from municipal wells serves as the primary source of drinking water. Rapid urbanization, population growth, intensive agricultural practices, and expansion of tourism have increased the pressure on groundwater resources, raising concerns regarding both sustainability and water quality. Contamination of groundwater may originate from both natural geochemical processes and anthropogenic activities, including fertilizer application, wastewater leakage, and urban land use changes. These pressures necessitate comprehensive and continuous

* **Corresponding Author:** Mojtaba Khoshravesh
Address: Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
Email: (khoshravesh_m24@yahoo.com)
Tel: 011-33687575

monitoring to ensure public health and sustainable management of water resources. Water quality indices, such as the Water Quality Index (WQI) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), have been widely applied as tools to integrate multiple physical and chemical water parameters into a single, interpretable number. WQI provides a weighted assessment of parameters relative to their permissible standards, while NSFWQI incorporates nine key parameters reflecting health and environmental importance, allowing standardized comparison across regions and periods. While these indices offer valuable insights, using them in isolation may not capture the complete picture of water quality variability or the complex interactions among parameters. Therefore, a multidimensional approach that combines indices with statistical analyses such as correlation and clustering provides a more comprehensive assessment of water quality patterns, supports targeted interventions, and informs sustainable management strategies.

2. Materials and Methods

The study was conducted on groundwater wells supplying drinking water in urban areas of Mahmoudabad, Mazandaran Province, Iran. The region is characterized by a humid Caspian climate with relatively high rainfall and humidity, and its urban expansion, population density, agricultural activity, and tourism infrastructure place significant pressure on local groundwater resources. A total of seven wells were selected across the city to represent the spatial distribution of the urban water supply network. Physicochemical parameters including pH, nitrate, total hardness, chloride, sulfate, total dissolved solids (TDS), temperature, and turbidity were measured over the period 2020–2025 to assess the temporal and spatial variability of water quality. To evaluate water quality, two commonly used indices were employed: the Water Quality Index (WQI) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). These indices integrate multiple water quality parameters into a single representative value, providing a clear and comparable measure of overall water quality. Both indices allowed the assessment of water suitability for drinking purposes and highlighted potential areas of concern. Statistical analyses were applied to provide deeper insight into the relationships among water quality parameters. Pearson correlation analysis was used to identify linear relationships between variables, allowing the detection of parameters that behave similarly or influence each other. This helped to understand the combined effects of natural geological processes and anthropogenic activities on groundwater quality. In addition, k-means clustering was employed to classify wells into distinct groups based on water quality characteristics. This method grouped wells with similar chemical compositions and index scores together, revealing spatial patterns of water quality, highlighting areas with higher mineralization or contamination, and supporting targeted management and monitoring strategies. By combining water quality indices with correlation and clustering analyses, a multidimensional approach was applied to comprehensively assess urban groundwater quality and identify critical zones for sustainable resource management.

3. Results

The results of this study indicate that the urban groundwater quality in Mahmoudabad is generally within the good to excellent categories based on both the Water Quality Index (WQI) and the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI). The majority of the sampled wells were classified in these favorable classes, suggesting that the groundwater is largely suitable for drinking purposes. The pH values of groundwater showed a narrow variation, with an average of 7.36 and a range from 7.16 to 7.78, reflecting stable and neutral conditions appropriate for human consumption. Total hardness exhibited moderate levels, with an average concentration of 320.48 mg/L and values ranging between 150 and 448.8 mg/L, indicating moderate mineralization of the aquifer system. Nitrate concentrations were mostly within permissible limits, averaging 5.84 mg/L; however, localized increases were observed in some wells. Correlation analysis revealed strong positive relationships among total hardness, sulfate, and total dissolved solids (TDS), suggesting that these parameters are controlled by similar geochemical processes, most likely related to mineral dissolution within the aquifer. In contrast, nitrate showed weaker correlations with other parameters, implying a different origin and highlighting the influence of anthropogenic activities on its distribution. The k-means

clustering analysis classified the wells into three distinct groups. The first two clusters comprised wells with generally good water quality but with different levels of mineral content, while the third cluster contained a limited number of wells characterized by comparatively lower water quality.

4. Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that groundwater resources in Mahmoudabad are, in general, of satisfactory quality for drinking purposes. The predominance of wells in the good to excellent quality classes reflects the relatively favorable hydrogeological conditions of the region. The neutral pH and moderate hardness values further confirm the overall suitability of groundwater for domestic use, although mineral content varies spatially due to geological characteristics and human activities. The spatial variability of nitrate, as reflected by its weak correlations with other parameters and its localized elevation in some wells, underscores the impact of agricultural practices and domestic wastewater infiltration. These results emphasize the need to control land-use activities and improve wastewater management in order to prevent further deterioration of groundwater quality. The clustering results provide valuable information on the spatial patterns of groundwater quality. The identification of wells with relatively lower quality allows water managers to focus monitoring and mitigation efforts on vulnerable areas, thereby improving the efficiency of water quality management programs. Overall, integrating WQI and NSFWQI with correlation and clustering analyses offers a comprehensive multidimensional framework for groundwater quality assessment. This approach not only summarizes overall water quality conditions but also reveals hidden relationships and spatial patterns that cannot be detected using single-index methods alone. Continuous monitoring, especially of parameters such as nitrate, is strongly recommended to safeguard public health and ensure the long-term sustainability of groundwater resources in Mahmoudabad.

5. Six important references

1) Heidari Chenari, F., FazlOula, R., Tayebi-Sourki, R., Zabihzadeh, K., Rezaei-Kalantari, R., & Moezzi, A. (2024). Evaluation of physicochemical parameters of drinking water in Sari city, Iran. Proceedings of the 5th Iranian Congress on Water and Wastewater Engineering.

2) Khoshravesh, M., Hosseini-Vardanjani, S. M. R., Taheri-Soudjani, H., & Ghahreman, M. (2024). Groundwater quality assessment using the GQI index for drinking purposes. Journal of Watershed Management Research, 15(2), 119–131.

3) Latif, M., Nasir, N., Nawaz, R., Irshad, M. A., Sultan, K., Nasim, I., Irfan, A., Dawoud, T. M., Younous, Y. A., Ahmed, Z., & Bourhia, M. (2024). Assessment of drinking water quality using Water Quality Index and synthetic pollution index in urban areas of mega city Lahore: A GIS-based approach. Scientific Reports, 14(1), 17627.

4) Mehrbani-Bashar, A. (2023). Review and monitoring of water quality using water quality indices. Proceedings of the 4th International Conference on Civil Engineering, Architecture, Building Materials and Environment.

5) Rahman, M. M., Haque, T., Mahmud, A., Al Amin, M., Hossain, M. S., Hasan, M. Y., Shaibur, M. R., Hossain, S., Hossain, M. A., & Bai, L. (2023). Drinking water quality assessment based on index values incorporating WHO guidelines and Bangladesh standards. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 129, 103353.

6) Kasa, T., Bassa, A. L., Negatu, G. T., Sahile, Z. A., & Reddythota, D. (2022). Investigation of Wabe River water fitness for agricultural and industrial purposes. Heliyon, 8(12), e11865. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11865

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال شانزدهم. شماره شصت ویک.پاییز۱۴۰۴

تحلیل کیفیت آب چاه‌های شهری محمودآباد با شاخص‌های WQI و NSFWQI و رویکرد چندبعدی

فاطمه حیدری چناری[۱]، مجتبی خوش‌روش

تاریخ ارسال:۱۴۰۴/۱۰/۰۷
تاریخ پایرش:۱۴۰۴/۱۲/۲۵

مقاله پژوهشی

چکیده

کیفیت آب آشامیدنی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های سلامت عمومی و مدیریت پایدار منابع آب به‌شمار می‌رود و ارزیابی مستمر آن، به‌ویژه در مناطق شهری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، کیفیت آب چاه‌های تأمین‌کننده آب آشامیدنی شهرستان محمودآباد با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب WQI و NSFWQI بررسی شد. داده‌های مورد استفاده شامل پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب از جمله pH، نیترات، سختی کل، کلراید، سولفات، کل مواد جامد محلول، کدورت و دما در بازه زمانی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴ بود. برای دستیابی به ارزیابی جامع‌تر، علاوه بر محاسبه شاخص‌های کیفی، تحلیل همبستگی پیرسون جهت بررسی روابط بین پارامترها و روش خوشه‌بندی k-means برای گروه‌بندی نمونه‌های مشابه به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که کیفیت عمومی آب در اغلب چاه‌های شهری محمودآباد در محدوده خوب تا عالی قرار دارد، هرچند در برخی نمونه‌ها کاهش نسبی کیفیت مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی باشد. تحلیل همبستگی وجود ارتباط میان برخی پارامترها مانند سختی کل، سولفات و TDS و نقش نیترات در کاهش کیفیت آب را نشان داد. همچنین، خوشه‌بندی نمونه‌ها تفاوت‌های مکانی کیفیت آب را آشکار ساخت. نتایج این مطالعه کارایی رویکرد چندبعدی در پایش و مدیریت منابع آب آشامیدنی شهری را تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آب زیرزمینی، تحلیل همبستگی، خوشه‌بندی، شاخص کیفیت آب ،کیفیت آب آشامیدنی.

[۱] دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (f.heydari.1997@gmail.com).

مقدمه

کیفیت آب آشامیدنی و منابع آب سطحی و زیرزمینی یکی از مؤلفه‌های اساسی سلامت عمومی، امنیت آبی و توسعه پایدار به‌شمار می‌رود. دسترسی به آب سالم نه‌تنها شرط اولیه سلامت جوامع انسانی است، بلکه نقش تعیین‌کننده‌ای در پایداری اکوسیستم‌ها، امنیت غذایی و توسعه اقتصادی مناطق دارد. در دهه‌های اخیر، افزایش فشارهای انسانی ناشی از رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، و همچنین اثرات تغییرات اقلیمی، سبب کاهش کیفیت منابع آب در بسیاری از مناطق جهان شده است. از این‌رو، پایش مستمر و ارزیابی دقیق کیفیت آب به‌عنوان یکی از الزامات اساسی مدیریت منابع آب و سیاست‌گذاری بهداشتی مطرح شده است (Rahman et al., 2023).

با توجه به پیچیدگی ماهیت کیفی آب و تنوع پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی مؤثر بر آن، استفاده از شاخص‌های کیفی آب (Water Quality Indices) به‌عنوان ابزارهایی علمی و کاربردی، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. این شاخص‌ها با تلفیق چندین پارامتر کیفی در قالب یک مقدار عددی، امکان ارائه تصویری ساده، قابل فهم و قابل مقایسه از وضعیت کلی کیفیت آب را فراهم می‌کنند. شاخص کیفیت آب (WQI) و شاخص NSFWQI از جمله پرکاربردترین شاخص‌ها در ارزیابی کیفیت آب آشامیدنی، سطحی و زیرزمینی هستند و به‌طور گسترده در مطالعات ملی و بین‌المللی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Mehrbani Bashar, 2023).

اکبرپور بازرگانی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی تغییرات کیفی و کمی آب رودخانه پلرود در استان گلستان پرداختند. آن‌ها با استفاده از روش‌های گرافیکی و تحلیل آماری، وضعیت کیفیت آب را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که کیفیت آب این رودخانه از نظر شرب و کشاورزی، بر اساس نمودارهای شولر و ویلکاکس، در وضعیت مناسبی قرار دارد.

در این راستا، منصوری و همکاران (۱۴۰۲) با بررسی کیفیت آب سطحی استان گلستان با استفاده از شاخص WQI نشان دادند که مقدار این شاخص در ایستگاه‌های مختلف از «خوب» تا «نسبتاً متوسط» متغیر است و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب به‌طور قابل توجهی تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و شرایط اقلیمی، به‌ویژه بارندگی‌های فصلی، قرار دارد. نتایج این پژوهش کارایی شاخص WQI را به‌عنوان ابزاری مناسب برای پایش و مدیریت منابع آب سطحی تأیید می‌کند.

زارعی و همکاران (۱۴۰۳) کیفیت آب تولیدشده توسط دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن خانگی در شهر گناباد را با استانداردهای ملی ایران و WHO مقایسه کردند. نتایج نشان داد که اگرچه اغلب دستگاه‌ها توانسته‌اند پارامترهایی مانند TDS و سختی کل را به محدوده مجاز کاهش دهند، اما کاهش بیش از حد کلر باقیمانده در برخی نمونه‌ها می‌تواند خطر آلودگی میکروبی پس از ذخیره‌سازی آب را افزایش دهد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ارزیابی کیفیت آب صرفاً بر اساس چند پارامتر محدود یا یک شاخص عددی، ممکن است منجر به برداشت ناقص از وضعیت واقعی کیفیت آب شود.

مطالعه مهربانی بشار (۱۴۰۳) نیز بر همین نکته تأکید دارد. وی با بررسی شاخص‌های متداول کیفیت آب از جمله WQI، NSFWQI و IRWQISC نشان داد که این شاخص‌ها اگرچه ابزارهای مفیدی برای تصمیم‌گیری مدیریتی هستند و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب را به‌خوبی نمایش می‌دهند، اما در برخی موارد نمی‌توانند به‌تنهایی تصویر جامعی از کیفیت آب ارائه دهند. بر این اساس، استفاده از رویکردهای تلفیقی و چندبعدی در کنار شاخص‌های مرسوم، به‌ویژه در مطالعات مرتبط با سلامت عمومی، توصیه شده است.

خوش‌روش و همکاران (۱۴۰۳) با تحلیل تغییرات مکانی کیفیت آب زیرزمینی استان چهارمحال و بختیاری و به‌کارگیری شاخص GQI، وضعیت کیفی آب برای مصارف شرب را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بخش قابل توجهی از محدوده مورد مطالعه در طبقات «عالی» و «خوب» قرار داشته و شاخص GQI نسبت به پارامترهایی نظیر pH و بی‌کربنات حساسیت بالاتری از خود نشان می‌دهد.

حیدری چناری و همکاران (۱۴۰۳) نیز با بررسی پارامترهای کیفی و شیمیایی آب شرب شهر ساری طی دوره ۱۳۹۵ تا

۱۴۰۱ گزارش کردند که مقادیر TDS، pH، EC، سدیم، کلر و منیزیم عمدتاً در محدوده استاندارد قرار داشته و کیفیت آب شرب این شهر در وضعیت مطلوبی قرار دارد که این امر ضرورت پایش مستمر منابع آب زیرزمینی را برجسته می‌سازد.
در مطالعه‌ای دیگر، داوودی معماراطاقور و همکاران (۱۴۰۳) کیفیت آب زیرزمینی دشت قزوین را با استفاده از شاخص‌های مختلف کیفی بررسی کرده و نشان دادند که تغییرات کاربری اراضی نقش مهمی در نوسانات سالانه کیفیت آب دارد.
همچنین وحیدی و سالاری (۱۴۰۳) با ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت سیرجان برای مصارف شرب دریافتند که هرچند بخشی از نمونه‌ها در طبقه «خوب تا متوسط» قرار دارند، اما درصد قابل توجهی از چاه‌ها دارای کیفیت «نامناسب» هستند. مجموعه این مطالعات بر اهمیت پایش منظم و مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی به‌منظور تضمین سلامت جامعه و برنامه‌ریزی بهره‌برداری پایدار تأکید دارد.
بیرانوند و همکاران (۱۴۰۳) کیفیت آب رودخانه دوآب ویسیان در غرب ایران را طی بازه زمانی ۱۹ ساله (۱۳۷۷–۱۳۹۵) بررسی کردند. نتایج شاخص کیفیت آب (WQI) نشان داد که در بیشتر سال‌ها کیفیت آب در رتبه «عالی» قرار داشته است. همچنین، تحلیل نمودار ویلکاکس نشان داد که محدوده آب‌ها در اغلب سال‌ها در کلاس C2S1 (آب‌های خوب) قرار داشت و تنها در سال ۱۳۸۴ کیفیت آب به رتبه متوسط (C3S1) کاهش یافت. این یافته‌ها بیانگر ثبات نسبی کیفیت آب در طول زمان و تأثیر محدود نوسانات سالانه بر وضعیت کلی رودخانه هستند و اهمیت پایش مستمر برای مدیریت منابع آب و شناسایی تغییرات مکانی و زمانی را برجسته می‌کنند.
اسدی و همکاران (۱۴۰۴) با بررسی کیفیت آب آشامیدنی شهر شیراز با استفاده از شاخص‌های مختلف کیفی و تغذیه‌ای، نشان دادند که شاخص‌های متداول کیفیت آب اغلب وضعیت «عالی» را نشان می‌دهند، در حالی که شاخص‌های توسعه‌یافته‌تر که ارزش تغذیه‌ای آب را نیز لحاظ می‌کنند، ارزیابی محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهند. این نتایج بیانگر ضرورت استفاده هم‌زمان از چند شاخص برای دستیابی به ارزیابی جامع‌تر کیفیت آب است.
کاسا و همکاران (۲۰۲۲) کیفیت آب رودخانه وب را از نظر تناسب برای مصارف کشاورزی و صنعتی ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که بر اساس شاخص‌ها و پارامترهایی نظیر درصد سدیم (%Na)، نسبت انحلال‌پذیری سدیم (RSC)، شوری بالقوه (PS)، شاخص پتانسیل قلیایی (KI)، شاخص نفوذپذیری (PI)، شاخص مقاومت خاک (MP)، نسبت جذب سدیم (SAR) و شاخص آلودگی هیدرولوژیکی (HPI)، آب این رودخانه به‌طور کلی از شرایط مناسبی برای استفاده در کشاورزی برخوردار است.
Rahman و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای بر روی کیفیت آب آشامیدنی بنگلادش نشان دادند که اگرچه بخش عمده‌ای از نمونه‌ها در محدوده مطلوب استانداردهای WHO قرار دارند، اما انحراف برخی پارامترها مانند pH و سختی از حدود استاندارد می‌تواند پیامدهای بالقوه‌ای برای سلامت مصرف‌کنندگان به همراه داشته باشد.
جنسر و باساران (۲۰۲۳) نیز کیفیت آب رودخانه آکارچای در ترکیه را مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها نشان داد که کیفیت آب در نمونه‌های مختلف از «عالی» تا «نامناسب» متغیر بود و بخش اعظم نمونه‌ها برای استفاده در آبیاری مناسب نبودند.
همچنین Latif و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از شاخص‌های کیفی آب و تحلیل مکانی مبتنی بر GIS در مناطق شهری لاهور، نشان دادند که فعالیت‌های شهری و صنعتی نقش مهمی در کاهش کیفیت آب ایفا می‌کنند و پایش مستمر و برنامه‌ریزی مدیریتی هدفمند برای کاهش این اثرات ضروری است.
با جمع‌بندی نتایج مطالعات، می‌توان دریافت که به‌کارگیری شاخص‌های کیفی آب، ابزاری کارآمد برای تلفیق اطلاعات پیچیده فیزیک و شیمیایی و ارائه تصویری قابل فهم از

وضعیت منابع آب است. این مطالعات نشان می‌دهند که شاخص‌هایی نظیر WQI و NSFWQI قادرند تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب را به‌خوبی آشکار ساخته و اثر فعالیت‌های انسانی، توسعه شهری و کشاورزی و شرایط طبیعی آبخوان‌ها را بر کیفیت منابع آب نمایان کنند. همچنین نتایج پژوهش‌ها تأکید دارند که استفاده از این شاخص‌ها به‌ویژه در مناطق تحت فشار انسانی، نقش مهمی در شناسایی نقاط بحرانی، حفاظت از سلامت عمومی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب ایفا می‌کند .بر این اساس، در مطالعه حاضر کیفیت آب چاه‌های تأمین‌کننده آب آشامیدنی شهرستان محمودآباد با استفاده از شاخص‌های WQIو NSFWQI مورد بررسی قرار گرفته است. این پژوهش با هدف ارائه تصویری جامع از وضعیت کیفی منابع آب منطقه، تحلیل تغییرات مکانی و زمانی شاخص‌ها و فراهم‌سازی مبنایی علمی برای برنامه‌ریزی مدیریتی، اولویت‌بندی پایش و مدیریت آینده منابع آب انجام شده است

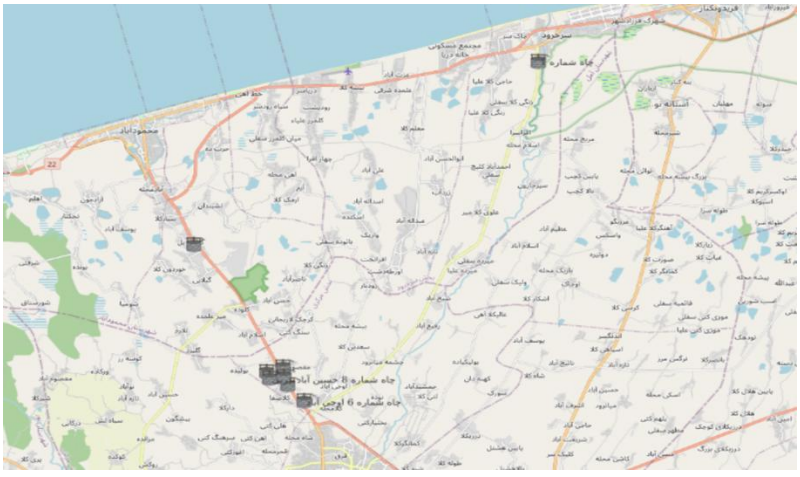
مواد و روش‌ها

منطقه موردمطالعه

منطقه مورد مطالعه در شهرستان محمودآباد، واقع در استان مازندران، قرار دارد. این شهرستان در نوار ساحلی جنوبی دریای خزر واقع شده و از شمال به دریای خزر، از جنوب به شهرستان آمل، از شرق به فریدون‌کنار و از غرب به شهرستان نور محدود می‌شود. اقلیم منطقه از نوع مرطوب و معتدل خزری بوده و با بارندگی نسبتاً بالا و رطوبت قابل توجه مشخص می‌شود. با وجود این شرایط اقلیمی مناسب، توسعه شهری، تمرکز جمعیت، گسترش فعالیت‌های خدماتی، گردشگری و زیرساخت‌های شهری، همراه با افزایش مصرف آب، فشار قابل توجهی بر منابع آب زیرزمینی وارد کرده است. این شرایط، به‌ویژه در محدوده‌های شهری، نگرانی‌هایی را در خصوص پایداری و کیفیت منابع آب زیرزمینی به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب آشامیدنی ایجاد کرده است.

موقعیت چاه‌ها یا ایستگاه‌های نمونه‌برداری

در این پژوهش، نمونه‌برداری از چاه‌های تأمین‌کننده آب آشامیدنی در محدوده‌های شهری شهرستان محمودآباد انجام شده است. این چاه‌ها در نقاط مختلف شهر و نواحی شهری اطراف پراکنده بوده و به‌عنوان منابع اصلی تأمین آب شرب مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. موقعیت مکانی چاه‌های مورد بررسی در محدوده شهری شهرستان محمودآباد در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت چاه‌های شهری محمودآباد

شاخص‌های کیفی مورد استفاده

شاخص کیفیت آب (Water Quality Index – WQI) به‌عنوان یکی از شناخته‌شده‌ترین روش‌های تلفیقی در ارزیابی کیفیت منابع آب، به‌طور گسترده در مطالعات هیدرولوژی و محیط‌زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص نخستین‌بار توسط Horton ارائه شد و هدف اصلی آن، تجمیع مجموعه‌ای از پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی آب در قالب یک عدد بی‌بعد است تا امکان تفسیر ساده‌تر، مقایسه مکانی و زمانی و تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم شود.

در محاسبه WQI، مقدار اندازه‌گیری‌شده هر پارامتر (C_i) نسبت به حد استاندارد مجاز آن (S_i) نرمال‌سازی شده و زیرشاخص کیفی (Q_i) مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} \times 100$$

مقدار Q_i نشان‌دهنده میزان فاصله هر پارامتر از حد استاندارد است؛ به‌گونه‌ای که افزایش مقدار آن بیانگر کاهش کیفیت آب از منظر همان پارامتر می‌باشد. به منظور لحاظ‌کردن اهمیت نسبی پارامترها، وزن (W_i) برای هر متغیر تعریف می‌شود که معمولاً به‌صورت معکوس با مقدار استاندارد آن در نظر گرفته می‌شود؛ به این معنا که پارامترهای حساس‌تر از نظر بهداشتی و زیست‌محیطی، سهم بیشتری در مقدار نهایی شاخص دارند. در نهایت، شاخص کیفیت آب از طریق میانگین وزنی زیرشاخص‌ها به‌دست می‌آید:

$$WQI = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i Q_i}{\sum_{i=1}^{n} W_i}$$

مقدار نهایی WQI تصویری کلی از وضعیت کیفی آب ارائه می‌دهد؛ به‌طوری‌که مقادیر کمتر از ۵۰ نشان‌دهنده کیفیت بسیار مطلوب و مناسب برای شرب، و مقادیر بسیار بالا (بیش از ۳۰۰) بیانگر شرایط نامطلوب و آلودگی شدید آب هستند. از این رو، شاخص WQI به‌عنوان ابزاری کارآمد برای پایش تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب و مقایسه بین منابع مختلف شناخته می‌شود. با این حال، مطالعات اخیر تأکید دارند که کارایی این شاخص به انتخاب صحیح ضرایب وزنی و تطبیق آن با شرایط اقلیمی، زمین‌شناسی و نوع آلاینده‌های غالب هر منطقه وابسته است.

شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (National Sanitation Foundation Water Quality Index – NSFWQI) یکی از شناخته‌شده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های تلفیقی برای ارزیابی وضعیت کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی به شمار می‌رود. این شاخص در سال ۱۹۷۰ توسط Brown و همکاران با پشتیبانی بنیاد ملی بهداشت ایالات متحده توسعه یافت و هدف آن ارائه معیاری ساده اما جامع برای تفسیر هم‌زمان چندین پارامتر کیفی آب بود. در فرآیند توسعه این شاخص، در ابتدا بیش از ۳۰ پارامتر کیفی بالقوه شناسایی شد، اما پس از تحلیل‌های آماری و اخذ نظر متخصصان حوزه آب و محیط‌زیست، ۹ پارامتر به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی شاخص انتخاب گردیدند. این پارامترها شامل اکسیژن بیوشیمیایی پنج‌روزه (BOD_5)، اکسیژن محلول (DO)، کلیفرم مدفوعی، نیترات (NO_3^-)، pH، تغییرات دما، کل مواد جامد محلول (TDS)، فسفات کل (PO_4^{3-}) و کدورت هستند.

در روش NSFWQI، به هر یک از پارامترهای منتخب بر اساس میزان تأثیر آن بر کیفیت کلی آب، ضریب وزنی (W_i) اختصاص داده می‌شود. سپس مقادیر اندازه‌گیری‌شده هر پارامتر با استفاده از منحنی‌های تجربی استاندارد به زیرشاخص‌هایی (Q_i) در بازه صفر تا ۱۰۰ تبدیل می‌شوند. این زیرشاخص‌ها بیانگر وضعیت کیفی هر پارامتر به‌صورت نرمال‌شده هستند. مقدار نهایی شاخص NSFWQI از ترکیب وزنی زیرشاخص‌ها و مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^{n} W_i Q_i$$

که در آن Q_i زیرشاخص پارامتر i ام و W_i وزن متناظر آن است. این ساختار وزنی سبب می‌شود سهم نسبی هر پارامتر آلاینده در مقدار نهایی شاخص منعکس شده و شاخص حاصل، تصویری جامع از وضعیت کیفی آب ارائه دهد.

مقدار NSFWQI در بازه صفر تا صد تغییر می‌کند؛ به‌گونه‌ای که مقادیر بیش از ۹۰ نشان‌دهنده کیفیت عالی، بازه ۷۰ تا ۹۰ کیفیت خوب، ۵۰ تا ۷۰ کیفیت متوسط، ۲۵ تا ۵۰ کیفیت ضعیف و مقادیر کمتر از ۲۵ بیانگر شرایط بسیار نامطلوب و آلودگی شدید آب هستند. به دلیل سادگی محاسبه، قابلیت مقایسه مکانی و زمانی و جامعیت در ترکیب پارامترهای مختلف، شاخص NSFWQI به‌طور گسترده در مطالعات پایش کیفی منابع آب در سطح جهان مورد استفاده قرار گرفته است.

در این پژوهش، داده‌های مورد استفاده شامل نتایج اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب چاه‌های تأمین آب شهرستان محمودآباد در بازه زمانی ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۴ است. پارامترهای مورد بررسی شامل pH، نیترات (NO_3^-)، کلراید (Cl^-)، سولفات(SO_4^{2-}) ، سختی کل، کل مواد جامد محلول (TDS) محاسبه‌شده از هدایت الکتریکی (EC)، کدورت و دمای آب بوده است. این داده‌ها مبنای محاسبه شاخص WQI و تحلیل وضعیت کلی کیفیت آب در منطقه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. مختصات جغرافیایی چاه‌ها نیز ثبت و در جدول شماره ۱ نمایش داده شده‌است.

جدول (۱): مختصات جغرافیایی چاه‌ها

ردیف	نام منطقه	نام محل	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
1	سرخرود	۱ شماره چاه	52.44142	36.6603
2	محمودآباد	کلاصفا ۳ شماره چاه	52.3295	36.5221
3	محمودآباد	شرقی آبادمعصوم ۴ شماره چاه	52.3277	36.5298
4	محمودآباد	شرقی آبادحسین ۵ شماره چاه	52.3278	36.5256
5	محمودآباد	آباداوجی ۶ شماره چاه	52.3370	36.5154
6	محمودآباد	غربی آبادمعصوم ۷ شماره چاه	52.3201	36.5276
7	محمودآباد	غربی آبادحسین ۸ شماره چاه	52.3214	36.5250

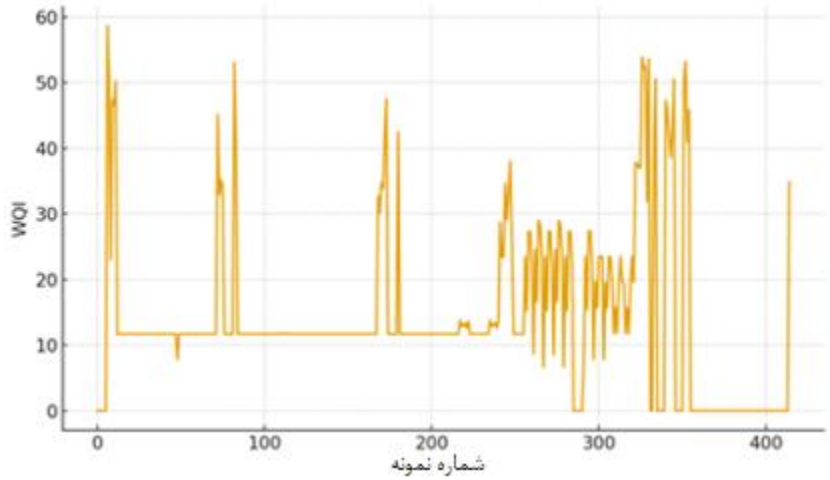
روش تحلیل همبستگی

برای بررسی روابط بین پارامترهای مختلف، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد .این ضریب میزان رابطه خطی بین دو متغیر را در بازه ۱- تا ۱+ نشان می‌دهد. مقادیر نزدیک به ۱+ نشان‌دهنده رابطه مستقیم قوی، مقادیر نزدیک به ۱- بیانگر رابطه معکوس قوی و مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده نبود رابطه خطی معنی‌دار هستند .با محاسبه ماتریس همبستگی بین پارامترهای pH، سختی کل، کلراید، سولفات، نیترات، TDS، WQI و NSFWQI، الگوهای وابستگی بین این پارامترها بررسی شد.

روش تحلیل خوشه‌بندی

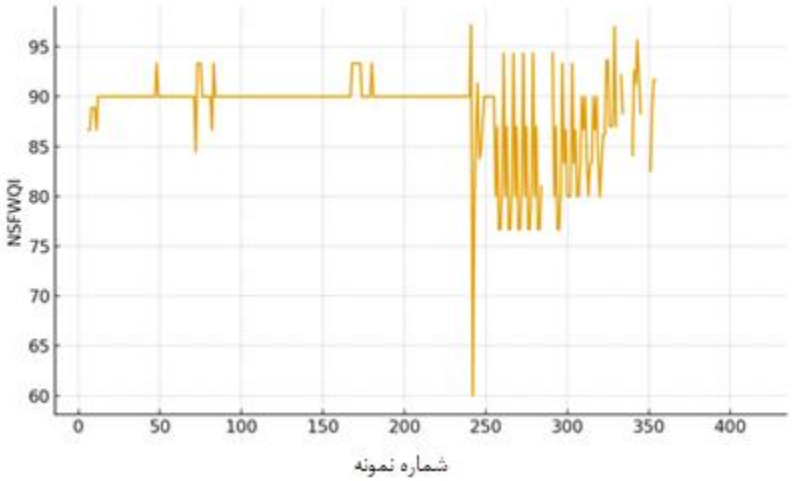
برای خوشه‌بندی نمونه‌ها از الگوریتم k-means با سه خوشه استفاده شد .ابتدا مجموعه‌ای از پارامترهای شاخص شامل pH، سختی کل، نیترات، WQI و NSFWQI انتخاب و داده‌های دارای مقادیر خالی حذف شدند .سپس این داده‌ها با استفاده از نرمال‌سازی(کم‌کردن میانگین و تقسیم بر انحراف معیار) به مقیاس واحد تبدیل شدند تا از غلبه یک پارامتر بر سایرین جلوگیری شود .در ادامه، الگوریتم k-means با انتخاب تصادفی مراکز اولیه اجرا شده و در طی چند تکرار، مراکز خوشه‌ها و انتساب نمونه‌ها تثبیت گردید.**نتایج و بحث**

شکل ۲ نمودار تغییرات شاخص WQI را برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بخش عمده‌ای از نمونه‌ها در بازه‌های نسبتاً محدود قرار دارند و تنها تعداد کمی از نمونه‌ها مقادیر بالاتر WQI را ثبت کرده‌اند، که نشان‌دهنده کاهش نسبی کیفیت آب در آن نقاط است.



شکل (۲): نمودار روند تغییرات شاخص WQI

شکل شماره ۳ نمودار شاخص NSFWQI را نشان می‌دهد که نیز روند مشابهی را تأیید می‌کند؛ به این معنا که کیفیت کلی آب در اغلب چاه‌ها در محدوده خوب تا عالی قرار دارد، هرچند نوساناتی در برخی نقاط مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تغییرات موضعی در کاربری اراضی یا شرایط هیدروژئولوژیکی باشد.

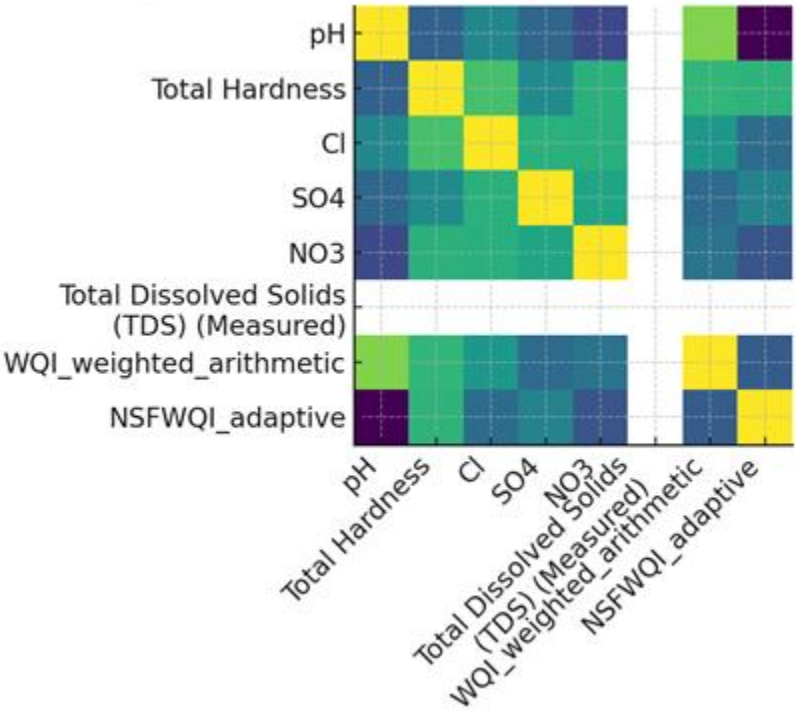


شکل (۳): نمودار روند تغییرات شاخص NSFWQI

نتایج تحلیل همبستگی

شکل ۴ نقشه ماتریس همبستگی شدت و جهت رابطه بین پارامترهای مختلف را به صورت تصویری نمایش می‌دهد؛ بخش‌هایی که به رنگ‌های شدیدتر نزدیک‌تر هستند، همبستگی بالاتری را نشان می‌دهند. این نقشه امکان شناسایی سریع پارامترهایی را فراهم می‌کند که رفتار مشابه دارند یا ممکن است منشاء مشترکی داشته باشند. نتایج تحلیل همبستگی نشان داد که بین پارامترهای pH و

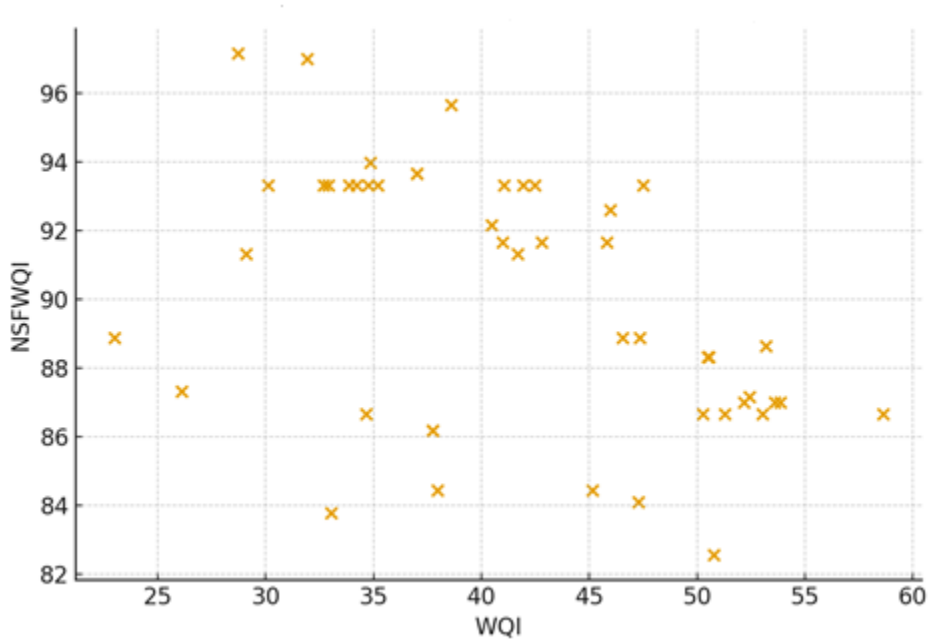
WQI_weighted_arithmetic همبستگی مثبت نسبتاً قوی (ضریب حدود ۰/۶۶) و بین پارامترهای pH و NSFWQI_adaptive همبستگی منفی نسبتاً قوی (ضریب حدود ۰/۷۹) وجود دارد.



شکل (۴): ماتریس همبستگی بین پارامترهای اصلی کیفیت آب

نتایج تحلیل خوشه‌بندی

شکل ۵ پراکنش نمونه‌ها را در فضای دوبعدی WQI–NSFWQI نشان می‌دهد، که نمونه‌های متعلق به خوشه‌های مختلف در نقاط متفاوتی قرار گرفته‌اند. اگرچه رنگ‌بندی به صورت خودکار انجام شده است، مرزبندی خوشه‌ها نشان می‌دهد که نمونه‌هایی با کیفیت آب مشابه در کنار یکدیگر قرار دارند و این موضوع به ویژه در شناسایی گروه‌های آب با کیفیت بالا، متوسط و پایین اهمیت دارد. خوشه‌بندی انجام شده نشان داد که خوشه ۱ شامل حدود ۲۳ نمونه، خوشه ۲ شامل حدود ۲۰ نمونه و خوشه ۳ شامل حدود ۴ نمونه هستند؛ تمامی این نمونه‌ها ویژگی‌های کیفی مشابهی از نظر pH، سختی، نیترات و شاخص‌های WQI/NSFWQI دارند.



شکل (۵): ماتریس همبستگی بین پارامترهای اصلی کیفیت آب

تحلیل آماری داده‌ها نشان داد که مقدار میانگین pH آب چاه‌های شهری محمودآباد حدود ۷/۳۶ بوده و دامنه تغییرات آن بین ۷/۱۶ تا ۷/۷۸ با انحراف معیار ۰/۱۳ است که بیانگر پایداری نسبی شرایط اسیدیته و قرارگیری آن در محدوده مطلوب برای آب آشامیدنی می‌باشد. میانگین سختی کل حدود ۳۲۰/۴۸ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمد که با حداقل ۱۵۰ و حداکثر ۴۴۸/۸میلی‌گرم بر لیتر و انحراف معیار ۷۹/۷۷، نشان‌دهنده پراکندگی متوسط و تأثیر هم‌زمان عوامل زمین‌شناسی و انسانی بر این پارامتر است. همچنین غلظت نیترات با میانگین ۵/۸۴ میلی‌گرم بر لیتر عمدتاً در محدوده مجاز قرار داشت، هرچند در برخی چاه‌ها افزایش موضعی آن مشاهده شد که می‌تواند ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و نفوذ آلاینده‌ها باشد. این نتایج با یافته‌های حیدری‌چناری و همکاران (۱۴۰۳) که کیفیت مطلوب پارامترهای pH، TDS و یون‌های اصلی در آب شرب شهر ساری را گزارش کردند همخوانی دارد.

میانگین شاخص‌های WQI و NSFWQI به‌ترتیب حدود ۱۴/۰۱ و ۸۸/۶۹ به‌دست آمد که بیانگر کیفیت «خوب تا عالی» آب در اغلب چاه‌ها است. این وضعیت مشابه نتایج خوش‌روش و همکاران (۱۴۰۳) در استان چهارمحال و بختیاری است که بخش عمده آبخوان‌ها را در طبقات کیفی «عالی و خوب» طبقه‌بندی کردند و حساسیت شاخص‌ها به پارامترهایی مانند pH را مورد تأکید قرار دادند.

از سوی دیگر، همبستگی مشاهده‌شده بین سختی کل، TDS و سولفات و نقش متفاوت نیترات در کاهش کیفیت آب، با نتایج داوودی معماراطاقور و همکاران (۱۴۰۳) در دشت قزوین تطابق دارد؛ به‌گونه‌ای که آنان نیز تأثیر کاربری اراضی و منابع آلاینده انسانی را عامل اصلی نوسانات کیفی آب زیرزمینی معرفی کردند. بنابراین، می‌توان گفت نتایج این پژوهش از نظر الگوی تغییرات پارامترهای شیمیایی و رفتار شاخص‌های کیفی، همخوانی قابل توجهی با مطالعات داخلی اخیر داشته و بر اهمیت پایش مستمر و مدیریت یکپارچه منابع آب زیرزمینی تأکید می‌کند.

نتیجه‌گیری

ترکیب نتایج حاصل از شاخص‌های کیفی، تحلیل همبستگی و خوشه‌بندی در مطالعه حاضر تصویری جامع از وضعیت کیفیت آب زیرزمینی منطقه محمودآباد ارائه می‌دهد. کیفیت عمومی آب در اکثر چاه‌ها مطلوب است، اما مقادیر بالاتر WQI و NSFWQI در برخی نمونه‌ها نشان‌دهنده حساسیت منطقه به تغییرات کاربری اراضی و فعالیت‌های کشاورزی است. این یافته‌ها با نتایج منصوری و همکاران (۱۴۰۲) همسو است، که نشان داد شاخص WQI در آب‌های سطحی استان گلستان از «خوب» تا «نسبتاً متوسط» متغیر است و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و شرایط اقلیمی، به ویژه بارندگی‌های فصلی، قرار دارد.

تحلیل همبستگی در مطالعه حاضر نشان داد که پارامترهایی مانند سختی کل، سولفات و TDS رفتار هم‌جهتی دارند، در حالی که نیترات الگوی متفاوتی نشان می‌دهد و افزایش آن با کاهش کیفیت آب مرتبط است. این نتایج با یافته‌های اسدی و همکاران (۱۴۰۴) همخوانی دارد، که نشان داد شاخص‌های متداول کیفیت آب ممکن است وضعیت «عالی» را نشان دهند، اما شاخص‌های توسعه‌یافته‌تر که پارامترهای بیشتری را لحاظ می‌کنند، ارزیابی محافظه‌کارانه‌تری ارائه می‌دهند و اهمیت استفاده از رویکرد چندبعدی را برجسته می‌کنند.

به طور کلی، مقایسه نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های کیفی قادر به شناسایی نواحی حساس و تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب هستند و تحلیل چندبعدی با استفاده از همبستگی و خوشه‌بندی تصویر جامع‌تری از وضعیت کیفیت آب ارائه می‌دهد. هرچند تفاوت‌هایی در نوع منابع آب (زیرزمینی در مطالعه حاضر و سطحی در مطالعات دیگر) و پارامترهای مورد بررسی وجود دارد، روند کلی نشان‌دهنده تأثیر فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای طبیعی بر کیفیت آب است.

منابع

اسدی، م.، نوشادی، م. و نوشادی، ع. (۱۴۰۴). واکاوی ارزش تغذیه‌ای آب آشامیدنی با استفاده از شاخص کیفی تغذیه‌ای (مطالعه موردی: آب آشامیدنی شهر شیراز) .علوم آب و خاک، ۲۹(۲)، ۸۲–۶۹.

اکبرپور بازرگانی، م.، حاتمی، س.، رضایی، ن. و احمدی، ف. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات کیفی و کمی آب رودخانه پلرود استان گلستان با استفاده از روش‌های گرافیکی و تحلیل آماری .همایش ملی مدیریت منابع آب، گرگان.

بیرانوند، ع.، احمدی، ح.، مرادی، س. و رضایی، م. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات زمانی کیفیت آب رودخانه دوآب ویسیان در غرب ایران طی دوره ۱۳۷۷–۱۳۹۵ با استفاده از شاخص کیفیت آب و نمودار ویلکاکس .فصلنامه علوم آب ایران، ۲۹(۳)، ۸۹–۷۵.

خوش‌روش، م.، حسینی‌وردنجانی، س.م.ر.، طاهری‌سودجانی، ه. و قهرمان، م. (۱۴۰۳). ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی با استفاده از شاخص GQI جهت مصارف شرب .پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۵(۲)، ۱۳۱–۱۱۹. doi:10.61186/jwmr.15.2.119

داوودی معماراطاقور، ل.، فتائی، ا.، تاج‌آبادی، م. و نعیمی، ب. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی کیفیت منابع آب زیرزمینی در حوزه آبریز دشت قزوین .نشریه علمی–پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۷(۳)، ۳۶۹–۳۵۳. doi:10.22059/jrwm.2024.370962.1744

حیدری‌چناری، ف.، فضل‌اولی، ر.، طیبی‌سورکی، ر.، ذبیح‌زاده، ک.، رضایی‌کلانتری، ر. و معزی، ع. (۱۴۰۳). بررسی وضعیت پارامترهای کیفی و شیمیایی آب شرب شهر ساری در سال‌های اخیر .پنجمین کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، اصفهان، https://civilica.com/doc/2163440.

زارعی، ا.، قاسمی، م.، بسیطی، ز.، افکارسرند، م.، نقی‌زاده، س.، عابدی، س. و رکنی، ح.ر. (۱۴۰۳). کیفیت آب آشامیدنی دستگاه‌های آب‌شیرین‌کن شهر گناباد .کنفرانس بین‌المللی علوم مهندسی و محیط زیست. https://civilica.com/doc/2114847

منصوری، ب.، فاضل، ع.، پورصفی، ت.، گهرنجیک، ب.م. و عباسی، ف. (۱۴۰۲). بررسی کیفیت آب مخزن سد گلستان برای فعالیت‌های آبزی‌پروری با استفاده از شاخص .CCMEWQI پژوهش‌های کاربردی شیلات، ۱۰(۴)، ۲۷–۲۰. https://doi.org/10.22034/jair.10.4.2

مهربانی‌بشار، ع. (۱۴۰۳). بررسی، مرور و پایش کیفیت آب با استفاده از شاخص‌های کیفی آب .چهارمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، معماری، مصالح ساختمانی و محیط زیست، https://civilica.com/doc/2199393 .

وحیدی، م. و سالاری، ع. (۱۴۰۳). ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی دشت سیرجان برای مصارف شرب با استفاده از شاخص‌های کیفی .همایش ملی منابع آب و محیط زیست، کرمان.

وحیدی، م.ا. و سالاری، م. (۱۴۰۳). بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از شاخص‌های کیفیت آب جهت مصرف شرب (مطالعه موردی: دشت سیرجان) .چهاردهمین کنگره ملی مهندسی عمران، زنجان، https://civilica.com/doc/2100113 .

Gençer, E., & Başaran, C. (2023). Water quality assessment and pollution of Akarçay River, Türkiye. Kuwait Journal of Science, 51(1).

Kasa, T., Bassa, A. L., Negatu, G. T., Sahile, Z. A., & Reddythota, D. (2022). Investigation of Wabe River water fitness for agricultural and industrial purposes. Heliyon, 8(12), e11865. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11865

Latif, M., Nasir, N., Nawaz, R., Irshad, M. A., Sultan, K., Nasim, I., Irfan, A., Dawoud, T. M., Younous, Y. A., Ahmed, Z., & Bourhia, M. (2024). Assessment of drinking water quality using Water Quality Index and synthetic pollution index in urban areas of mega city Lahore: A GIS-based approach. Scientific Reports, 14(1), 17627. https://doi.org/10.1038/s41598-024-68537-x

Rahman, M. M., Haque, T., Mahmud, A., Al Amin, M., Hossain, M. S., Hasan, M. Y., Shaibur, M. R., Hossain, S., Hossain, M. A., & Bai, L. (2023). Drinking water quality assessment based on index values incorporating WHO guidelines and Bangladesh standards. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 129, 103353.