



Assessment of the effects of surface runoff on the rivers of western Tehran using a multi-index water quality approach

Niloufar Naderi¹ | Ali Moridi² | Reza Khalili³

1. Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: ni.naderi@mail.sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a_moridi@sbu.ac.ir
3. Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: re_khalili@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 25 April 2026

Received in revised form

5 June 2026

Accepted 1 July 2026

Published online 9 August 2026

Keywords:

Microbial parameters

Physicochemical parameters

Surface runoff

Water quality index

ABSTRACT

With the expansion of urbanization and the development of industrial activities, surface water resources in western Tehran have been increasingly exposed to serious pollution challenges. The aim of this study is to evaluate the quality of surface runoff and examine its impact on the water quality of the Kan River using three water quality indices, including NSFQI, IRWQI_{SC}, and IRWQI_{ST}. For this purpose, sampling was conducted during the 1404 water year at 15 selected stations along the Kan River during both wet (February) and dry (August) seasons, and physicochemical, microbial, and toxic parameters were measured. The results of the NSFQI and IRWQI_{SC} indices showed that water quality in most of the stations ranged from moderate to very poor, exhibiting a considerable decline from upstream to downstream. Statistical analysis also demonstrated strong correlations among parameters associated with organic and nutrient pollution, including BOD, COD, ammonia, and phosphate, which are mainly attributed to municipal wastewater discharges and agricultural runoff. In contrast, the IRWQI_{ST} index, which focuses on toxic pollutants, assessed the water quality as good in most stations, indicating that heavy metal contamination is not widespread except in a few industrial hotspots. The simultaneous evaluation using these three indices enabled the differentiation of pollution characteristics and revealed that the primary threat to the Kan River ecosystem is the high load of organic and nutrient pollutants, whereas toxic pollution tends to be more localized. Accordingly, implementing management strategies that include controlling urban and agricultural pollution sources and monitoring industrial discharges is essential for improving the river's water quality.

Cite this article: Naderi, N., Moridi, A., & Khalili, R. (2026). Assessment of the effects of surface runoff on the rivers of western Tehran using a multi index water quality approach. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (2), 253-275. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412106.1299>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412106.1299>

Publisher: University of Tehran Press.



ارزیابی اثر رواناب‌های سطحی بر رودخانه‌های غرب شهر تهران با رویکرد شاخص‌های چندگانه کیفیت آب

نیلوفر نادری^۱ | علی مریدی^۲ | رضا خلیلی^۳

۱. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: ni.naderi@mail.sbu.ac.ir
 ۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a_moridi@sbu.ac.ir
 ۳. گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: re_khalili@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۰ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۸ کلیدواژه‌ها: پارامترهای فیزیکوشیمیایی پارامترهای میکروبی رواناب سطحی شاخص کیفیت آب	با گسترش شهرنشینی و توسعه فعالیت‌های صنعتی، منابع آب سطحی در غرب تهران با چالش‌های جدی آلودگی مواجه شده‌اند. هدف این پژوهش، ارزیابی کیفیت رواناب‌های سطحی و بررسی تأثیر آن بر کیفیت آب رودخانه کن با استفاده از سه شاخص کیفیت آب شامل NSFQI، IRWQI_{SC} و IRWQIST است. بدین منظور، در سال آبی ۱۴۰۴ از ۱۵ ایستگاه منتخب در طول رودخانه کن طی دو دوره تر (بهمن ماه) و خشک (مردادماه) نمونه‌برداری انجام شد و پارامترهای فیزیکوشیمیایی، میکروبی و سمی اندازه‌گیری شدند. نتایج شاخص‌های NSFQI و IRWQI_{SC} نشان داد که کیفیت آب در بیش‌تر ایستگاه‌ها در محدوده متوسط تا بسیار بد قرار دارد و از بالادست به پایین‌دست روند کاهشی قابل توجهی دارد. تحلیل آماری نیز همبستگی بالایی میان پارامترهای مرتبط با آلودگی آلی و مغذی شامل BOD، COD، آمونیاک و فسفات را نشان داد که به‌طور عمده ناشی از تخلیه فاضلاب‌های شهری و رواناب‌های کشاورزی است. در مقابل، شاخص IRWQIST که بر آلاینده‌های سمی تمرکز دارد، کیفیت آب را در اغلب ایستگاه‌ها در وضعیت خوب ارزیابی کرد و بیانگر آن است که آلودگی فلزات سنگین، به‌جز در برخی نقاط صنعتی، گسترده نیست. ارزیابی هم‌زمان این سه شاخص امکان تفکیک ماهیت آلودگی را فراهم ساخت و نشان داد که مهم‌ترین تهدید برای اکوسیستم رودخانه کن، آلودگی‌های آلی و مغذی است، درحالی‌که آلودگی‌های سمی بیش‌تر ماهیتی نقطه‌ای دارند. بر این اساس، اجرای راهبردهای مدیریتی شامل کنترل منابع آلاینده شهری و کشاورزی و نظارت بر تخلیه‌های صنعتی برای بهبود کیفیت آب رودخانه ضروری است.

استناد: نادری، نیلوفر؛ مریدی، علی و خلیلی، رضا (۱۴۰۵). ارزیابی اثر رواناب‌های سطحی بر رودخانه‌های غرب شهر تهران با رویکرد شاخص‌های چندگانه کیفیت آب. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۶ (۲)، ۲۵۳-۲۷۵. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412106.1299>



۱. مقدمه

کیفیت آب‌های سطحی نه تنها بر سلامت انسان و اکوسیستم‌های آبی تأثیر می‌گذارد، بلکه به‌طور مستقیم بر قابلیت استفاده از آب برای مصارف مختلف از جمله آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی اثرگذار است (Mardekheh & Hamzeh, 2024). آلودگی این منابع می‌تواند منجر به کاهش تنوع زیستی، شیوع بیماری‌ها و تحمیل هزینه‌های اقتصادی سنگین برای تصفیه و بازسازی شود (Teimoori et al., 2024). در این میان، کلان‌شهر تهران، به دلیل رشد صعودی جمعیت و توسعه بی‌رویه، با چالش‌های جدی در زمینه مدیریت آب و آلودگی منابع آبی مواجه است. رشد شهرنشینی و انتقال آب از حوضه‌های مجاور، سبب تولید حجم قابل توجهی پساب و رواناب‌های سطحی در این شهر شده که کیفیت آب‌های سطحی را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد (Salehi, 2020). رودخانه‌های تهران به دلیل تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، نشت شیرابه‌ها و زباله‌های شهری و همچنین ورود آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های کشاورزی در حاشیه رودخانه‌ها (مانند کودها و آفت‌کش‌ها) با آلودگی‌های متعددی روبه‌رو هستند. این عوامل، کیفیت آب را به شدت کاهش داده و تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست محسوب می‌شوند (Abbasnia et al., 2019). برای بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها، ارزیابی شاخص‌های فیزیکی و شیمیایی آب ضروری است. رودخانه‌هایی مانند کن، وردآورد، فرحزاد، پونک و کشار که از ارتفاعات البرز به سمت غرب تهران جاری هستند، با وجود اهمیت در تأمین آب و زه‌کشی، به دلیل توسعه شهری و نزدیکی به مناطق پرجمعیت و صنعتی، در معرض آلودگی‌های متعددی قرار گرفته‌اند (Robati et al., 2023). در سال‌های اخیر جهت بررسی کیفیت منابع آب از روش‌های مختلفی استفاده شده است که یکی از مهم‌ترین روش‌ها استفاده از شاخص‌های کیفی منابع آب می‌باشد که مورد توجه پژوهش‌گران قرار گرفته است.

پژوهش در زمینه آلودگی رواناب بزرگراهی در ایران توسط Nouri & Naghipour (۲۰۰۲) انجام گرفت که بر رواناب‌های بزرگراهی تهران تمرکز داشت. این مطالعه مقادیر بالایی از فلزات سنگین مانند سرب، روی و نیکل را گزارش کرد و علت اصلی آن را منابع ترافیکی همچون سایش لنت ترمز و لاستیک خودروها دانست. آن‌ها همچنین بزرگراه شهید چمران را به دلیل حجم بالای ترافیک، آلوده‌ترین بزرگراه معرفی کردند. در راستای تکمیل این موضوع، Mahvi & Mardani (۲۰۰۵) بر هیدروکربن‌های آروماتیک متمرکز شدند و وجود فنانترن را در رواناب‌های شهری تهران شناسایی کرده و بر پتانسیل سرطان‌زایی آن تأکید نمودند. Nabizadeh و همکاران (۲۰۰۵) نیز در پژوهشی دیگر بر روی مسیل‌های تهران، مسیل عمادآور را آلوده‌ترین مسیل از نظر فلزات سنگین معرفی کردند و نشان دادند که غلظت آلاینده‌ها از شمال به جنوب شهر افزایش می‌یابد. در ادامه این مطالعات، Sadeghi & Mardani (۲۰۱۰) آلودگی خاک‌های جنوب تهران به فلزات سنگین ناشی از رواناب‌های سطحی را بررسی کردند و گزارش دادند که غلظت فلزاتی مانند سرب، کادمیوم، روی، مس و نیکل در این خاک‌ها روندی افزایشی از شمال به جنوب و از غرب به شرق دارد. این پژوهش‌گران، میانگین غلظت این فلزات در ایستگاه‌های جنوبی را به‌طور معناداری بالاتر از ایستگاه‌های شمالی دانستند و دلیل احتمالی آن را تماس بیش‌تر با رواناب‌های آلوده و استفاده از آن‌ها برای آبیاری اراضی کشاورزی عنوان کردند. مطالعات جدیدتر نیز به بررسی عمیق‌تر آلودگی رواناب‌ها پرداخته‌اند. در این زمینه، Ghadiri و همکاران (۲۰۲۱) به تمرکز بالای فلزات سنگین در شمال و شرق تهران اشاره کرده و بر استفاده از شاخص‌های آلودگی برای شناسایی منابع تأکید نمودند. در همان سال، Hasani Moghaddam & Hashemi (۲۰۲۱) به‌طور خاص، هیدروکربن‌های آلیفاتیک در رسوبات رواناب‌ها را بررسی کرده و منابع نفتی مانند نشت سوخت را عامل اصلی آلودگی دانستند. در پژوهشی مشابه، Yekta و همکاران (۲۰۲۲) بر روی رودخانه فرحزاد گزارش کردند که پارامترهای آلودگی مانند ^{1}COD ، ^{2}BOD و ^{3}TSS اغلب از استانداردهای ملی و سازمان بهداشت جهانی WHO^۴ فراتر می‌روند. Mazlomi و همکاران (۲۰۲۳) برای ارزیابی کیفیت

آب رودخانه نکا از شاخص‌های کیفیت آب سطحی ایران ($IRWQI_{SC}$)^۵ و شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت ($NSFWQI$)^۶ استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که کیفیت آب رودخانه براساس هر دو شاخص از سرچشمه به سمت دهانه کاهش می‌یابد و این کاهش کیفیت در فصول گرم، به‌ویژه بهار، بیش‌تر است. در راستای همین مطالعات، Robati و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از همان شاخص‌ها ($IRWQI_{SC}$ و $NSFWQI$)، تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه هراز را پایش کردند و گزارش دادند که کیفیت آب با شاخص $IRWQI_{SC}$ در فصول بهار، پاییز و زمستان «نسبتاً خوب» و در تابستان «متوسط» ارزیابی شد (Shakerdonyavi et al., 2023). نیز در پژوهشی بر روی رودخانه بابل‌رود، با استفاده از شاخص‌های $IRWQI_{SC}$ ، $NSFWQI$ و $CCME\ WQI$ ^۷ نشان دادند که کیفیت آب در حد متوسط تا ضعیف قرار دارد و این وضعیت به‌ویژه در پایین‌دست رودخانه، ناشی از ورود آلاینده‌های مناطق مسکونی و کشاورزی است. این پژوهش بر اهمیت استفاده از شاخص‌های ترکیبی برای ارزیابی جامع کیفیت آب تأکید می‌کند. همچنین Moghaddam و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی رسوبات رواناب تهران پرداختند و نتایج نشان داد که فلزات سنگین به‌طور عمده منشأ انسان‌ساز دارند و با کربن آلی و ذرات ریز همبستگی بالایی از خود نشان می‌دهند. بنابراین، بررسی کمی و کیفی رواناب‌های شهری به‌عنوان یکی از عوامل اصلی افت کیفیت آب در مناطق شهری ایران ضرورت یافته است. در سال‌های اخیر، استفاده از شاخص‌های کیفیت آب (WQI)^۸ و به‌ویژه شاخص $NSFWQI$ در سطح بین‌المللی برای مدیریت منابع آب رودخانه‌ای توسعه یافته است. در همین راستا، Parween و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای بر روی رودخانه ماهاناندا در شهر سیلیگوری هند، با استفاده از مدل اصلاح‌شده $NSFWQI$ نشان دادند که کیفیت آب این رودخانه تحت تأثیر فشارهای شهری در محدوده «خوب» تا «متوسط» قرار دارد و اکثر پارامترها از استانداردهای تعیین‌شده تجاوز کرده‌اند. همچنین Al-sudani و همکاران (۲۰۲۲) با به‌کارگیری شاخص $NSFWQI$ برای ارزیابی اثرات فاضلاب تصفیه‌نشده بر رودخانه دجله در بغداد، گزارش کردند که تخلیه فاضلاب باعث افت شدید شاخص کیفی از وضعیت «متوسط» در بالادست به وضعیت «بد» در نقطه تخلیه شده است. علاوه بر این، Mahdi و همکاران (۲۰۲۳) نیز در ارزیابی جامع کیفیت آب رودخانه شط‌العرب، با بهره‌گیری از شاخص‌های کیفی آب، وضعیت نامطلوب کیفی را در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی تأیید کردند که ناشی از کاهش دبی ورودی و نفوذ شوری بوده است. نتایج این پژوهش‌ها کارایی بالای شاخص‌های WQI را در سنجش دقیق میزان تخریب کیفیت آب ناشی از آلاینده‌های شهری و انسانی اثبات می‌کنند. بررسی منابع فوق نشان می‌دهد که مطالعات پیشین به‌طور عمده یا بر آنالیز رسوبات تمرکز داشته و یا به پایش کلی کیفیت رودخانه‌ها پرداخته‌اند؛ اما رویکردی که بتواند تأثیر مستقیم و کمی تخلیه رواناب شهری بر کیفیت رودخانه را در حوضه آبریز کن ارزیابی کند، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش حاضر با هدف پوشش این خلأ، چارچوبی مقایسه‌ای برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌های غرب تهران با استفاده هم‌زمان از شاخص بین‌المللی $NSFWQI$ و شاخص‌های بومی $IRWQI_{SC}$ و $IRWQI_{ST}$ ^۹ ارائه می‌کند. در این مطالعه به‌جای استفاده منفرد از یک شاخص کیفیت آب، عملکرد و حساسیت شاخص‌های بین‌المللی و بومی را در بازتاب شرایط واقعی رودخانه‌های شهری تحت تأثیر رواناب‌های سطحی مقایسه می‌کند. این رویکرد می‌تواند ضمن شناسایی نقاط بحرانی ورود آلودگی، نشان دهد کدام شاخص تصویر دقیق‌تر و کاربردی‌تری از وضعیت کیفی رودخانه‌ها در محیط‌های شهری ارائه می‌دهد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل غرب استان تهران است که در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز واقع شده است. ارتفاع این

منطقه از حدود ۱۱۰۰ متر در بخش‌های جنوبی تا ۱۷۰۰ متر در بخش‌های شمالی متغیر است. این منطقه که در غربی‌ترین قسمت دامنه‌های جنوبی البرز واقع شده و مشرف به شهر تهران است، در عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۱ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی قرار دارد. مساحت حوضه آبریز آن تا بزرگراه آزادگان ۴۲۰ کیلومترمربع است و ۱۷ کیلومتر از طول آن در محدوده شهری تهران قرار دارد (Moghadam Yekta et al., 2022). در این پژوهش، نمونه‌برداری از ۱۵ ایستگاه در طول رودخانه کن طی دو دوره تر (بهمن‌ماه) و خشک (مردادماه) در سال آبی ۱۴۰۴ انجام شد. همچنین نتایج دبی‌سنجی نشان داد که دبی متوسط جریان در فصل تر معادل دو مترمکعب بر ثانیه بوده که در فصل خشک به ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه کاهش یافته است. به‌منظور تفکیک اثر رواناب شهری از کیفیت پایه، اختلاف بار آلودگی در این دو فصل موردتحلیل قرار گرفت. نمونه‌برداری‌ها برای اطمینان از صحت داده‌ها، از هر ایستگاه در هر نوبت سه نمونه تکرار برداشت شد. هدف از این انتخاب، ارزیابی دقیق کیفیت آب رودخانه در محل ورود آلاینده‌ها می‌باشد. شکل (۱)، موقعیت محدوده و ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

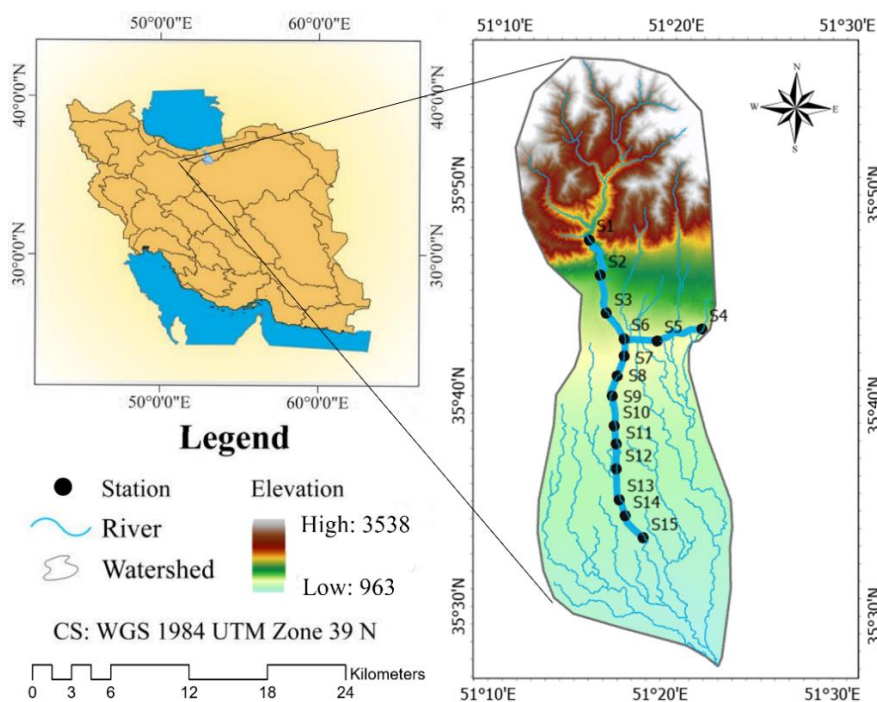


Figure 1. Study area and sampling points

۲.۲. شاخص‌های کیفیت آب

در این پژوهش، برای اینکه وضعیت کیفی رودخانه به‌طور کامل و دقیق مشخص شود، از ترکیب سه شاخص مختلف IRWQI_{ST} و IRWQI_{SC}، NSFQI و شاخص NSFQI استفاده شده است. اگرچه برخی پارامترها مثل اکسیژن محلول و pH^{۱۰} در این شاخص‌ها مشترک هستند، اما هدف نهایی هر کدام متفاوت است. شاخص NSFQI به‌عنوان یک معیار جهانی انتخاب شد تا امکان مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات سایر کشورها فراهم شود. شاخص IRWQI_{SC} به‌دلیل داشتن پارامترهایی مثل هدایت الکتریکی (EC)^{۱۱} و سختی آب، برای سنجش کیفیت آب براساس شرایط طبیعی و اقلیمی ایران

مناسب‌تر است. درنهایت، چون دو شاخص قبلی نمی‌توانند آلودگی‌های صنعتی خطرناک را نشان دهند، از شاخص $IRWQI_{ST}$ استفاده شد که فقط روی فلزات سنگین و سموم تمرکز دارد. بنابراین، استفاده هم‌زمان از این سه شاخص ضروری است تا بتوان تصویری واقعی از کیفیت عمومی، فیزیکی و شیمیایی رودخانه ارائه داد.

۱.۲.۲ شاخص کیفیت آب (NSFWQI)

یک روش معمول محاسبه شاخص کیفیت آب بادقت زیاد در انتخاب پارامترها، به کمک ایجاد یک مقیاس مشترک و تعیین وزن هر یک توسعه داده شد. این تلاش توسط بنیاد ملی بهداشت پشتیبانی شد که درنهایت به‌عنوان NSFWQI برای محاسبه شاخص کیفیت آب در بدنه‌های آبی که به‌شدت آلوده هستند مورد استفاده قرار گرفت. در جدول (۱) پارامترهای مؤثر و وزن آن‌ها نشان داده شده است.

Table 1. The NSFWQI parameters and their weights

Parameter	Weight	Unit
Fecal Coliform	0.16	MPN/100 ml
BOD ₅	0.11	mg/L
Nitrate	0.10	mg/L
Dissolved Oxygen	0.17	Percent Saturation
Temperature	0.10	C
Phosphate	0.10	mg/L
Turbidity	0.08	NTU
TSS	0.07	mg CaCO ₃ /L
pH	0.11	-

داده‌های کیفیت آب ثبت‌شده و برای به‌دست‌آوردن مقدار عددی، به نمودار منحنی وزنی منتقل می‌شود. برای محاسبه شاخص NSFWQI از استفاده می‌شود:

$$NSFWQI = \sum_{i=1}^n W_i Q_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه، W_i و Q_i هر کدام به‌ترتیب نشان‌دهنده درصد وزنی و زیر شاخص مربوط به پارامتر i ام و n تعداد پارامترهای موردبررسی است. با ضرب ارزش عددی هر پارامتر و وزن آن، مقدار شاخص آن به‌دست می‌آید که با استفاده از جدول (۲) معادل توصیفی این شاخص تعیین می‌شود (Roshani-Sefidkouhi & Mortezaazadeh, 2025).

Table 2. Descriptive classification of the NSFWQI index

Index Value	Descriptive Equivalent
90.1-100	Excellent
70.1-90	Good
50.1-70	Moderate
25.1-50	Bad
0-25	Very Bad

۲.۲.۲ شاخص پارامترهای متداول کیفیت منابع آب سطحی ایران ($IRWQI_{SC}$)

یک شاخص ترکیبی است که از شاخص‌های NSFWQI و BCWQI نشأت می‌گیرد. این شاخص توسط مدیریت منابع آب ایران با هدف ارائه یک روش مناسب و بومی برای ارزیابی کیفی آب‌های سطحی، متناسب با شرایط طبیعی و چالش‌های آبی کشور توسعه یافته است. $IRWQI_{SC}$ وضعیت کیفیت آب را به‌صورت کمی بیان می‌کند و به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای طبقه‌بندی کیفیت منابع آب طراحی شده است، به‌گونه‌ای که مقادیر بالاتر این شاخص نشان‌دهنده کیفیت بهتر آب است.

برای محاسبه این شاخص، مقادیر اندازه‌گیری‌شده پارامترهای مربوطه به‌عنوان ورودی مورد استفاده قرار می‌گیرند. شاخص $IRWQI_{SC}$ براساس روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شود. رابطه (۲) برای محاسبه نهایی $IRWQI_{SC}$ استفاده می‌شود، درحالی‌که رابطه (۳) نشان‌دهنده مجموع وزن‌دار پارامترهاست. در رابطه (۲)، I_i مقادیر کمی هر یک از پارامترها و W_i وزن مربوط به هر پارامتر را نشان می‌دهد. وزن هر پارامتر در جدول (۳) ارائه شده است (Aghaee *et al.*, 2020).

Table 3. The $IRWQI_{SC}$ parameters and their weights

Parameters	Weight	Unit
Faecal coliform	0.14	MPN/100 ml
BOD ₅	0.117	mg/L
Nitrate	0.108	mg/L
Dissolved oxygen saturation	0.097	Percent
Electrical conductivity	0.096	μs/cm
COD	0.093	mg/L
Ammonium	0.09	mg/L
Phosphate	0.087	mg/L
Turbidity	0.062	NTU
Total hardness	0.059	mg CaCO ₃ /L
pH	0.051	-

$$IRWQI_{SC} = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n w_i \quad \text{رابطه ۳}$$

در معادله بالا، W_i وزن پارامتر i ام، n تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی است. پس از محاسبه شاخص، از جدول (۴) معادل توصیفی آن تعیین می‌شود.

Table 4. Descriptive classification of the $IRWQI_{SC}$ index

Index value	Classification
<15	Very bad
15-29.9	Bad
30-44.9	Relatively bad
45-55	Moderate
55.1-70	Relatively good
70.1-85	Good
>85	Very good

۳.۲.۲. شاخص پارامترهای سمی کیفیت منابع آب سطحی ایران ($IRWQI_{ST}$)

یکی از شاخص‌های کیفیت آب در ایران است که به‌طور خاص برای ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی از نظر پارامترهای سمی تدوین شده است. این شاخص در کنار سایر شاخص‌های کیفیت آب ایران (مانند $IRWQI_{SC}$ برای پارامترهای متداول آب سطحی) توسط متخصصان ایرانی توسعه‌یافته و در سال ۱۳۹۲ به‌عنوان شاخص‌های ملی کیفیت منابع آب ایران منتشر شده‌اند.

هدف اصلی $IRWQI_{ST}$ ارائه یک دیدگاه شفاف و قابل‌درک از سلامت آب از منظر آلاینده‌های سمی است. این شاخص با ترکیب چندین پارامتر کلیدی سمی در یک فرمول ریاضی، یک عدد واحد ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده میزان آلودگی آب به سموم است.

این شاخص به مدیریت پایدار منابع آب، برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و اطلاع‌رسانی عمومی در مورد وضعیت

کیفیت آب کمک می‌کند، به‌ویژه در مناطقی که در معرض آلودگی با مواد سمی قرار دارند. نمره به‌دست‌آمده از این شاخص می‌تواند آب را در دسته‌بندی‌های مختلف (مثلاً خیلی بد، بد، نسبتاً بد، متوسط، نسبتاً خوب، خوب و خیلی خوب) قرار دهد. محاسبه مقدار شاخص با استفاده از رابطه (۴) انجام می‌شود.

$$IRWQI_{ST} = \left[\prod_{i=1}^n I_i W_i \right]^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{رابطه ۴}$$

که در آن:

$$\gamma = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{رابطه ۵}$$

در این روابط، W_i وزن پارامتر i ام، n تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر i ام از منحنی رتبه‌بندی هست. مقدار وزن هر پارامتر براساس جدول (۵) محاسبه می‌گردد.

Table 5. The $IRWQI_{ST}$ parameters and their weights

Parameters	Weight	Unit
Arsenic	0.160	ppb
Mercury	0.146	ppb
TPH	0.135	ppb
Lead	0.115	ppb
Cadmium	0.115	ppb
Chromium	0.105	ppb
Cyanide	0.079	ppb
Iron	0.077	ppb
Manganese	0.070	ppb

برای تعیین معادل توصیفی شاخص محاسبه‌شده، از جدول (۶) استفاده می‌شود.

Table 6. Descriptive classification of the $IRWQI_{ST}$ index

Index value	Classification
<15	Very bad
15-29.9	Bad
30-44.9	Relatively bad
45-55	Moderate
55.1-70	Relatively good
70.1-85	Good
>85	Very good

۳.۲. تحلیل آماری

۳.۲.۱. ضریب همبستگی پیرسون^{۱۲}

ضریب همبستگی پیرسون یک معیار آماری پارامتریک است که برای سنجش شدت و جهت رابطه خطی میان دو متغیر پیوسته به کار می‌رود. مقدار این شاخص که از تقسیم کوواریانس دو متغیر بر حاصل ضرب انحراف معیار آن‌ها به دست می‌آید، دامنه‌ای بین -۱ تا +۱ دارد. مقادیر نزدیک به +۱ بیانگر همبستگی مستقیم قوی (افزایش هم‌زمان متغیرها)، مقادیر نزدیک به -۱ نشان‌دهنده همبستگی معکوس (رابطه معکوس متغیرها) و مقدار صفر نشان‌دهنده فقدان رابطه خطی است. در مطالعات محیط‌زیستی، این ضریب ابزاری کلیدی برای درک روابط متقابل پارامترها و شناسایی الگوهای مشترک تغییرات محسوب می‌شود (Šverko Zoran et al., 2022) فرمول تحلیل همبستگی پیرسون به صورت رابطه (۶) است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن، ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای x و y تعداد مشاهدات، n مقدار x_i -امین مشاهده از متغیر x ؛ y_i مقدار y -امین مشاهده از متغیر y ؛ $\bar{x}$ میانگین مقادیر متغیر x ؛ $\bar{y}$ میانگین مقادیر متغیر y ؛ مقدار r_{xy} همیشه بین -1 و $+1$ است؛ مقدار مثبت نشان‌دهنده همبستگی مستقیم (با افزایش یک متغیر، دیگری نیز افزایش می‌یابد)، مقدار منفی نشان‌دهنده همبستگی معکوس (با افزایش یک متغیر، دیگری کاهش می‌یابد) و مقدار صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی خطی است.

۲.۳.۲. نمودار دندروگرام^{۱۳}

جهت تعیین الگوی همبستگی و گروه‌بندی داده‌ها، از نمودار دندروگرام استفاده می‌شود. دندروگرام نموداری درختی است که ساختار سلسله‌مراتبی متغیرها را بر مبنای ویژگی‌های مشترک آن‌ها ترسیم می‌کند. در این نمودار، محورهای اتصال نشان‌دهنده سطح شباهت میان خوشه‌ها بوده و امکان تفسیر دقیق روابط درونی پارامترهای مورد مطالعه و شناسایی گروه‌های همگن را فراهم می‌آورد (Yotova et al., 2021).

۳. یافته‌های پژوهش

بخش حاضر به تحلیل و تفسیر نتایج حاصل از اندازه‌گیری و محاسبات شاخص‌های کیفیت آب می‌پردازد. یافته‌های کمی به‌دست‌آمده برای پارامترهای فیزیکوشیمیایی و شاخص‌های NSFQI، IRWQI_{SC} و IRWQI_{ST}، در این بخش مورد بررسی دقیق قرار گرفته و دلالت‌های زیست‌محیطی و مدیریتی آن‌ها تشریح می‌شود.

۳.۱. نتایج شاخص NSFQI

ارزیابی کیفیت آب در سیستم رودخانه‌ای مورد مطالعه در شهر تهران، با استفاده از شاخص کیفیت آب سطحی بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI) انجام شد. این شاخص با در نظر گرفتن چندین پارامتر فیزیکی، شیمیایی و میکروبی، تصویری کلی از کیفیت آب ارائه می‌دهد. نتایج حاصل از این ارزیابی نشان می‌دهد که کیفیت آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری شده به‌طور عمده در محدوده «متوسط» تا «بد» قرار دارد. در ایستگاه‌های بالادست و میانه شاخه اصلی رودخانه، کیفیت آب با توجه به شاخص NSFQI در محدوده «متوسط» و «بد» قرار داشت. ایستگاه اول (S1) با مقدار شاخص ۵۳/۰، در دسته «متوسط» طبقه‌بندی می‌شود. این وضعیت به دلیل مقادیر متوسط BOD (۱۰ mg/L) است که نشان‌دهنده وجود آلودگی آلی است و کلیفرم مدفوعی بالا، (۳۲۰۰ col/100mL) که منشأ آلودگی میکروبی از فاضلاب‌های شهری یا رواناب‌های کشاورزی را تأیید می‌کند.

در ایستگاه دوم (S2)، مقدار شاخص NSFQI برابر با ۶۴/۸ بود که آب را در دسته «متوسط» قرار می‌دهد. با وجود مقادیر نسبتاً خوب BOD (۱۰ mg/L) و DO (۷/۴۵ mg/L)، غلظت فسفات (۰/۱۱ mg/L) که یک شاخص کلیدی برای آلودگی ناشی از مواد شوینده و کودهای کشاورزی است و TSS (۳۹ mg/L) که نشان‌دهنده وجود مواد معلق است، بر کاهش کیفیت کلی آب در این ایستگاه تأثیر گذاشته‌اند. کیفیت آب در ایستگاه سوم (S3) به‌وضوح تنزل می‌یابد و مقدار شاخص (NSFWQI) به ۴۴/۰ می‌رسد که آن را در دسته «بد» قرار می‌دهد. این کاهش قابل توجه به دلیل اکسیژن محلول DO پایین (۳/۱۷ mg/L) و BOD بالا (۱۹ mg/L) است که نشانگر افزایش مصرف اکسیژن توسط آلاینده‌های آلی است. دلیل اصلی این افت ناگهانی در اکسیژن محلول و افزایش بار آلی است. شاخه فرعی رودخانه، شامل ایستگاه چهارم (S4) و ایستگاه پنجم (S5)، الگوی کیفی متفاوتی را به نمایش گذاشتند. در ایستگاه چهارم (S4)، مقدار شاخص NSFQI برابر با ۶۱/۸ بود که آن را در دسته «متوسط» قرار می‌دهد. این کیفیت با وجود BOD نسبتاً بالا (۲۲ mg/L) و TSS،

(mg/L) ۳۲، به دلیل DO مطلوب (mg/L) ۸/۰۶ در این بخش، در وضعیت متوسط قرار دارد. با این حال، در ایستگاه پنجم (S5)، کیفیت آب به شدت کاهش یافت و مقدار شاخص به ۴۶/۱ رسید که در دسته «بد» طبقه‌بندی می‌شود. این کاهش چشم‌گیر به‌طور عمده به دلیل مقادیر فوق‌العاده بالای BOD، (mg/L) ۱۵۰ و TSS، (mg/L) ۳۹۷ است.

نقطه تلاقی این شاخه فرعی با شاخه اصلی در ایستگاه ششم (S6) مشخص می‌شود، جایی که مقدار شاخص NSFQI برابر با ۴۸/۸ بود که در دسته «بد» قرار می‌گیرد. این موضوع به‌وضوح نشان می‌دهد که بار آلودگی سنگین از شاخه فرعی، به‌طور قابل‌توجهی بر کانال اصلی رودخانه تأثیر گذاشته و ظرفیت رقیق‌سازی آن را در این نقطه کاهش داده است.

در ادامه مسیر به سمت پایین‌دست، کیفیت آب همچنان در وضعیت نامطلوبی قرار دارد. ایستگاه هفتم (S7) با مقدار NSFQI برابر با ۴۳/۳، در دسته «بد» طبقه‌بندی شد. این وضعیت به دلیل اکسیژن محلول بسیار پایین (mg/L) ۰/۶۴ و مقادیر بالای BOD، (mg/L) ۱۱۰ و فسفات (mg/L) ۱۴/۲ است. اکسیژن محلول بسیار پایین نشان‌دهنده بار آلودگی آلی شدید و فسفات بالا نیز حاکی از آلودگی با مواد مغذی است که هر دو به‌طور معمول از منابع فاضلابی شهری و صنعتی ناشی می‌شوند. ایستگاه هشتم (S8) با مقدار شاخص ۴۳/۱، در دسته «بد» قرار دارد. در این ایستگاه، مقادیر بسیار بالای BOD، (mg/L) ۴۸۰ و TSS، (mg/L) ۱۶۹۰ نشان‌دهنده ورود حجم عظیمی از آلاینده‌های آلی و جامدات معلق است که کیفیت آب را به شدت کاهش داده است. ایستگاه نهم (S9) با مقدار شاخص ۴۵/۲، در دسته «بد» قرار دارد. این ایستگاه نیز به دلیل مقادیر بسیار بالای BOD، (mg/L) ۹۰ و TSS، (mg/L) ۱۶۰ تحت تأثیر آلودگی‌های سنگین قرار دارد که نشان می‌دهد بار آلودگی از نقاط بالادست به سمت پایین‌دست در حال انتقال و انباشت است. ایستگاه دهم (S10) با مقدار شاخص ۵۴/۲، در دسته «متوسط» قرار می‌گیرد. با وجود BOD نسبتاً بالا (mg/L) ۶۸ و TSS، (mg/L) ۵۸، بهبود نسبی در مقادیر DO، (mg/L) ۱/۶۴ و pH (۷/۲۴) به افزایش جزئی شاخص در این نقطه کمک کرده است. ایستگاه یازدهم (S11) با مقدار شاخص ۵۳/۷، در دسته «متوسط» قرار دارد. این وضعیت با مقادیر نسبتاً بالا در BOD، (mg/L) ۴۰ و TSS، (mg/L) ۲۳ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تداوم آلودگی آلی و جامد در این بخش است. ایستگاه دوازدهم (S12) با مقدار شاخص ۴۶/۱، در دسته «بد» قرار می‌گیرد. کیفیت آب در این ایستگاه به دلیل BOD بالا (mg/L) ۳۵ و TSS بالا (mg/L) ۱۸ همچنان در وضعیت نامطلوبی است. ایستگاه سیزدهم (S13) با مقدار شاخص ۴۸/۱، در دسته «بد» قرار دارد. مقادیر بالای BOD، (mg/L) ۳۳ و TSS، (mg/L) ۳۶۵ و همچنین کدورت ۱۹۵ (ntu) عوامل اصلی کاهش کیفیت آب در این ایستگاه هستند. ایستگاه چهاردهم (S14) با مقدار شاخص ۶۱/۶، در دسته «متوسط» قرار می‌گیرد. بهبود کیفیت در این نقطه به دلیل اکسیژن محلول بالا (mg/L) ۰/۹۰ و مقادیر پایین TSS، (mg/L) ۶ و کدورت (ntu) ۲/۳ است که ممکن است ناشی از تأثیرات خود پالایی یا رقیق‌سازی باشد. ایستگاه پانزدهم (S15) با مقدار شاخص ۴۸/۱، در دسته «بد» قرار می‌گیرد. کیفیت آب در این ایستگاه با مقادیر BOD، (mg/L) ۲۶ و TSS بالا (mg/L) ۱۴۸ و کدورت ۷۵/۳ (ntu) همچنان در وضعیت نامطلوبی است.

تحلیل مقادیر شاخص NSFQI در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به‌وضوح نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه در اکثر نقاط در وضعیت «متوسط» یا «بد» قرار دارد. ایستگاه‌های بالادست کیفیت نسبتاً بهتری دارند، اما با حرکت رودخانه به سمت پایین‌دست و دریافت ورودی از شاخه‌های فرعی، کیفیت آب به سرعت به وضعیت نامطلوب تنزل می‌یابد. این الگو بر نیاز حیاتی به اقدام‌های مؤثر کنترل آلودگی و یک رویکرد مدیریتی پایدار برای حفاظت از رودخانه تأکید دارد، به‌ویژه با تمرکز بر کاهش بار آلودگی آلی و جامدات معلق که عوامل اصلی کاهش کیفیت آب در این رودخانه هستند. توزیع شاخص NSFQI در این رودخانه، در شکل (۲) نمایش داده شده است.

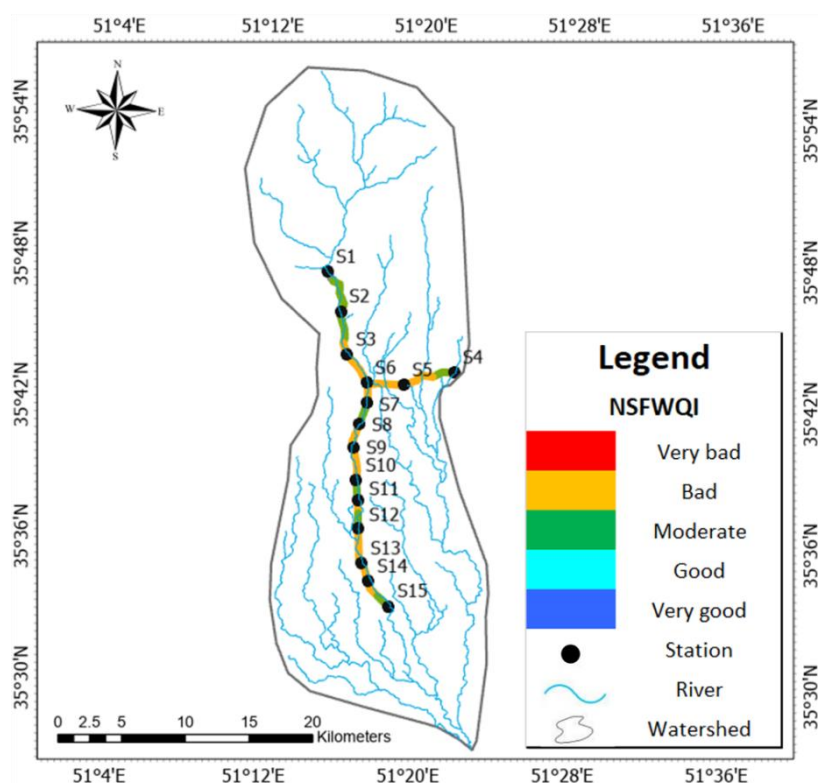


Figure 2. Distribution of NSFQI in the river

۲.۳. نتایج شاخص $IRWQI_{SC}$

بررسی کیفیت آب در سیستم رودخانه‌ای مورد مطالعه در شهر تهران، با استفاده از شاخص کیفیت آب سطحی ایران ($IRWQI_{SC}$) در ۱۵ ایستگاه نمونه‌برداری، انجام گرفت. مقادیر این شاخص برای هر ایستگاه، به همراه طبقه‌بندی توصیفی آن‌ها، وضعیت متفاوتی را نشان می‌دهد که به‌طور عمده در محدوده‌های «متوسط» تا «خیلی بد» قرار می‌گیرد. ایستگاه‌های اولیه در شاخه اصلی، یعنی ایستگاه اول (S1) تا ایستگاه سوم (S3)، نشان‌دهنده شروع کاهش کیفیت آب هستند. در ایستگاه اول (S1)، مقدار شاخص $IRWQI_{SC}$ برابر با ۳۷ بود که آب را در دسته «نسبتاً بد» طبقه‌بندی می‌کند. این وضعیت به دلیل سطوح متوسط آلاینده‌های مختلفی از جمله BOD (10 mg/L) و COD (24 mg/L) و همچنین تعداد بالای کلیفرم مدفوعی بالا، (3200 col/100mL) است. باوجود اکسیژن محلول DO در حد $6/05 \text{ (mg/L)}$ ، بار میکروبی بالا نشان‌دهنده وجود منابع آلودگی آلی و میکروبی، احتمالاً ناشی از فعالیت‌های انسانی و رواناب‌ها، است. در پایین‌دست‌تر، ایستگاه دوم (S2) با مقدار $IRWQI_{SC}$ برابر با $32/5$ ، همچنان در طبقه‌بندی «نسبتاً بد» قرار می‌گیرد. این ایستگاه، باوجود تعداد کلیفرم مدفوعی کمتر از یک (col/100mL)، وجود آمونیاک بالا ($21/5 \text{ mg/lit NH}_4$) را نشان می‌دهد که بیانگر ورود مداوم پساب‌های متغیر است. این کاهش آلودگی میکروبی ممکن است به دلیل رقیق‌سازی یا خود پالایی طبیعی رودخانه باشد. در ادامه مسیر، کیفیت آب به‌وضوح تنزل می‌یابد؛ به‌طوری‌که در ایستگاه سوم (S3) مقدار شاخص $IRWQI_{SC}$ به $23/1$ رسیده و در دسته «بد» قرار می‌گیرد. این کاهش قابل توجه در کیفیت آب به احتمال زیاد ناشی از ترکیبی از عوامل نظیر تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی و رواناب‌های کشاورزی است. عوامل کلیدی مؤثر در این زوال شامل افزایش آمونیاک BOD ($11/5 \text{ mg/L}$) بالا (19 mg/L) و اکسیژن محلول بسیار پایین ($3/17 \text{ mg/L}$) است. شاخه فرعی رودخانه که توسط ایستگاه‌های چهارم (S4) و پنجم (S5) مشخص می‌شود، الگوی کیفی متفاوتی دارد.

ایستگاه چهارم (S4) دارای مقدار $IRWQI_{SC}$ برابر با ۴۳/۹ بود که آن را در دسته «نسبتاً بد» قرار می‌دهد. در این ایستگاه، BOD برابر با ۲۲ (mg/L)، COD برابر با ۴۸ (mg/L) و DO برابر با ۸/۰۶ (mg/L) بود. این سطوح آلودگی متوسط نشان‌دهنده ترکیبی از تأثیرات مسکونی و کشاورزی است. با این حال، ایستگاه پنجم (S5) کاهش شدید کیفیت را با مقدار $IRWQI_{SC}$ برابر با ۱۱/۸ نشان می‌دهد که آن را در دسته «خیلی بد» طبقه‌بندی می‌کند. این امر عمدتاً به دلیل مقادیر فوق‌العاده بالای BOD، ۱۵۰ (mg/L)، COD، ۳۱۶ (mg/L) و آمونیاک ۳۹/۵ (mg/lit NH_4) + است. این آلودگی شدید هم‌چنین با اکسیژن محلول پایین ۳/۱ (mg/L) و کدورت استثنایی بالا ۲۱۰ (ntu) همراه است. این آلاینده‌های متمرکز به شدت نشان‌دهنده تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی تصفیه نشده یا با تصفیه ناکافی به شاخه فرعی رودخانه است. نقطه تلاقی شاخه فرعی با شاخه اصلی در ایستگاه ششم (S6) مشخص می‌شود، جایی که مقدار $IRWQI_{SC}$ برابر با ۱۵/۶ است و در دسته «بد» قرار می‌گیرد. آب در این ایستگاه با BOD بسیار بالا ۱۱۰ (mg/L) و DO به طور قابل توجه پایین ۵/۶۷ (mg/L) مشخص می‌شود. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که بار آلودگی از شاخه فرعی، همان‌طور که در ایستگاه پنجم دیده شد، به طور قابل توجهی بر کانال اصلی رودخانه تأثیر گذاشته و منجر به کاهش کیفیت آب شده است. در ادامه مسیر به سمت پایین دست، کیفیت آب همچنان ضعیف است و در بسیاری از نقاط به شدت وخیم می‌شود. ایستگاه هفتم (S7) با مقدار $IRWQI_{SC}$ برابر با ۱۱/۷ در دسته «خیلی بد» قرار می‌گیرد. این وضعیت به دلیل افزایش شدید آلاینده‌هایی مانند BOD، ۱۱۰ (mg/L) و COD، ۲۴۰ (mg/L) و هم‌چنین کاهش چشم‌گیر اکسیژن محلول ۰/۶۴ (mg/L) است. به طور کلی، مقدار بالای BOD و COD نشان‌دهنده ورود زیاد مواد آلی و آلاینده‌های اکسیژن‌خواه به رودخانه است و کاهش اکسیژن محلول نیز بیانگر فشار شدید آلودگی بر اکوسیستم آبی است. ایستگاه هشتم (S8) و ایستگاه نهم (S9) نیز با مقادیر به ترتیب ۱۲/۴ و ۱۳/۲ در همین دسته «خیلی بد» قرار دارند و مقادیر فوق‌العاده بالای BOD و COD در آن‌ها ثبت شده است. در ادامه مسیر، ایستگاه دهم (S10) با مقدار شاخص ۱۶/۶ و ایستگاه یازدهم (S11) با مقدار ۲۹ در دسته «بد» قرار می‌گیرند. این ایستگاه‌ها نیز همچنان تحت تأثیر آلودگی‌های موجود در طول مسیر هستند. ایستگاه دوازدهم (S12) نیز با مقدار شاخص ۱۸/۹ در دسته «بد» قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تداوم بار آلودگی از ایستگاه‌های بالادست است. این وضعیت با مقادیر بالای BOD، ۳۵ (mg/L)، COD، ۷۶ (mg/L)، آمونیاک ۶ (mg/lit NH_4) + و کلیفرم مدفوعی بالا، ۱۶۰۰ (col/100mL) در این نقطه تأیید می‌شود. وجود آمونیاک و کلیفرم مدفوعی بالا می‌تواند نشان‌دهنده ورود فاضلاب خام یا پساب‌های تصفیه نشده به رودخانه باشد. کیفیت آب در ایستگاه سیزدهم (S13) با مقدار شاخص ۲۶/۷ در دسته «بد» قرار دارد که ناشی از مقادیر بالای BOD، ۳۳ (mg/L) و COD، ۷۲ (mg/L) و کدورت بالا ۱۹۵ (ntu) است. کدورت بالا نشان‌دهنده وجود مقدار زیاد ذرات معلق در آب است که می‌تواند نفوذ نور را کاهش داده و شرایط زیستی آبزیان را نامناسب‌تر کند. در نهایت، در انتهای مسیر، ایستگاه چهاردهم (S14) با مقدار ۲۹/۹ و ایستگاه پانزدهم (S15) با مقدار ۲۹/۳ همچنان در دسته «بد» قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده تداوم وضعیت نامطلوب کیفیت آب در تمام مسیر پایین دست رودخانه است.

تحلیل مقادیر شاخص $IRWQI_{SC}$ در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به وضوح روند مکانی کاهش کیفیت آب را نشان می‌دهد. ایستگاه‌های بالادست کیفیت نسبتاً بهتری دارند، اما با حرکت رودخانه به سمت پایین دست و دریافت ورودی از شاخه‌های فرعی و مناطق پرجمعیت، کیفیت آب به سرعت به وضعیت «بسیار بد» تنزل می‌یابد. این الگو بر نیاز حیاتی به اقدام‌های مؤثر کنترل آلودگی و یک رویکرد مدیریتی پایدار برای حفاظت از رودخانه در برابر آلودگی‌های بیش‌تر تأکید دارد. توزیع شاخص $IRWQI_{SC}$ در این رودخانه، در شکل (۳) نمایش داده شده است.

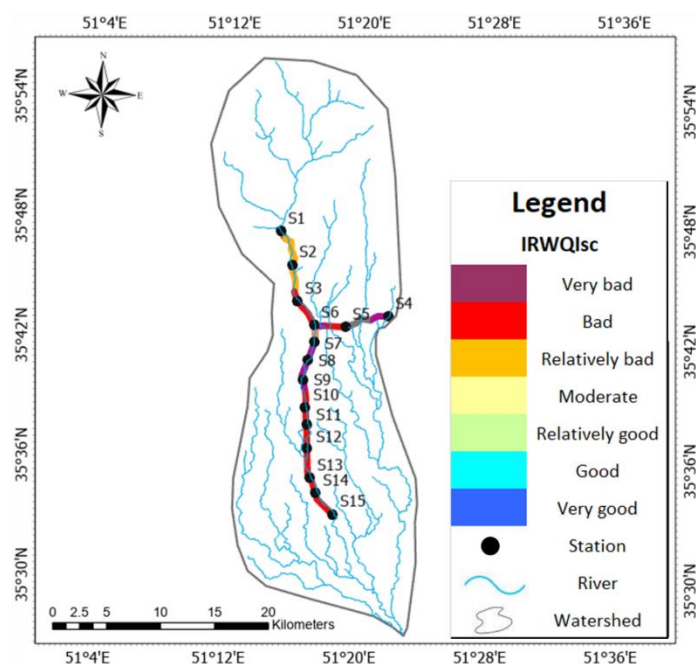


Figure 3. Distribution of IRWQI_{sc} index in the river

۳.۳. نتایج شاخص IRWQI_{ST}

ارزیابی کیفیت آب در سیستم رودخانه‌ای مورد مطالعه در شهر تهران، با استفاده از شاخص کیفیت آب سطحی ایران (IRWQI_{ST}) در ۱۵ ایستگاه مشخص شده انجام شد. این شاخص به‌طور خاص بر آلاینده‌های فلزات سنگین (As, Hg, Pb, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn) و هیدروکربن‌های نفتی (TPH) تمرکز دارد تا تصویری از سلامت رودخانه در برابر آلودگی‌های صنعتی ارائه دهد. مقادیر شاخص برای هر ایستگاه، به همراه طبقه‌بندی توصیفی آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ایستگاه‌های بالادست و میانه شاخه اصلی رودخانه، کیفیت آب با توجه به شاخص IRWQI_{ST} در محدوده «خوب» قرار داشت. ایستگاه اول (S1) با مقدار شاخص ۷۹، در دسته «خوب» طبقه‌بندی می‌شود. این کیفیت مطلوب به دلیل مقادیر بسیار پایین تمامی فلزات سنگین و TPH در این نقطه است که نشان می‌دهد این بخش از رودخانه از منابع آلودگی نقطه‌ای صنعتی دور است و تنها تحت تأثیر رواناب‌های طبیعی یا منابع غیر نقطه‌ای با بار آلودگی پایین قرار دارد. در ایستگاه دوم (S2)، مقدار شاخص IRWQI_{ST} برابر با ۷۹ بود که آب را در دسته «خوب» قرار می‌دهد. مقادیر فلزات سنگین در این ایستگاه نیز پایین بود. این وضعیت نشان‌دهنده تداوم کیفیت خوب آب در بالادست رودخانه است.

کیفیت آب در ایستگاه سوم (S3) در وضعیت نسبتاً خوبی قرار داشت و مقدار شاخص IRWQI_{ST} برابر با ۷۵/۴ بود که آن را در دسته «خوب» قرار می‌دهد. این کاهش جزئی در شاخص نسبت به ایستگاه‌های بالادست، با افزایش مقدار آرسنیک (As) به ۵/۰ ppb و کروم (Cr) به ۱۳/۰ ppb مرتبط است. افزایش این فلزات سنگین می‌تواند به دلیل تخلیه پساب‌های صنعتی از منابعی نظیر صنایع آبکاری، چرم‌سازی یا رنگ‌سازی در نزدیکی این ایستگاه باشد. شاخه فرعی رودخانه، شامل ایستگاه چهارم (S4) و ایستگاه پنجم (S5)، الگوی کیفی متفاوتی را به نمایش گذاشتند. در ایستگاه چهارم (S4)، مقدار شاخص IRWQI_{ST} برابر با ۷۹ بود که آن را در دسته «خوب» قرار می‌دهد. این کیفیت با مقادیر پایین تمامی آلاینده‌ها تأیید می‌شود. با این حال، در ایستگاه پنجم (S5)، کیفیت آب به ۵۴/۸ کاهش یافت که در دسته «متوسط»

طبقه‌بندی می‌شود. این کاهش چشم‌گیر به‌طور عمده به‌دلیل مقادیر فوق‌العاده بالای سرب (Pb) به ۹۵/۰ ppb، کروم (Cr) به ۱۸/۰ ppb و منگنز (Mn) به ۶۱/۰ ppb است. نقطه تلاقی این شاخه فرعی با شاخه اصلی در ایستگاه ششم (S6) مشخص می‌شود، جایی که مقدار شاخص $IRWQI_{ST}$ برابر با ۷۹ بود که در دسته «خوب» قرار می‌گیرد. این نتیجه نشان می‌دهد که با وجود آلودگی شدید در شاخه فرعی، کیفیت آب در شاخه اصلی در نقطه تلاقی، به‌دلیل حجم بیش‌تر جریان و ظرفیت رقیق‌سازی، در وضعیت مطلوبی باقی‌مانده است و اثر بار آلودگی شاخه فرعی به‌سرعت کاهش یافته است. در ادامه مسیر به سمت پایین‌دست، کیفیت آب همچنان در وضعیت مطلوبی قرار دارد. ایستگاه هفتم (S7) با مقدار $IRWQI_{ST}$ برابر با ۶۴/۳ در دسته «نسبتاً خوب» قرار می‌گیرد. این کاهش در شاخص با افزایش مقادیر سرب (Pb) به ۳۸/۰ ppb و منگنز (Mn) به ۱۰۴/۰ ppb مرتبط است که می‌تواند ناشی از تخلیه پساب‌های شهری یا صنعتی پراکنده در طول مسیر باشد. ایستگاه هشتم (S8) و ایستگاه نهم (S9) نیز با مقادیر به‌ترتیب ۶۶/۴ و ۷۶ در دسته «نسبتاً خوب» و «خوب» قرار دارند. این ارقام نشان‌دهنده تداوم وضعیت نسبتاً مطلوب کیفیت آب در این بخش از رودخانه است. در ایستگاه هشتم، مقدار بالای منگنز (Mn) به ۱۸۵۳/۰ ppb عامل اصلی کاهش شاخص است. در ایستگاه نهم نیز مقدار منگنز (Mn) به ۷۹/۰ ppb می‌رسد.

در ادامه مسیر، ایستگاه دهم (S10) با مقدار شاخص ۷۵/۸ و ایستگاه یازدهم (S11) با مقدار ۷۹ در دسته «خوب» قرار می‌گیرند. در ایستگاه دهم، افزایش کروم (Cr) به ۲۵/۰ ppb و منگنز (Mn) به ۴۴/۰ ppb بر مقدار شاخص تأثیر گذاشته است که این آلاینده‌ها نیز می‌توانند از منابع صنعتی وارد شده باشند. ایستگاه دوازدهم (S12) نیز با مقدار شاخص ۷۹ در دسته «خوب» قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تداوم کیفیت مطلوب در این بخش از رودخانه است. کیفیت آب در ایستگاه سیزدهم (S13) با مقدار شاخص ۷۹ در دسته «خوب» قرار دارد. در نهایت، در انتهای مسیر، ایستگاه چهاردهم (S14) با مقدار ۷۹ و ایستگاه پانزدهم (S15) با مقدار ۷۷/۷ در دسته «خوب» قرار می‌گیرند. در ایستگاه پانزدهم، افزایش منگنز (Mn) به ۲۷/۰ ppb و کروم (Cr) به ۱۲/۰ ppb، عامل کاهش جزئی شاخص نسبت به ایستگاه‌های با مقدار ۷۹ است. این روند نشان می‌دهد که در بخش‌های پایین‌دست، باوجود افزایش جزئی آلاینده‌ها، کیفیت کلی آب در وضعیت مطلوبی باقی‌مانده است. تحلیل مقادیر شاخص $IRWQI_{ST}$ در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به‌وضوح نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه به‌طور کلی در وضعیت مطلوبی قرار دارد. این شاخص با تمرکز بر آلاینده‌های صنعتی نظیر فلزات سنگین، تصویری دقیق و هدفمند از تأثیر پساب‌های صنعتی بر سلامت رودخانه ارائه می‌دهد که یک مزیت کلیدی نسبت به شاخص‌های عمومی‌تر مانند $IRWQI_{SC}$ است. در فصل تر، دبی جریان بالا معادل دو مترمکعب بر ثانیه باعث ایجاد ظرفیت رقیق‌سازی قابل‌توجهی شده است که اثرات ورود فاضلاب را در ایستگاه‌های پایین‌دست تعدیل می‌کند و شاخص‌ها را در محدوده قابل‌قبول نگه می‌دارد، اما در فصل خشک، کاهش دبی به معادل ۰/۰۵ مترمکعب بر ثانیه (یک‌چهارم دبی زمستانه)، عملاً ظرفیت رقیق‌سازی رودخانه را از بین برده است. در این شرایط، نسبت حجم فاضلاب ورودی به حجم آب رودخانه افزایش یافته و غلظت آلاینده‌هایی نظیر آمونیوم و فلزات سنگین در ایستگاه‌های متأثر از آلودگی (مانند S5) به‌شدت بالا رفته است. بنابراین، اگرچه رودخانه در حالت سیلابی توان خودپالایی بالایی دارد، اما در شرایط جریان پایه تابستانه، به‌شدت در برابر تخلیه آلاینده‌های نقطه‌ای آسیب‌پذیر است. با این وجود، ظرفیت خودپالایی و رقیق‌سازی بالای رودخانه در شاخه اصلی، باعث شده است که باوجود این بار آلودگی، کیفیت آب در ایستگاه تلاقی و در مسیر پایین‌دست همچنان در محدوده «خوب» باقی بماند. این یافته‌ها بر اهمیت حیاتی شناسایی، کنترل و مدیریت منابع آلودگی صنعتی تأکید می‌کنند تا از سلامت پایدار اکوسیستم رودخانه در بلندمدت اطمینان حاصل شود. توزیع شاخص $IRWQI_{ST}$ در این رودخانه، در شکل (۴) نمایش داده شده است.

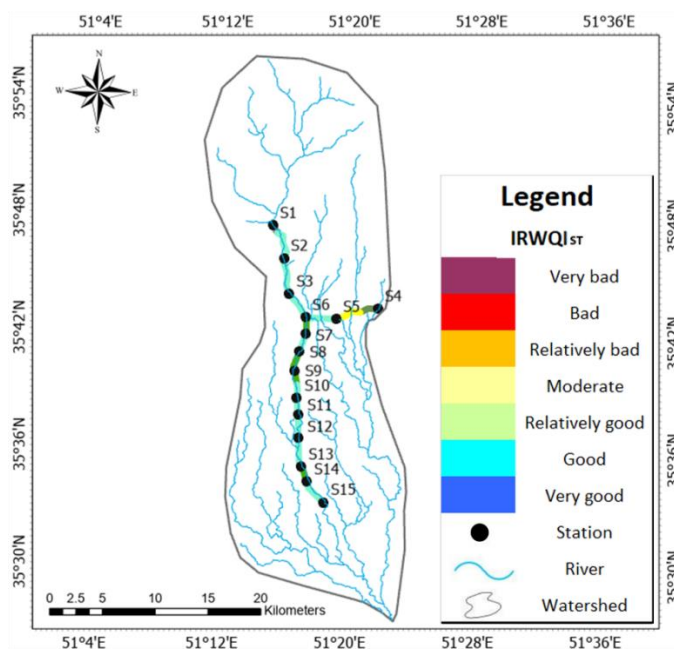


Figure 4. Distribution of IRWQI_{ST} in the river

۴.۳. آنالیز آماری

به‌منظور بررسی روابط میان متغیرهای کیفی آب و شناسایی آلاینده‌های دارای منشأ مشترک، از ماتریس همبستگی پیرسون و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی^{۱۵} استفاده شد. این روش‌ها همچنین برای گروه‌بندی متغیرها و ایستگاه‌های مشابه و تفسیر اثر منابع آلاینده بر بخش‌های مختلف رودخانه به‌کار رفتند.

۴.۳.۱. آنالیز آماری متغیرهای NSFQI

به‌منظور درک روابط درونی میان نه متغیر کیفی شاخص ارزیابی کیفی آب NSFQI از تکنیک‌های آماری تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و ماتریس همبستگی پیرسون بهره‌گیری شد. نتایج این پردازش‌های آماری برای نه متغیر کلیدی در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.

براساس نمودار دندروگرام (شکل ۵-a)، متغیرهای موردبررسی در دو خوشه اصلی و مجزا طبقه‌بندی گردیدند. خوشه نخست دربرگیرنده متغیرهای اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD)، کل مواد جامد معلق (TSS)، کدورت و یون فسفات است. در این خوشه، پیوند بسیار نزدیک و فاصله اتصال ناچیز میان BOD و TSS به‌روشنی گواه آن است که بخش عمده بار آلی موجود در آب دارای ماهیت ذره‌ای و غیرمحللول بوده و قرارگیری کدورت و فسفات در امتداد این شاخه نیز مبین رفتار آماری یکسان و ورود هم‌زمان این آلاینده‌ها به محیط رودخانه است. در مقابل، خوشه دوم به دو زیرگروه مجزا تفکیک می‌شود؛ پیوند متغیرهای دما و کلیفرم مدفوعی در زیرگروه اول، بیانگر همبستگی و وابستگی مستقیم میزان حضور این باکتری‌ها با تغییرات حرارتی آب است. در زیرگروه دوم نیز هم‌جواری اکسیژن محللول (DO)، اسیدیته (pH) و نیترات به ثبت رسیده است که این آرایش نشان‌گر ارتباط درونی شرایط فیزیکیوشیمیایی پایه در آب رودخانه می‌باشد. همگام با این نتایج، بررسی ماتریس ضریب همبستگی پیرسون (شکل ۵-b) الگوهای استخراج‌شده از دندروگرام را کاملاً تأیید می‌نماید. قوی‌ترین ارتباط مثبت ثبت‌شده مربوط به تقابل BOD و TSS با ضریب همبستگی ($r=0.95$) است که

ماهیت معلق آلاینده‌های آلی را از نظر ریاضی اثبات می‌کند. همچنین ارتباط مثبت چشم‌گیر میان نیترات و اسیدیته ($r=0/86$) و تقابل مثبت دما با کلیفرم مدفوعی ($r=0/44$) با وضوح در ماتریس قابل ارزیابی است. از سوی دیگر، واکاوای همبستگی‌های منفی نشان‌دهنده تقابل معکوس و معنادار یون فسفات با متغیرهای اکسیژن محلول ($r=-0/53$) و اسیدیته ($r=-0/51$) است؛ بدین معنا که افزایش غلظت فسفات در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به‌طور مستقیم با افت سطح اکسیژن و کاهش میزان pH همراه بوده است. در نهایت، ارتباط منفی متغیر BOD با اسیدیته ($r=-0/42$) نیز گواه دیگری بر کاهش سطح pH آب هم‌زمان با افزایش بار آلی محسوب می‌شود.

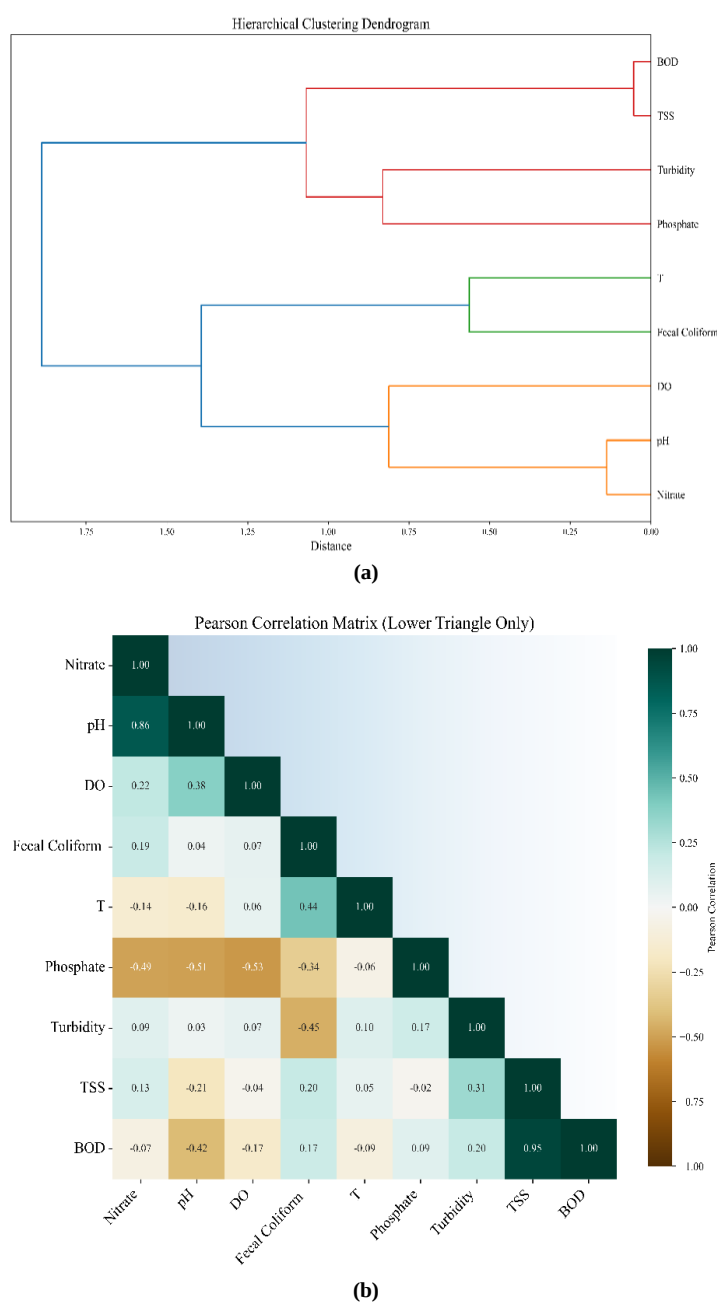


Figure 5. Dendrogram and Correlation coefficient matrix of NSFQI parameters

۲.۴.۳. آنالیز آماری متغیرهای IRWQI_{SC}

نتایج ارزیابی دقیق روابط درونی میان ۱۱ متغیر کیفی مؤثر در محاسبه شاخص کیفیت آب IRWQI_{SC}، در شکل (۶) نشان داده شده‌اند.

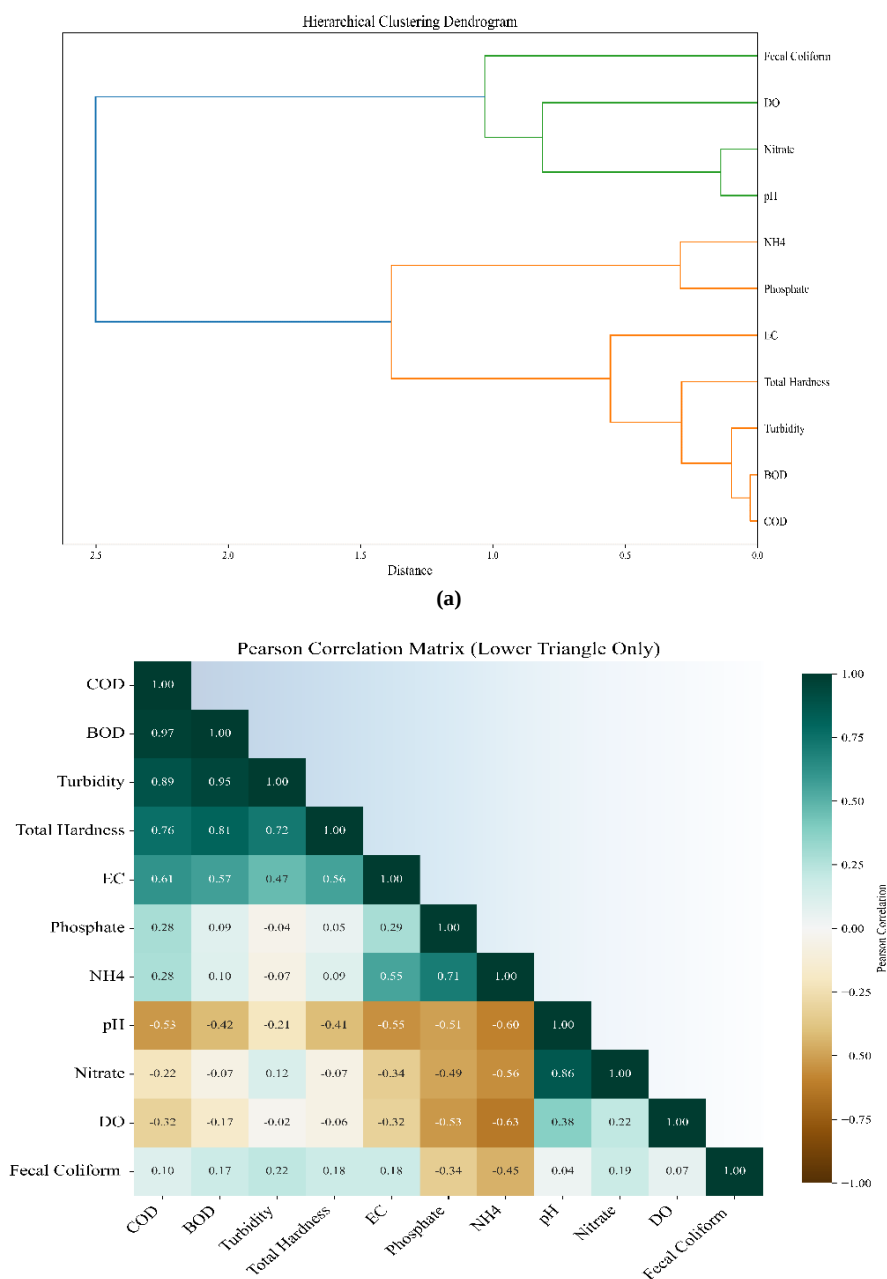


Figure 6. Dendrogram and Correlation coefficient matrix of IRWQI_{SC} parameters

بررسی ساختار دندروگرام شکل (۶-ا) نشان‌دهنده تفکیک متغیرها به دو خوشه اصلی و کاملاً متمایز در فاصله اتصال تقریبی ۲/۵ است که بیانگر دو الگوی رفتاری متفاوت در محیط آبی می‌باشد. خوشه نخست دربرگیرنده

متغیرهای کلیفرم مدفوعی، اکسیژن محلول (DO)، نیترات و اسیدیته (pH) است. در این خوشه، نیترات و اسیدیته در کمترین فاصله ممکن به یکدیگر متصل شده‌اند که ماتریس همبستگی شکل (b-۶) نیز این پیوند را با ثبت ضریب همبستگی مثبت و بسیار قوی ($r=0/86$) تأیید می‌نماید. قرارگیری کلیفرم مدفوعی در این خوشه اما با بیشترین فاصله اتصال (حدود ۱/۰) صورت گرفته است؛ واکاوی ماتریس پیرسون نیز گواه این است که متغیر میکروبی مذکور همبستگی بسیار ضعیفی با سایر پارامترهای فیزیکوشیمیایی دارد و در نتیجه رفتاری نسبتاً مستقل از خود نشان می‌دهد. در مقابل، خوشه دوم که در فاصله اتصال حدود ۱/۴ به دو زیرگروه فرعی تقسیم می‌شود، ساختار منسجم‌تری دارد. زیرگروه اول در این خوشه شامل آمونیوم (NH_4) و فسفات است که اتصال نزدیک آن‌ها در دندروگرام با ضریب همبستگی مثبت ($r=0/71$) تطابق کامل دارد و نشان‌دهنده الگوی تغییرات هم‌زمان این ترکیبات مغذی است. زیرگروه دوم شامل مجموعه‌ای از متغیرهای هدایت الکتریکی (EC)، سختی کل، کدورت، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) می‌باشد. در این زیرشاخه، پیوند متغیرهای BOD و COD در پایین‌ترین سطح ممکن (نزدیک به صفر) رخ داده و ثبت ضریب همبستگی بسیار بالا ($r=0/97$) میان آن‌ها، تطابق حداکثری بار آلی زیست‌تخریب‌پذیر و کل مواد آلی را از نظر ریاضی اثبات می‌کند. علاوه بر این، همبستگی‌های مثبت و چشم‌گیر کدورت با مقادیر BOD ($r=0/95$) و COD ($r=0/89$) و همچنین ارتباط مثبت سختی کل با BOD ($r=0/81$) در ماتریس پیرسون به‌وضوح نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از بار آلی موجود در ایستگاه‌های مورد مطالعه دارای ماهیت ذره‌ای و معلق می‌باشد. درنهایت، بررسی همبستگی‌های منفی آشکار می‌سازد که افزایش متغیرهای زیرگروه ترکیبات مغذی و بار آلی، به‌طورمستقیم با افت متغیرهای خوشه نخست (شرایط پایه) در تقابل است؛ به‌گونه‌ای که بارزترین همبستگی‌های معکوس مربوط به تقابل آمونیوم با اکسیژن محلول ($r=-0/63$) و اسیدیته ($r=-0/60$)، تقابل فسفات با اکسیژن محلول ($r=-0/53$) و همچنین ارتباط منفی میان متغیر COD با سطح اسیدیته آب ($r=-0/53$) می‌باشد.

۳.۴.۳. آنالیز آماری متغیرهای IRWQI_{ST}

به‌منظور ریشه‌یابی و درک الگوهای توزیع آلاینده‌های سمی، فلزات سنگین و ترکیبات نفتی (متغیرهای مؤثر در محاسبه شاخص IRWQI_{ST})، از دندروگرام تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی و ماتریس همبستگی پیرسون استفاده شد که در شکل (۷) نشان داده شده‌اند.

ساختار دندروگرام ترسیم‌شده در شکل (۷-a)، تفکیک نه پارامتر پایش‌شده را به دوشاخه اصلی با رفتارهای ژئوشیمیایی و منابع انتشار کاملاً متفاوت نشان می‌دهد. شاخه نخست (بخش پایین دندروگرام) دربرگیرنده متغیرهای آرسنیک (As)، کادمیوم (Cd) و جیوه (Hg) است. در این شاخه، آرسنیک و کادمیوم در کمترین فاصله اتصال، یک زیر خوشه بسیار منسجم را تشکیل داده‌اند. ثبت همبستگی مثبت و قوی ($r=0/68$) در ماتریس پیرسون شکل (۷-b) میان این دو عنصر، مؤید هم‌منشأ بودن یا تبعیت آن‌ها از یک الگوی انتقال ژئوشیمیایی یکسان است که غالباً ناشی از رواناب‌های حاوی بقایای کودهای فسفاته در اراضی کشاورزی یا هوازدگی کانی‌های سولفیدی می‌باشد. جیوه نیز بافاصله اتصال بسیار بیش‌تری به این زیر خوشه ملحق شده است. بااین‌حال، ثبت همبستگی‌های بسیار ضعیف و منفی آن با آرسنیک ($r=-0/10$) و کادمیوم ($r=-0/09$)، نشان‌دهنده استقلال منابع انتشار و مکانیسم‌های متفاوت انتقال این عنصر (نظیر تبخیر پذیری، انتقال اتمسفری و رسوب‌گذاری جوی) نسبت به سایر فلزات این گروه است.

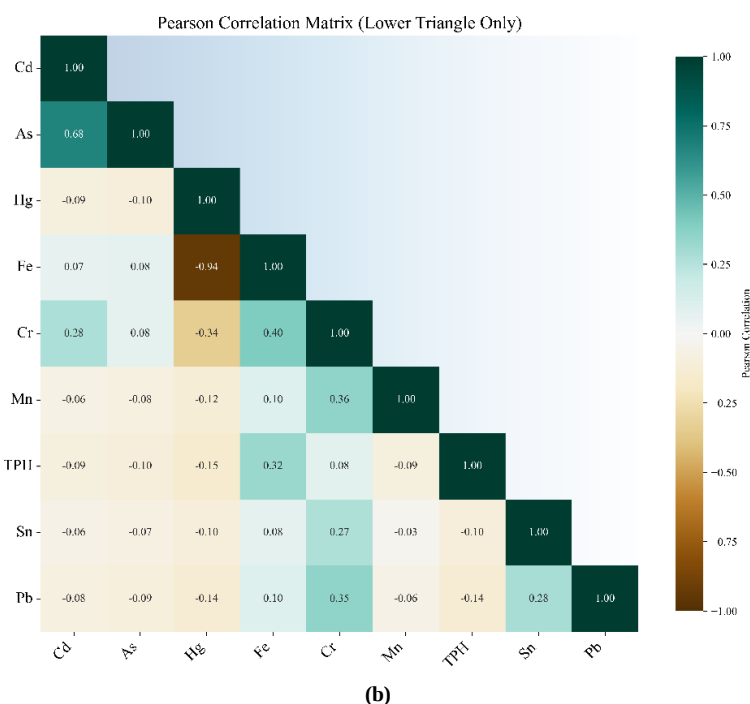
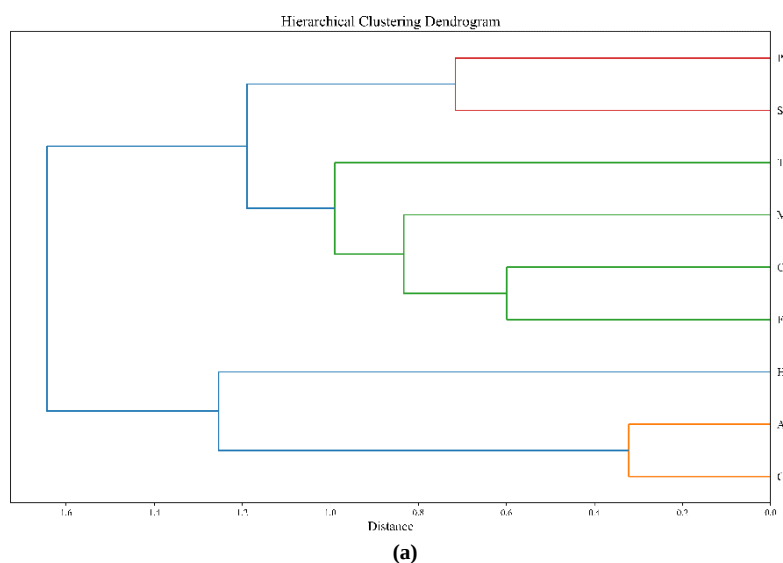


Figure 7. Dendrogram and Correlation coefficient matrix of IRWQI_{ST} parameters

در سمت مقابل، شاخه دوم دندروگرام شکل (الف) آرایش پیچیده‌تر و شبکه‌ای از متغیرهای آهن (Fe)، کروم (Cr)، منگنز (Mn)، هیدروکربن‌های نفتی کل (TPH)، سرب (Pb) و سیانید (CN) را به نمایش می‌گذارد. این شاخه خود از دو زیرگروه اصلی تشکیل شده است. در زیرگروه اول، ابتدا آهن و کروم با یکدیگر پیوند خورده و همبستگی مثبت و معنی‌داری ($r=0/40$) را ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده پویایی مشترک این دو فلز در واکنش‌های اکسایش-کاهش محیط آبی است. در ادامه، منگنز (با همبستگی $r=0/36$ با کروم) و سپس ترکیبات هیدروکربنی (TPH) به این مجموعه متصل شده‌اند. همبستگی مثبت TPH با آهن ($r=0/32$) می‌تواند بیانگر این واقعیت علمی باشد که حضور آلودگی‌های آلی-نفتی

با مصرف اکسیژن و تغییر پتانسیل اکسیداسیون-احیا، منجر به افزایش تحرک و رهایش آهن از رسوبات به ستون آب می‌گردد. در زیرگروه دوم از همین شاخه، پارامترهای سرب و سیانید یک خوشه مجزا را تشکیل داده‌اند. همبستگی مثبت این دو آلاینده سمی با یکدیگر ($r=0/28$) و ارتباط سرب با کروم ($r=0/35$) در شکل (Y-b)، یک اثرانگشت شیمیایی بارز از تأثیر منابع نقطه‌ای انسان‌ساخت است، این ترکیب غالباً خروجی مستقیم پساب‌های صنعتی پیچیده (به‌ویژه کارگاه‌های آبکاری فلزات، عملیات حرارتی و صنایع شیمیایی) و همچنین شیرابه‌های خطرناک شهری را بازتاب می‌دهد، اما شگرف‌ترین و مهم‌ترین یافته در ماتریس همبستگی این شاخص، تقابل ریاضی بسیار شدید و منفی میان جیوه و آهن ($r=-0/94$) است. این همبستگی معکوس تقریباً کامل، اثبات می‌کند که این دو متغیر در اکوسیستم آبی مورد مطالعه رفتاری کاملاً متضاد دارند. به بیان دیگر، شرایط فیزیکوشیمیایی محیطی که منجر به تثبیت یا افزایش غلظت آهن در آب می‌شود، به‌طور هم‌زمان مانع از حضور یا تحرک جیوه می‌گردد (و برعکس). شناسایی این الگوهای رفتاری مستقل و متضاد، به‌ویژه برای آلاینده‌هایی با وزن بهداشتی و سمیت بالا، برای مدیریت ریسک‌های اکولوژیک منابع آب از اهمیت به‌سزایی برخوردار است.

۵.۳. محدودیت‌های پژوهش

با وجود تلاش برای ارزیابی جامع کیفیت آب رودخانه کن با استفاده از سه شاخص NSFQI، IRWQISC و IRWQIST، پژوهش حاضر دارای برخی محدودیت‌هاست. نخست، نمونه‌برداری تنها در یک سال آبی و در دو دوره تر و خشک انجام شد. بنابراین، امکان بررسی تغییرات بلندمدت کیفیت آب و اثر رخدادهای حدی بارش به‌طور کامل فراهم نبود. دوم، محدوده مکانی پژوهش به ۱۵ ایستگاه در طول رودخانه کن محدود شد و تعمیم مستقیم نتایج به سایر رودخانه‌های شهری تهران نیازمند مطالعات تکمیلی است. سوم، شاخص‌های کیفیت آب براساس وزن‌دهی و طبقه‌بندی مشخص محاسبه می‌شوند و ممکن است حساسیت آن‌ها نسبت به برخی آلاینده‌ها متفاوت باشد؛ برای نمونه، شاخص IRWQIST وضعیت آلاینده‌های سمی را بهتر نشان می‌دهد، درحالی‌که NSFQI و IRWQISC بیش‌تر به آلودگی‌های عمومی، آلی و فیزیکوشیمیایی حساس هستند. همچنین، در این پژوهش منشأ دقیق هر آلاینده از طریق مدل‌سازی منبع آلودگی یا ردیابی ایزوتوپی بررسی نشد و تمرکز اصلی بر ارزیابی مکانی-فصلی کیفیت آب و شناسایی نقاط بحرانی آلودگی بود.

۴. بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که کیفیت آب رودخانه کن در بخش‌های مختلف مسیر، به‌ویژه در ایستگاه‌های پایین‌دست و نقاط دریافت‌کننده شاخه‌های فرعی آلوده، کاهش محسوسی دارد. این الگو با یافته‌های مطالعات مشابه در رودخانه‌های شهری همخوانی دارد، زیرا در بسیاری از پژوهش‌ها، ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های صنعتی، رواناب‌های سطحی و کاهش توان رقیق‌سازی رودخانه به‌عنوان مهم‌ترین عوامل افت کیفیت آب معرفی شده‌اند. در پژوهش حاضر نیز کاهش شاخص‌های NSFQI و IRWQISC در ایستگاه‌هایی مانند S3، S5، S6 و S7 نشان داد که ورود بار آلودگی آلی و جامدات معلق نقش اصلی را در تنزل کیفیت آب رودخانه دارد. شباهت اصلی نتایج این مطالعه با سایر پژوهش‌های مرتبط، مشاهده افزایش BOD، COD، TSS، فسفات و آمونیوم در مقاطع متأثر از فعالیت‌های شهری و صنعتی است. در اغلب مطالعات کیفیت آب رودخانه‌های شهری، افزایش این متغیرها با کاهش اکسیژن محلول و افت شاخص کیفیت آب همراه بوده است. در این پژوهش نیز همبستگی بسیار قوی میان BOD و TSS در شاخص NSFQI و همچنین همبستگی بسیار بالا میان BOD و COD در شاخص IRWQISC نشان داد که بخش عمده‌ای از آلودگی رودخانه ماهیت

آلی و معلق دارد. این موضوع با نتایج مطالعات پیشین که نقش پساب‌های شهری و رواناب‌های آلوده را در افزایش بار آلی رودخانه‌ها گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد. با این حال، تفاوت مهم پژوهش حاضر با برخی مطالعات مشابه در استفاده هم‌زمان از سه شاخص NSFQI، IRWQI_{SC} و IRWQI_{ST} است. بسیاری از مطالعات پیشین معمولاً تنها از یک شاخص کیفیت آب برای ارزیابی وضعیت رودخانه استفاده کرده‌اند، در حالی که در این پژوهش، شاخص بین‌المللی NSFQI در کنار دو شاخص بومی ایران به کار گرفته شد. این رویکرد نشان داد که شاخص IRWQI_{SC} به دلیل در نظر گرفتن متغیرهایی مانند COD، آمونیوم، هدایت الکتریکی و سختی، نسبت به شاخص NSFQI تصویر سخت‌گیرانه‌تر و نامطلوب‌تری از کیفیت آب رودخانه ارائه می‌دهد. به همین دلیل، در حالی که NSFQI کیفیت آب را عمدتاً در محدوده «متوسط» تا «بد» نشان داد، IRWQI_{SC} بخش‌های زیادی از رودخانه را در وضعیت «بد» و «خیلی بد» طبقه‌بندی کرد. از سوی دیگر، نتایج شاخص IRWQI_{ST} با نتایج دو شاخص دیگر تفاوت قابل توجهی داشت. برخلاف NSFQI و IRWQI_{SC} که افت کیفیت ناشی از آلودگی‌های آلی، میکروبی و فیزیکوشیمیایی را نشان دادند، شاخص IRWQI_{ST} بیانگر آن بود که کیفیت آب از نظر آلاینده‌های سمی و فلزات سنگین در بیش‌تر ایستگاه‌ها در وضعیت «خوب» قرار دارد. این تفاوت نشان می‌دهد که آلودگی غالب در رودخانه کن بیش‌تر از نوع آلی، میکروبی و مواد معلق است و آلودگی سمی و فلزی، به جز در برخی نقاط بحرانی مانند S5، الگوی گسترده‌ای در کل مسیر رودخانه ندارد. این یافته با مطالعاتی که بر تفاوت رفتار شاخص‌های عمومی کیفیت آب و شاخص‌های تخصصی آلاینده‌های سمی تأکید کرده‌اند، همسو است. بنابراین، مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات مشابه نشان می‌دهد که از نظر کاهش کیفیت آب در پایین‌دست، نقش منابع آلاینده شهری-صنعتی و افزایش بار آلی، یافته‌های این مطالعه با پژوهش‌های پیشین همخوانی دارد. با این حال، تفاوت اصلی پژوهش حاضر در ارائه یک چارچوب چندشاخصه و مکانی-آماري است که امکان تفکیک نوع آلودگی، شناسایی نقاط بحرانی و مقایسه حساسیت شاخص‌های بین‌المللی و بومی را فراهم می‌کند.

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف ارزیابی جامع کیفیت رواناب‌های سطحی غرب تهران، به‌ویژه رودخانه کن، با استفاده هم‌زمان از سه شاخص NSFQI، IRWQI_{SC} و IRWQI_{ST} در قالب یک چارچوب ترکیبی چندمعیاره انجام شد که امکان تحلیل دقیق الگوهای مکانی آلودگی را فراهم ساخت. نتایج شاخص NSFQI نشان داد که میانگین کیفیت آب رودخانه در محدوده «متوسط» (۵۶/۵) قرار دارد، اما افت شدید کیفیت در ایستگاه‌های پایین‌دست و نقاط دریافت‌کننده شاخه‌های فرعی آلوده (به‌ویژه S3، S5، S6 و S7) بیانگر فشار قابل توجه ناشی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی است. نتایج آماری این شاخص اثبات کرد که پارامترهای BOD، TSS و فسفات پیشران‌های اصلی تضعیف کیفیت آب هستند. ثبت همبستگی بسیار قوی میان BOD و TSS ($r=0/95$) نشان داد که بخش عمده‌ای از بار آلی ورودی به رودخانه دارای ماهیت ذره‌ای و معلق می‌باشد. شاخص IRWQI_{SC} وضعیت نامطلوب‌تری را نسبت به NSFQI نشان داد، به‌طوری‌که عمده مقاطع رودخانه در طبقات «بد» و «خیلی بد» با میانگین ۲۳/۴۴ قرار گرفتند. بیش‌ترین افت IRWQI_{SC} در ایستگاه S5 مشاهده شد که ناشی از مقادیر بسیار بالای BOD (۱۵۰ mg/L)، COD (۳۱۶ mg/L) و آمونیاک (۳۹/۵ mg/L) بود. همبستگی تقریباً کامل ریاضی میان BOD و COD ($r=0/97$) در کنار تقابل شدید آمونیوم با اکسیژن محلول ($r=-0/63$) نشان‌دهنده ورود یک منبع آلودگی شدید شهری-صنعتی به شاخه فرعی رودخانه است. تحلیل مکانی شاخص IRWQI_{SC} نشان داد که ورود آلاینده‌ها از شاخه‌های فرعی و مناطق مسکونی-کشاورزی نقش مستقیم و تعیین‌کننده‌ای در افت کیفیت آب در بخش‌های پایین‌دست رودخانه دارد.

برخلاف دو شاخص فوق، نتایج IRWQI_{ST} بیانگر آن است که کیفیت آب از نظر آلاینده‌های سمی و فلزات سنگین در اغلب ایستگاه‌ها در محدوده «خوب» باقی‌مانده است. با این حال، یک منبع آلودگی نقطه‌ای شدید در ایستگاه S5 شناسایی شد که با غلظت بالای سرب (۹۵ ppb) و منگنز (۶۱ ppb) مشخص می‌شود. ادغام نتایج مکانی و آماری نشان داد که با وجود ورود شوک‌های آلودگی سمی و آلی از شاخه‌های فرعی، ظرفیت رقیق‌سازی هیدرولیکی شاخه اصلی رودخانه کن توانسته است از انتقال گسترده و مخرب این آلاینده‌های سمی به سمت پایین‌دست جلوگیری کند و همچنان در وضعیت مطلوب باقی بماند.

تحلیل‌های آماری و خوشه‌بندی آلاینده‌های سمی، پرده از دو الگوی رفتاری مهم برداشت: نخست، شناسایی «اثرانگشت صنعتی» بارز که ناشی از هم‌افزایی سرب (Pb) و سیانید (CN) بود و دوم، کشف تقابل بسیار شدید و معکوس میان جیوه (Hg) و آهن (Fe) با ضریب $r = -0.94$ که نشان‌دهنده پویایی متضاد ژئوشیمیایی این دو متغیر در محیط آبی است. این پژوهش، ادغام سه شاخص کیفیت آب در یک چارچوب مکانی-آماري مبتنی بر GIS^{۱۶} است که امکان ارزیابی هم‌زمان ابعاد مختلف آلودگی (آلی، معدنی و سمی) و شناسایی نقاط بحرانی را فراهم می‌کند. براساس نتایج به‌دست‌آمده، مدیریت یکپارچه رواناب‌های شهری-صنعتی، کاهش تخلیه مستقیم پساب به شاخه‌های فرعی و پایش مستمر آلاینده‌ها در مقاطع حساس (به‌ویژه S3 تا S7) به‌عنوان اولویت‌های اصلی بهبود کیفیت آب رودخانه کن پیشنهاد می‌شود. در مجموع، چارچوب پیشنهادی این مطالعه می‌تواند به‌عنوان یک الگوی قابل‌تعمیم برای ارزیابی کیفیت آب در سایر رودخانه‌های شهری ایران و مناطق با چالش آلودگی چندمنشأی مورد استفاده قرار گیرد.

۶. پی‌نوشت‌ها

1. Chemical Oxygen Demand
2. Biochemical Oxygen Demand
3. Total Suspended Solids
4. World Health Organization
5. Iran Water Quality Index for Surface Water Resources – Conventional Parameters
6. National Sanitation Foundation Water Quality Index
7. Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index
8. Water Quality Index
9. Iran Water Quality Index for Surface Water Resources – Toxic Parameters
10. Potential of Hydrogen
11. Electrical Conductivity
12. Pearson Correlation Coefficient
13. Dendrogram
14. Total Petroleum Hydrocarbons
15. Hierarchical Cluster Analysis
16. Geographic Information System

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- Aghaee, M., Heshmatpour, A., G. Mahmoodlu, M., & Seyedian, S. M. (2020). Investigation of Water Quality of Chehelchay River Using IRWQI_{sc} Index. *Journal of Environmental Science and Technology*, 22(5), 153-166. <https://doi.org/10.22034/JEST.2019.36957.4341>
- Al-sudani, I. M., Al-razzaq, H. T. A., Khraibet, A. C., & Mohammed, H. J. (2022). Impacts of untreated sewage effluent on Tigris river water quality using (NSF-WQI) index. 10(1), 7-13.

- Fijani, E., Meysami, S., & Ahmadpour, A. (2024). Assessment of groundwater quality in the eastern part of tehran plain: Implications for human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(49), 59446-59456. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35179-5>
- Ghadiri, A., Hashemi, S. H., & Nasrabadi, T. (2021). Investigation of major heavy metal concentration in urban runoff (Case study: North and east catchment of Tehran city). *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(4), 23-34. https://journals.aut.ac.ir/article_4039_9e9f0dd1095cd12b91922b545c077b04.pdf
- Hasani Moghaddam, A., Hashemi, S. H., & Ghadiri, A. (2021). Aliphatic hydrocarbons in urban runoff sediments: a case study from the megacity of Tehran, Iran. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 19(1), 205-216. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00596-4>
- Mahdi, F., Razzaq, B. A., & Sultan, M. (2023). Assessment of Shatt Al-Arab Water Quality Using CCME / WQI Analysis in Basrah City of South Iraq. 64(1), 480–491. <https://doi.org/10.24996/ijes.2023.64.1.42>
- Mahvi, A. H., & Mardani, G. (2005). Determination of Phenanthrene in Urban Runoff of Tehran , Capital of Iran. *Iranian J Env Health Sci Eng*, 2(2), 5-11.
- Mardani, G., Sadeghi, M., & Ahankoob, M. (2010). Investigating soil contamination in south Tehran. *Journal of Water and Wastewater*, 108-118.
- Mardekheh, M. E., & Hamzeh, S. (2024). Assessing groundwater vulnerability with DRASTIC and Fuzzy-AHP models and validating results based on nitrate concentration : a case study of Fumanat area , Guilan province. *Physical Geography Research Quarterly*, 56, 21-38.
- Mazlomi, M., Hatami, A. A., Moridi, A. A., & Khalili, R. (2023). Sensitivity assessment of the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI) and IRan Water Quality Index for Surface Water Resources (IRWQIsc) on the water quality of the Neka River. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(3), 581-592. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355941.1059>
- Moghadam Yekta, N., Rafati, M., Karimi, A., & Sajjadi, N. (2022). Investigation of Water Quality of Urban Rivers and Assessing their Suitability to Protect the Environment (Case Study: Kan River, Tehran City). *Environment and Water Engineering*, 8(3), 738-752. <https://doi.org/10.22034/jewe.2022.315256.1675>
- Moghaddam, Amin Hasani. Hashemi, S. H. (2024). Source identification, accumulation and dispersion of heavy metals pollution into the surface sediments of urban runoff (case study, channels of Tehran City). *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 23(1). <https://doi.org/10.1007/s40201-025-00938-0>
- Nabizadeh, R., Mahvi, A., Mardani, G., & Yunesian, M. (2005). Study of heavy metals in urban runoff. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 1(4), 325-333. <https://doi.org/10.1007/bf03325849>
- Nouri, j, & Naghipour, K. (2002). Qualitative and Quantitative Study of Heavy Metals in Runoff of Highways of Tehran. *Iranian Journal of Public Health*, 31(1), 1-8.
- Parween, S., Alam, N., Talas, M., & Diganta, M. (2022). Environmental and Sustainability Indicators Assessment of urban river water quality using modified NSF water quality index model at Siliguri city , West Bengal , India. *Environmental and Sustainability Indicators*, 16(August), 100202. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2022.100202>
- Robati, R., Esmaeili, F., Khalili, R., & Moridi, A. (2023). Monitoring the Spatial and Temporal Variations in Water Quality of the Haraz River: A Comparative Study of IRWQIsc and NSFWQI Index. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(3), 147–157. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2023.21228.3639>
- Roshani-sefidkouhi, M., & Mortezaazadeh, F. (2025). Heliyon Water quality assessment using IRWQI sc and NSFWQI water quality indicators ; A case study : Talar River (Iran). *Heliyon*, 11(2), e41812. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41812>
- Shakerdonyavi, A., Cheloyan, P., Moridi, A. A., & Khalili, R. (2023). Assessment of Spatio-Temporal Changes in Water Quality of Babolroud River Using IRWQIsc, NSFWQI and CCME Water Quality Index. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(2), 551-563. <https://doi.org/10.22059/jwim.2023.355688.1056>
- Šverko Zoran, Vrankic Miroslav, Vlahinic Sasa, R. P. (2022). *Complex Pearson Correlation Coefficient for EEG Connectivity Analysis*, 1-19.
- Yaghobzadeh, Z., & Safari, R. (2013). Investigation of microbial pollution in the surface water of the Haraz River. *Cellular and Molecular Research Journal (Iranian Journal of Biology)*, 28(1), 136-144.
- Yotova, G., Varbanov, M., Tcherkezova, E., & Tsakovski, S. (2021). Water quality assessment of a river catchment by the composite water quality index and self-organizing maps. *Ecological Indicators*, 120, 106872. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106872>