

Spatial and Temporal Assessment of Gorganrud River Water Quality Using an Integration of Water Quality Indices and Multivariate Statistical Approaches

Abstract

Spatial and temporal assessment of water quality in the Gorganrud River (Golestan Province), one of the most critical hydrological systems in northern Iran, was comprehensively conducted across 14 sampling stations over four distinct seasons. To precisely evaluate water quality, 12 physical, chemical, and microbiological parameters—including temperature, dissolved oxygen (DO), Biochemical Oxygen Demand (BOD₅), Chemical Oxygen Demand (COD), nitrate, phosphate, electrical conductivity (EC), Total Dissolved Solid (TDS), turbidity, pH, ammonium, and fecal coliform (FC)—were measured. Laboratory data were analyzed using three standard indices, namely Iranian Water Quality Index for surface water (IRWQIsc), National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), and Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCMEWQI). Additionally, advanced multivariate statistical methods, including Pearson correlation matrix, Principal Component Analysis (PCA), and Hierarchical Cluster Analysis (HCA), were applied for pollutant source identification and data dimensionality reduction.

Results indicated that river water quality is strongly governed by seasonal variations and anthropogenic activities, such as municipal wastewater discharge and agricultural runoff. Warm seasons experience severe dissolved oxygen depletion and the dominance of point-source pollution, whereas during cold and rainy seasons, surface runoff plays a dominant role in increasing turbidity and suspended solids. Evaluation of quality indices showed that the overall water quality falls within moderate to poor classes, facing serious environmental challenges at certain stations due to high nutrient concentrations and eutrophication, highlighting the urgent necessity for dynamic management and pollution control.

Keywords:

Water Quality, Gorganrud River, Water Quality Indices, Multivariate Statistical Analysis, Source Apportionment.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rivers serve as vital arteries of drainage basins, playing a fundamental role in sustaining regional hydrological cycles, supporting aquatic biodiversity, and providing essential water resources for municipal, agricultural, and industrial consumption. However, rapid population growth, unplanned urbanization, intensive agricultural practices, and industrial expansion have transformed these natural aquatic systems into the ultimate receptors of diverse anthropogenic effluents. The ecological and chemical health of riverine ecosystems thus acts as an integrated mirror reflecting the cumulative intensity of human interventions and regional climatic variability. Within the geographical and hydrological context of northern Iran, the Gorganrud River basin located in Golestan Province stands out as one of the most critical, strategic, and economically significant river systems, supporting a vast agricultural economy and urban centers before discharging into the Caspian Sea basin. Despite its critical importance, the Gorganrud River has been subjected to mounting environmental pressures, leading to severe water quality degradation, nutrient enrichment, and ecological imbalance.

Traditional approaches to water quality assessment often rely on single-parameter evaluations or isolated physicochemical measurements, which fail to capture the complex, multi-dimensional nature of aquatic pollution. Furthermore, relying on a single water quality index can introduce methodological biases due to varying mathematical formulations, weighting schemes, and parameter sensitivities. To address these limitations, the primary objective of this comprehensive research is to execute a rigorous, multi-faceted spatial and temporal evaluation of water quality dynamics along the Gorganrud River. This is achieved through the innovative integration of three distinct, widely recognized standard water quality indices: the Iranian Water Quality Index for surface waters (IRWQIsc), the National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), and the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCMEWQI). By combining these indices, the study aims to establish a robust cross-verified assessment of water health classes. In addition to index-based evaluations, this research incorporates advanced multivariate statistical techniques to trace pollution origins,

dissect hidden data structures, reduce dimensionality, and evaluate underlying geochemical and anthropogenic drivers shaping the water quality matrix of the Gorganrud River basin. Through this holistic framework, the study seeks to bridge critical knowledge gaps regarding spatial pollution gradients, seasonal variability, and the relative contributions of point versus non-point source loads, thereby providing actionable scientific insights for watershed managers, environmental policymakers, and regional conservation planners.

Method

To achieve a comprehensive, representative, and scientifically rigorous evaluation of the water quality across the Gorganrud River, a systematic spatial and temporal monitoring framework was established. The investigation encompassed fourteen distinct sampling stations (designated sequentially as S1 through S14) strategically distributed along the longitudinal profile of the river, capturing headwater conditions, middle agricultural zones, and downstream terminal segments influenced by intensive urban and rural discharges. Sampling campaigns were executed across four distinct hydrological and climatic seasons of the year to capture seasonal extremes in flow dynamics, temperature regimes, and precipitation patterns.

A comprehensive suite of twelve physical, chemical, biological, and microbial outcome measures was selected to quantify the aquatic environmental status, including water temperature, dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand over five days (BOD₅), chemical oxygen demand (COD), nitrate (NO₃⁻), phosphate (PO₄³⁻), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), turbidity, pH, ammonium (NH₄⁺), and fecal coliform counts. Water sampling, preservation, and laboratory analyses were conducted in strict accordance with standard methods for the examination of water and wastewater, ensuring high analytical precision and reproducibility.

Following laboratory determinations, raw datasets were processed using three distinct water quality indexing models: the IRWQIsc, NSFQI, and CCMEWQI frameworks. To unravel complex interrelationships, eliminate redundancy, and trace precise sources of pollution, advanced multivariate statistical approaches were deployed. Pearson's correlation matrix was generated to examine linear associations and bivariate dependencies among physicochemical parameters. Principal Component Analysis (PCA) was performed on standardized data matrices to reduce dimensionality, extract principal latent components, and identify underlying anthropogenic and geogenic variance drivers after verifying data suitability via KMO and Bartlett's tests. Furthermore, Hierarchical Cluster Analysis (HCA) using Ward's method with squared Euclidean distances was applied to group sampling stations into distinct clusters based on shared water quality characteristics and pollution profiles, spatially delineating the watershed into distinct ecological zones.

Results

The spatial evaluation of the Gorganrud River revealed pronounced longitudinal gradients in water quality from pristine headwaters to heavily impacted downstream reaches. Station S1, situated in the upper catchment and protected by high elevation and distance from major anthropogenic activities, maintained an optimal water quality status across all evaluated indices, characterized by high dissolved oxygen levels, low nutrient concentrations, and minimal microbial contamination. However, as the river traversed the middle and downstream sections (stations S2 through S14), a systematic and severe deterioration in water quality was observed, directly correlated with the progressive influx of untreated municipal sewage, rural domestic wastewaters, and agricultural return flows laden with high concentrations of nitrogenous and phosphatic fertilizers.

The application of the IRWQIsc, NSFQI, and CCMEWQI indices demonstrated converging outcomes, classifying overall river water quality from moderate to poor, with terminal stations

plunging into critical and marginal categories due to high nutrient loading and localized eutrophication phenomena. Seasonal variation analysis further highlighted that hydrological dynamics heavily govern water quality fluctuations. Warm seasons, particularly summer, experienced significant reductions in river discharge, elevated water temperatures, and severe dissolved oxygen depletion, exacerbating point-source pollutant impacts. In contrast, cold and rainy seasons were dominated by non-point source pollution, where intensive surface runoffs mobilized soil particles, organic debris, and accumulated agricultural chemicals, leading to sharp spikes in turbidity, suspended solids, and particulate-bound nutrients.

The deployment of advanced multivariate statistical analyses provided robust validation: Pearson's correlation revealed a very strong, stable, and statistically significant positive correlation between electrical conductivity (EC) and total dissolved solids (TDS) ($r > 0.90$), confirming that ionic composition and salinity are primarily governed by natural geogenic processes and mineral weathering. A strong correlation between BOD₅ and COD pointed to a common origin of organic pollution driven by domestic and agricultural inputs. Furthermore, Principal Component Analysis (PCA) extracted major principal components representing geogenic mineral factors and anthropogenic organic and nutrient loadings. Hierarchical Cluster Analysis (HCA) successfully grouped the fourteen sampling stations into three distinct spatial clusters corresponding to high-quality headwaters, moderately impacted midstream agricultural zones, and severely degraded downstream urban-agricultural transition zones.

Conclusions

The findings of this comprehensive investigation conclusively demonstrate that the aquatic ecosystem of the Gorganrud River has substantially deviated from its natural baseline stability, currently experiencing severe ecological stress induced by intense anthropogenic interventions and compounding climatic pressures. The spatial and temporal convergence of the IRWQIsc, NSFQI, and CCMEWQI indices confirms that water quality degrades from acceptable levels in headwaters to marginal and critical conditions in middle and downstream segments, driven by nutrient enrichment, organic pollution, and microbial contamination.

The theoretical, practical, and environmental significance of these outcomes highlights an urgent requirement for paradigm shifts in watershed management. The empirical evidence underscores that reactive monitoring is insufficient; instead, proactive, science-based, and dynamic watershed management frameworks must be implemented immediately by regional water authorities, environmental protection agencies, and agricultural governing bodies. Key practical applications derived from this research include strict regulatory control and continuous monitoring of point-source discharges, mandatory upgrading and expansion of municipal wastewater treatment infrastructure, and implementation of agricultural best management practices to curb non-point source nutrient runoff.

Moreover, identification of geogenic versus anthropogenic factors through multivariate statistics provides a scientific foundation for separating natural baseline conditions from human-induced impairments, enabling targeted remediation. While this study provides a robust spatial and temporal evaluation, future research should integrate continuous real-time telemetry sensors with predictive hydrodynamic and ecological modeling to forecast eutrophication events and ensure sustainable preservation of the Gorganrud River basin.

Authorship contribution

Sam Sadeghi: Conceptualization, Methodology, Software, Formal analysis, Investigation, Data curation, Writing - original draft, Visualization.

Ali Moridi: Conceptualization, Supervision, Validation, Resources, Writing - review & editing, Project administration.

Ali Laki: Investigation, Data curation, Writing - review & editing.

Reza Khalili: Investigation, Data curation, Writing - review & editing.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

Not used AI-assisted technologies in the writing process.

Data availability statement

Data from this study are available upon request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to express their sincere gratitude to the Department of Environmental Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, for their valuable cooperation and assistance in the sampling and laboratory analyses.

Ethical considerations

This study adhered to all environmental and ethical standards. Field sampling was conducted with necessary regulatory permissions, ensuring minimal impact on local aquatic ecosystems. The authors confirm that all data are original, authentic, and free from manipulation, and declare no conflicts of interest.

Conflict of interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

ارزیابی مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه گرگانرود با استفاده از تلفیق شاخص‌های کیفی و رویکردهای آماری چندمتغیره

چکیده

ارزیابی مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه گرگانرود (استان گلستان)، به عنوان یکی از حیاتی‌ترین سیستم‌های هیدروئولوژیکی در شمال ایران، به صورت جامع در ۱۴ ایستگاه نمونه‌برداری طی چهار فصل مجزا انجام شد. برای ارزیابی دقیق کیفیت آب، ۱۲ پارامتر فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی شامل دما، اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن بیوشیمیایی مورد نیاز (BOD_5)، اکسیژن شیمیایی مورد نیاز (COD)، نیترات، فسفات، هدایت الکتریکی (EC)، کل مواد محلول (TDS)، کدورت، pH، آمونیوم و کلی‌فرم‌های مدفوعی (FC) اندازه‌گیری شدند. داده‌های آزمایشگاهی با استفاده از سه شاخص استاندارد، یعنی شاخص کیفیت آب سطحی ایران (IRWQIsc)، شاخص کیفیت آب بنیاد ملی بهداشت (NSFWQI) و شاخص کیفیت آب شورای وزیران محیط زیست کانادا (CCMEWQI) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. علاوه بر این، روش‌های پیشرفته آماری چندمتغیره شامل ماتریس همبستگی پیرسون، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) برای شناسایی منابع آلاینده و کاهش ابعاد داده‌ها به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که کیفیت آب رودخانه به شدت تحت تأثیر تغییرات فصلی و فعالیت‌های انسان‌زاد (آنتروپوژنیک)، مانند تخلیه فاضلاب شهری و رواناب‌های کشاورزی است. فصول گرم با کاهش شدید اکسیژن محلول و غلبه آلودگی‌های نقطه‌ای مواجه هستند، در حالی که در فصول سرد و بارانی، رواناب‌های سطحی نقش عمده‌ای در افزایش کدورت و مواد معلق ایفا می‌کنند. ارزیابی شاخص‌های کیفی نشان داد که کیفیت کلی آب در کلاس‌های متوسط تا ضعیف قرار دارد و به دلیل غلظت بالای مواد مغذی و اوتروفیکاسیون، در برخی ایستگاه‌ها با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مواجه است که ضرورت فوری مدیریت پویا و کنترل آلودگی را برجسته می‌سازد.

کلمات کلیدی: کیفیت آب، رودخانه گرگانرود، شاخص‌های کیفی آب، تحلیل‌های آماری چندمتغیره، منبع‌یابی آلاینده‌ها.

۱. مقدمه

منابع آب شیرین در مقیاس جهانی به عنوان محدودترین و حیاتی‌ترین سرمایه طبیعی، زیربنای اصلی توسعه پایدار، تعادل اکوسیستم‌های خشکی و آبی، و تضمین امنیت غذایی و سلامت جوامع به شمار می‌روند (Varis et al., 2023). با این وجود، تحولات شتابان دهه‌های اخیر ناشی از رشد جمعیت، توسعه بی‌رویه شهرنشینی، صنایع و پیامدهای تغییر اقلیم، چالش‌های کمی و کیفی بی‌سابقه‌ای را بر اکوسیستم‌های رودخانه‌ای تحمیل کرده است (Ebrahimi et al., 2024). رودخانه‌ها به عنوان شریان‌های حیاتی تخلیه آب، پذیرنده نهایی پساب‌های شهری، صنعتی و رواناب‌های کشاورزی هستند که سلامت اکولوژیک آن‌ها را به مخاطره انداخته است (Wang & Li, 2023).

مدیریت خردمندانه منابع آب پیش از هر چیز مستلزم شناخت دقیق وضعیت کیفی آن‌ها است. به دلیل پیچیدگی و چندبعدی بودن پارامترهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی، تحلیل مجزای آن‌ها ناکارآمد بوده و شاخص‌های کیفیت آب (WQIs) ^۱ به عنوان ابزاری استاندارد برای تبدیل حجم داده‌های آزمایشگاهی به عددی قابل درک توسعه یافته‌اند (Chapman, 2023). علاوه بر این، به کارگیری روش‌های آماری چندمتغیره پیشرفته نظیر ماتریس همبستگی پیرسون، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) ^۲ و تحلیل خوشه‌ای (HCA) ^۳ نقش بسزایی در ارتقای دقت ارزیابی‌های هیدروژئوشیمیایی و منبع‌یابی آلاینده‌ها دارد (Papp et al., 2025). حوضه‌های آبریز شمالی ایران، به‌ویژه حوضه گرگانرود در استان گلستان، نقش تعیین‌کننده‌ای در تعادل اکولوژیکی و معیشت منطقه ایفا می‌کنند (Mousavi et al., 2023). با این حال، تخلیه پساب‌های تصفیه‌نشده و رواناب‌های کشاورزی حاوی نیتрат و فسفات، کیفیت آب این حوضه را با بحران مواجه ساخته است (Karimi & Zolfagharzadeh, 2023). حضور مواد مغذی زمینه را برای پدیده اوتروفیکاسیون و افت شدید اکسیژن محلول (DO) ^۴ فراهم کرده (Zare et al., 2022) و تغییر اقلیم نیز با کاهش دبی در فصول گرم، ظرفیت خودپالایی رودخانه را کاهش داده است (Soltani & Ahmadi, 2023).

از آنجا که یک شاخص به تنهایی تمام ابعاد آلودگی را پوشش نمی‌دهد، در این پژوهش برای دستیابی به ارزیابی همه‌جانبه، کیفیت آب رودخانه گرگانرود در ۱۴ ایستگاه و چهار فصل، از تلفیق سه شاخص معتبر شامل شاخص بومی ایران (IRWQIsc) ^۵، شاخص بنیاد بهداشت آمریکا (NSFWQI) ^۶ و شاخص کانادا (CCMEWQI) ^۷ استفاده می‌شود. صیانت از منابع آب و دستیابی به توسعه پایدار مستلزم شناسایی کانون‌های بحرانی آلودگی است (Mateo-Sagasta et al., 2023) لذا تلفیق شاخص‌های بومی و بین‌المللی با روش‌های آماری، ابزاری مطمئن و علمی برای مدیران و تصمیم‌گیرندگان فراهم می‌کند (Heidari et al., 2024). شایان ذکر است که مفهوم «تلفیق شاخص‌ها» در این پژوهش به معنای ترکیب ریاضی آن‌ها در یک شاخص واحد نبوده، بلکه بیانگر به کارگیری یک چهارچوب ارزیابی چندشاخصه و مکمل است. با توجه به اینکه هر یک از شاخص‌های مورد استفاده (IRWQIsc، NSFWQI و CCMEWQI) بر اساس پارامترها، وزن‌دهی‌ها و الگوریتم‌های متفاوتی عمل می‌کنند، استفاده همزمان از آن‌ها مانع از بروز خطای ناشی از اتکا به یک شاخص منفرد شده و به کمک اعتبارسنجی متقابل، ارزیابی جامع‌تر و دقیق‌تری از پویایی کیفیت آب حوضه گرگانرود فراهم می‌سازد.

مطالعه و ارزیابی کیفیت منابع آب سطحی با بهره‌گیری از شاخص‌های کیفی و تکنیک‌های پیشرفته آماری، همواره جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های مهندسی محیط زیست و مدیریت منابع آب داشته است. در این راستا، مطالعات جامع انجام‌شده توسط Bateni et al. (2023) بر روی پایش مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه‌ها نشان داد که نوسانات فصلی و ورود رواناب‌های سطحی تأثیر بسزایی بر تغییرات غلظت پارامترهای فیزیکوشیمیایی و افت کیفیت آب دارند. همچنین، پژوهش‌های مشابهی نظیر Goodarzi et al. (2023) کارایی بالای شاخص‌های مختلف کیفی را در شناسایی وضعیت بحرانی منابع آب سطحی به اثبات رسانده‌اند.

¹ Water Quality Indices

² Principle Component Analysis

³ Hierarchical cluster Analysis

⁴ Dissolved Oxygen

⁵ Iran Water Quality Index

⁶ National Sanitation Foundation Water Quality Index

⁷ Canadian Council of Ministers of Environment Water Quality Index

از منظر ساختار و ارزیابی ابزارها، (Khan 2025) در یک تحلیل جامع سه‌دهه‌ای نشان داد که انتخاب ساختار وزن‌دهی مناسب نقش تعیین‌کننده‌ای در دقت تبدیل داده‌های پیچیده آزمایشگاهی به اعداد قابل فهم دارد. در همین راستا، (Swain 2024) کارایی شاخص کیفی آب کانادا (CCMEWQI) را در رصد انحراف پارامترها تأیید کرد و (Senanayake & Batugedara 2024) با به کارگیری آن در سری لانکا، توانایی این روش را در شناسایی زون‌های آسیب‌پذیر حوضه نشان دادند.

پیرامون منابع آلودگی و بومی‌سازی، (Doua et al. 2022) مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های بی‌رویه کشاورزی و رواناب‌های حاوی نیتрат را در مناطق نیمه‌خشک برجسته ساختند و (Sarkar & Islam 2021) تخلیه پساب‌های آنتروپوژنیک را عامل مسلط در افت استانداردهای کیفی دانستند. در مقابل، (Zare et al. 2022) با بازنگری و توسعه نسخه بومی‌شده شاخص IRWQIsc، انطباق نتایج را با شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی رودخانه‌های ایران به شکل قابل‌توجهی افزایش دادند.

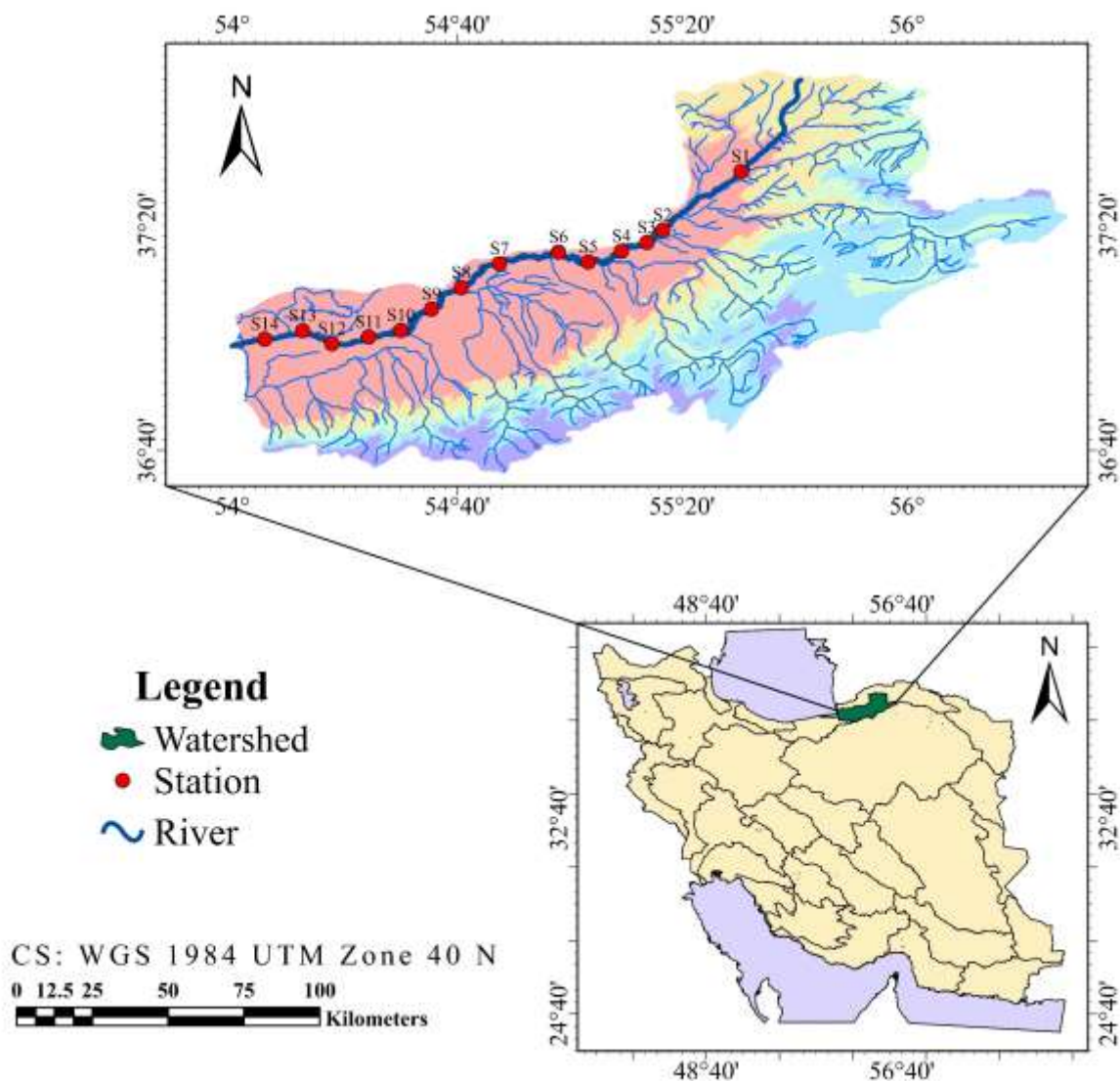
در بخش تحلیل‌های آماری پیشرفته، پژوهش‌های تخصصی اخیر در زمینه هیدروشیمی و آمار چندمتغیره (Goodarzi et al. 2023) تأیید کرده‌اند که استفاده هم‌زمان از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و تحلیل خوشه‌ای (HCA) می‌تواند سهم پساب‌های شهری و کشاورزی را به دقت تفکیک کرده و ایستگاه‌های پایش را بر اساس درجه آلودگی دسته‌بندی کند (Rezaei et al. 2022). نیز کارآمدی ماتریس همبستگی پیرسون را در شناسایی روابط خطی و هم‌خطی غلظت یون‌ها تأیید نمودند، و (Moradi et al. 2024) اثبات کردند که تلفیق تحلیل خوشه‌ای با مؤلفه‌های اصلی نه تنها حجم داده‌های پیچیده را کاهش می‌دهد، بلکه دقت پایش و شناسایی کانون‌های بحرانی را برای تصمیم‌گیرندگان ارتقا می‌بخشد.

هدف از پژوهش حاضر، تحلیل پویایی مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه گرگانرود از طریق یک چهارچوب ارزیابی جامع است. حوضه آبریز گرگانرود به دلیل ویژگی‌های اقلیمی و فشارهای ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و شهری، نیازمند بررسی دقیق هیدرولوژیکی است. تمایز اصلی این پژوهش در مقایسه با مطالعات پیشین، پرهیز از رویکردهای تک‌بعدی و اتصال مستقیم پویایی فصلی کیفیت آب به ردیابی و تفکیک منابع آلودگی نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای با بهره‌گیری از مدل‌های آماری چندمتغیره (PCA و HCA) است. این چهارچوب چندشاخصه و مکمل، در کنار تدوین راهبردهای مدیریتی، تصویری چندبعدی و ساختاریافته برای پایش پایدار منابع آب در حوضه گرگانرود ارائه می‌دهد.

۲. مواد و روش

۱،۲. منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز گرگانرود به عنوان یکی از مهم‌ترین، طولی‌ترین و امن‌ترین سامانه‌های هیدرولوژیکی در شمال ایران (استان گلستان)، نقش بی‌بدیلی در تعادل اکوسیستم‌های منطقه‌ای و توسعه کشاورزی ایفا می‌کند (Rahnama et al., 2026). این حوضه با مساحتی بالغ بر ۱۰۲۰۰ کیلومتر مربع و شاخه اصلی به طول ۳۵۰ کیلومتر، در محدوده طول شرقی $54^{\circ}00'00''$ تا $56^{\circ}07'30''$ و عرض شمالی $36^{\circ}36'00''$ تا $37^{\circ}47'00''$ واقع شده است و پس از عبور از مناطق مهمی چون گنبدکلووس در نهایت به دریای خزر می‌ریزد (Saffari et al., 2025). تغییرات ارتفاعی حوضه از ۳۵۰۰ تا ۲۶- متر متغیر است و بلندترین نقطه آن قله شاهوار با ارتفاع ۳۹۴۵ متر در بخش جنوبی قرار دارد، به طوری که ۸۲ درصد مساحت حوضه در سد و شمسگیر کمتر از ۱۵۰۰ متر ارتفاع داشته و شیب عمومی آن از جنوب به شمال است. اقلیم منطقه از بخش‌های بالادست کوهستانی با اقلیم معتدل و نیمه‌مرطوب و پوشش جنگلی تا بخش‌های میانی و پایین‌دست دشت با اقلیم نیمه‌خشک و خشک متغیر است و ساختار زمین‌شناسی آن شامل سازندهای آهکی، مارنی و رسوبات آبرفتی جوان است که پویایی جریان و بار رسوبی معلق را در رودخانه ایجاد می‌کند (Nazari et al., 2020).



شکل ۱. موقعیت رودخانه گرگان رود و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

۲.۲. ایستگاه‌های سنجش کیفیت

به منظور پایش دقیق و همه‌جانبه تغییرات مکانی و زمانی کیفیت آب، محدوده مطالعاتی این پژوهش در طول مسیر رودخانه گرگان‌رود شامل ۱۴ ایستگاه نمونه‌برداری (S1 تا S14) است که به صورت سلسله‌مراتبی از بالادست (مناطق کمتر توسعه‌یافته و کوهستانی) تا پایین‌دست (مناطق متراکم شهری، کشاورزی و مجاور محل تخلیه نهایی) جانمایی شده‌اند. این ایستگاه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که اثرات متقابل هیدرولیکی، ورود آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و تغییرات فصلی دبی جریان را به دقت به تصویر بکشند.

۳.۲. پارامترها و روش‌های اندازه‌گیری شده

نمونه‌برداری طی سال ۱۴۰۴ در ۱۴ ایستگاه منتخب انجام گرفت. به منظور ثبت دقیق تغییرات فصلی و به حداقل رساندن نوسانات ساعتی، نمونه‌برداری‌ها در هفته چهارم ماه پایانی هر فصل (خرداد برای بهار، شهریور برای تابستان، آذر برای پاییز و اسفند برای زمستان) و دقیقاً در ساعت ۱۲:۰۰ ظهر انجام شد. ظروف نمونه‌برداری از جنس پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE)^۸ انتخاب شده و

⁸ High-Density Polyethylene

پیش از نمونه برداری با اسید نیتریک و آب مقطر کاملاً شسته و استریل شدند. نمونه‌ها پس از جمع‌آوری، در دمای ۴ درجه سانتی‌گراد (داخل یخچال قابل حمل) به آزمایشگاه منتقل شدند.

در این پژوهش ۱۲ پارامتر فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی بررسی شد. پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل دما، pH، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO) و کدورت به صورت برخط و در محل نمونه برداری (in situ) با استفاده از دستگاه چندسنج پرتابل کالیبره شده (مدل WTW Multi 3430 ساخت آلمان با دقت بالا) اندازه‌گیری شدند. سایر پارامترها شامل اکسیژن بیوشیمیایی مورد نیاز (BOD_5)، اکسیژن شیمیایی مورد نیاز (COD)، نیتрат، فسفات، کل مواد محلول (TDS)، آمونیوم و کلی‌فرم‌های مدفوعی (FC) مطابق با دستورالعمل استاندارد کتاب مرجع آب و فاضلاب (APHA, 2017) در آزمایشگاه مجهز تجزیه شدند.

انتخاب ۱۲ پارامتر فیزیکی، شیمیایی و میکروبیولوژیکی در این مطالعه، بر اساس ماهیت شاخص‌های کیفی منتخب (IRWQIsc)، NSFQI و CCMEWQI و ضرورت پایش آلاینده‌های آنتروپوژنیک و مواد مغذی انجام گرفت. از آنجا که چارچوب پژوهش متمرکز بر ارزیابی شاخص‌های کیفیت آب و تحلیل منابع آلودگی با استفاده از آمار چندمتغیره (PCA و HCA) بوده است، اندازه‌گیری کاتیون‌های اصلی در این فاز مد نظر قرار نگرفت. همچنین، مقدار کل مواد محلول (TDS) در این پژوهش به صورت مستقیم (با استفاده از روش‌های استاندارد وزن سنجی آزمایشگاهی و سنجش مستقیم پراب EC کالیبره شده) اندازه‌گیری شده است و به همین دلیل مستقیماً از مجموع جبری غلظت یون‌های انفرادی مشتق نشده است.

به منظور اطمینان از صحت، دقت و اعتبار داده‌های آزمایشگاهی، پروتکل‌های استاندارد تضمین و کنترل کیفیت (QA/QC) به دقت اعمال شد. برای هر سری نمونه برداری، نمونه‌های شاهد (Method Blanks) جهت بررسی آلودگی‌های احتمالی ظروف و مواد شیمیایی و نمونه‌های تکراری (Duplicates) برای سنجش تکرارپذیری نتایج (با خطای قابل قبول کمتر از ۵ درصد) آماده و آنالیز شدند. همچنین، دستگاه‌های اندازه‌گیری پرتابل پیش از هر بار استفاده در ایستگاه‌ها با محلول‌های بافر استاندارد کالیبره‌سازی مجدد شدند.

۴.۲. معرفی شاخص‌های کیفی

۴.۲.۱. شاخص کیفیت آب سطحی ایران (IRWQIsc)

شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران (IRWQIsc) یک ابزار بومی با مقیاس ۰ تا ۱۰۰ است که به‌طور ویژه برای شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی ایران توسعه یافته تا پایش روند تغییرات کیفیت آب و مواجهه با تغییر اقلیم را فراهم کند. این شاخص اثرات تلفیقی آلاینده‌های مختلف را در قالب یک کمیت عددی ادغام می‌کند؛ به‌طوری‌که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده کیفیت عالی و مقادیر پایین‌تر بیانگر شدت آلودگی است. تنزل کیفی منابع آب موجب افزایش هزینه‌های تصفیه و کاهش بهره‌وری و پایداری اقتصادی در بخش کشاورزی می‌شود. این شاخص شامل ۱۱ پارامتر کلیدی فیزیکوشیمیایی، آلی، مغذی و میکروبی (شامل هدایت الکتریکی، اسیدیته، اکسیژن محلول، BOD_5 ، COD، کدورت، سختی کل، نیترات، فسفات، آمونیوم و کلیفرم‌های مدفوعی) است که هر کدام با ضرایب وزنی متناسب با اهمیت زیست‌محیطی در مدل اعمال می‌شوند (Karbassi, A. R., et al. 2020) (جدول ۱).

جدول ۱. وزن پارامترهای شاخص IRWQIsc

Parameters	Unit	Weight
Fecal Coliform	MPN/100ml	۰/۱۴
BOD_5	mg/l	۰/۱۱۷
Nitrate	mg/l	۰/۱۰۸
Dissolved Oxygen	% Saturation	۰/۰۹۷
Electrical Conductivity	μ s/cm	۰/۰۹۶
COD	mg/l	۰/۰۹۳
Ammonium	mg/l	۰/۰۹
Phosphate	mg/l	۰/۰۸۷
Turbidity	NTU	۰/۰۶۲
Total Hardness	mg $CaCO_3$ /l	۰/۰۵۹
pH	-	۰/۰۵۱

برای محاسبه این شاخص ابتدا مقادیر اندازه‌گیری شده هر یک از ۱۱ پارامتر کیفیت آب مانند (pH، BOD، نیترات و غیره) با استفاده از منحنی‌های استاندارد مخصوص این شاخص، به عددی بین ۰ تا ۱۰۰ تبدیل می‌شوند (q_i). سپس به هر پارامتر بر اساس اهمیت زیست‌محیطی آن در آلودگی آب، یک وزن مشخص اختصاص داده می‌شود، به طوری که مجموع وزن‌ها برابر با ۱ باشد ($\sum w_i = 1$). و شاخص نهایی با استفاده از لگاریتم و مجموع وزن‌دار زیرشاخص‌ها به صورت زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

$$IRWQI_{sc} = \left(\prod_{i=1}^n I_i^{w_i} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad \text{رابطه ۱}$$

در معادله فوق I_i مقدار شاخص از پارامتر i ام، w_i وزن پارامتر i ام، n تعداد پارامترها و γ مجموع وزن‌ها ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$) می‌باشد. پس از محاسبه عدد نهایی، وضعیت رودخانه بر اساس بازه‌های عددی $IRWQI_{sc}$ به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شود (جدول ۲).

جدول ۲. طبقه‌بندی توصیفی شاخص $IRWQI_{sc}$

Descriptive class	Index Value
Very Bad	<۱۵
Bad	۱۵-۲۹/۹
Relatively Bad	۳۰-۴۴/۹
Medium	۴۵-۵۵
Relatively Good	۵۵/۱-۷۰
Good	۷۰/۱-۸۵
Very Good	>۸۵

۲.۴.۲. شاخص بنیاد ملی بهداشت آمریکا (NSFWQI)

شاخص $NSFWQI$ یکی از معتبرترین و پرکاربردترین روش‌ها در سطح جهانی برای ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی است که توسط (Brown et al., 1970) برای بنیاد ملی بهداشت آمریکا تدوین شده است. این شاخص به دلیل ساختار علمی مدون خود، به یکی از شاخص‌های مرجع در ادبیات تخصصی مهندسی محیط زیست تبدیل شده است.

محاسبه این شاخص به صورت مجموع وزنی زیرشاخص‌ها انجام می‌شود. برای هر پارامتر آزمایشگاهی، یک منحنی استاندارد (Rating Curve) وجود دارد، مقدار اندازه‌گیری شده آزمایشگاهی روی منحنی مربوطه برده شده و عدد متناظر آن (بین ۰ تا ۱۰۰) به عنوان (q_i) استخراج می‌کنیم. هر یک از ۹ پارامتر دارای یک وزن ثابت (w_i) هستند که نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری آن پارامتر بر کیفیت کلی آب است. و محاسبه ی $NSFWQI$ عدد نهایی شاخص است که مجموع حاصل ضرب q_i (امتیاز کیفی) در w_i (وزن) را نشان می‌دهد (Akoteyon et al., 2023) (رابطه ۲).

$$WQI_{NSF} = \sum_{i=1}^n (q_i \times w_i) \quad \text{رابطه ۲}$$

مقادیر وزن‌ها (w_i) در شاخص $NSFWQI$ به صورت ثابت و استاندارد شده توسط توسعه‌دهندگان این شاخص تعیین شده‌اند تا تأثیر نسبی هر پارامتر بر کیفیت کلی آب را نشان دهند (جدول ۳). مجموع این وزن‌ها همواره برابر با عدد ۱ است.

جدول ۳. وزن پارامترهای شاخص $NSFWQI$

Parameters	Unit	Weight(w_i)
Dissolved Oxygen	% Saturation	۰/۱۷
Fecal Coliform	MPN/100ml	۰/۱۶
pH	-	۰/۱۱
BOD ₅	mg/l	۰/۱۱
Delta Temperature	°c	۰/۱
PO ₄	mg/l	۰/۱
NO ₃	mg/l	۰/۱
Turbidity	NTU	۰/۰۸
TDS	mg CaCO ₃ /l	۰/۰۷

عدد نهایی حاصل از محاسبات طبق استاندارد تفسیر می‌شود (جدول ۴).

جدول ۴. طبقه‌بندی توصیفی شاخص NSFQI

Descriptive class	Index Value
Very Bad	۰-۲۵
Bad	۲۵/۱-۵۰
Medium	۵۰/۱-۷۰
Good	۷۰/۱-۹۰
Excellent	۹۰/۱-۱۰۰

۳,۴,۲ شاخص کیفیت آب کانادا (CCMEWQI)

شاخص کیفیت آب شورای وزیران محیط زیست کانادا (CCMEWQI) به عنوان یکی از جامع‌ترین، انعطاف‌پذیرترین و استانداردترین ابزارها در ارزیابی جامع منابع آبی شناخته می‌شود که طی دهه‌های اخیر مسیر تکاملی مهمی را در چارچوب پایش، ارزیابی اکولوژیک و مدیریت کلان منابع آب طی کرده است (Uddin, M et al., 2021). این شاخص به دلیل قابلیت انطباق بالا با هر نوع کاربری آب و عدم وابستگی به یک مجموعه ثابت از پارامترها، به طور گسترده در پژوهش‌های اکولوژیکی و مدیریتی استفاده می‌شود (Lata et al., 2023).

محاسبه این شاخص بر سه فاکتور آماری اصلی استوار است که انحراف کیفیت آب را از استانداردهای مطلوب اندازه‌گیری می‌کنند: ۱. دامنه (F_1 - Scope). این فاکتور نشان‌دهنده درصد پارامترهایی است که حداقل در یک نمونه‌برداری، از محدوده استاندارد فراتر رفته و دچار شکست (Fail) شده‌اند (رابطه ۳).

$$F_1 = \left(\frac{\text{Number of failed variables}}{\text{Total number of variables}} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

۲. فرکانس (F_2 - Frequency): این فاکتور نشان‌دهنده درصد کل نمونه‌های شکست‌خورده نسبت به کل نمونه‌های آزمایش‌شده است (رابطه ۴).

$$F_2 = \left(\frac{\text{Number of failed tests}}{\text{Total number of tests}} \right) \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

۳. دامنه انحراف (F_3 - Amplitude): نشان‌دهنده میزان انحراف و شدت فاصله مقادیر خارج از محدوده از استانداردهای تعیین‌شده است. این فاکتور با استفاده از یک تابع آماری که مقدار انحرافات را مقیاس‌بندی می‌کند، محاسبه می‌شود تا مشخص شود نمونه‌های آلوده چقدر از حد مجاز فاصله داشته‌اند. ابتدا مقدار انحراف تجمیعی (excursion) برای هر تست ناموفق محاسبه می‌شود (رابطه ۵).

$$\text{Excursion}_i = \left(\frac{\text{Failed test value}_i}{\text{Objective}_i} \right) - 1 \quad \text{رابطه ۵}$$

برای پارامترهایی که مقادیر کمتر از استاندارد آن‌ها بحرانی است، مانند اکسیژن محلول، فرمول معکوس می‌شود. سپس مجموع کل انحرافات به دست آمده بر تعداد کل تست‌ها تقسیم شده و از طریق یک تابع مجانب به بازه بین صفر تا صد تبدیل می‌گردد و F_3 از رابطه ۶ بدست می‌آید.

$$F_3 = \left(\frac{\text{nse}}{0.01 \cdot \text{nse} + 0.01} \right) \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن nse برابر است با مجموع انحرافات تقسیم بر کل تعداد تست‌ها. فرمول نهایی که این سه عامل را ترکیب می‌کند از رابطه ۷ بدست می‌آید.

$$\text{CCMEWQI} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \right) \quad \text{رابطه ۷}$$

عدد حاصل (بین ۰ تا ۱۰۰) به ترتیب نشان‌دهنده کیفیت از سطح «بسیار ضعیف» تا «ایده‌آل» است (جدول ۵).

جدول ۵. طبقه‌بندی توصیفی شاخص CCMEWQI

Descriptive class	Index Value	Interpretation of water quality conditions
Poor	۰-۴۴/۹	Water quality is almost always threatened or impaired; conditions usually depart from natural or desirable levels.
Marginal	۴۵-۶۴/۹	Water quality is frequently threatened or impaired; conditions often depart from natural or desirable levels from natural or desirable levels.
Fair	۶۵-۷۹/۹	Water quality is usually protected but occasionally threatened or impaired, conditions sometimes depart from natural or desirable levels.
Good	۸۰-۹۴/۹	Water quality is protected with only a minor degree of threat or impairment; conditions rarely depart from natural or desirable levels.
Excellent	۹۵-۱۰۰	Water quality is protected with a virtual absence of threat or impairment; conditions very close to natural or pristine levels.

۵.۲. تحلیل‌های آماری و چندمتغیره

به منظور ارزیابی دقیق ساختار داده‌های کیفی حوضه آبریز، کاهش حجم داده‌های حجیم آزمایشگاهی، تعیین روابط خطی میان پارامترهای فیزیکی-شیمیایی و در نهایت منبع‌یابی آلاینده‌های آب (تفکیک منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای)، از روش‌های آماری پیشرفته و تحلیل‌های چندمتغیره استفاده شد. پیش از انجام این تحلیل‌ها، نرمال بودن توزیع داده‌ها بررسی شده و در صورت نیاز، تبدیل‌های آماری لازم روی داده‌ها اعمال گردید. کلیه محاسبات و تحلیل‌های آماری با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی انجام گرفت. پیش از اجرای تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، به منظور بررسی کفایت نمونه‌برداری و اطمینان از مناسب بودن ماتریس داده‌ها برای تحلیل عاملی، از دو آزمون آماری استاندارد شامل آزمون کایزر-مایر-اولکین (KMO) و آزمون کرویت بارتلت (Bartlett's Test of Sphericity) استفاده شد. مقدار آماره KMO برابر با ۰/۷۶ محاسبه گردید که با توجه به قرار گرفتن بالاتر از حد آستانه قابل قبول (۰/۶)، کفایت و حجم مناسب داده‌ها را تأیید می‌کند. علاوه بر این، نتیجه آزمون کرویت بارتلت با مقدار آماری معنی‌دار ($p < 0.001$) نشان داد که همبستگی میان متغیرها برای اجرای تحلیل PCA کاملاً مناسب و مطلوب است.

۱.۵.۲. تحلیل ماتریس همبستگی پیرسون

ماتریس همبستگی پیرسون یکی از ابزارهای بنیادی و پرکاربرد آماری در مطالعات هیدروژئوشیمیایی و ارزیابی کیفیت منابع آب به شمار می‌رود. ضریب همبستگی پیرسون (r) معیاری برای سنجش جهت و شدت رابطه خطی میان متغیرهای کمی در بازه ۱- تا ۱+ است. این ماتریس در قالب یک جدول دوطرفه، ضریب همبستگی را برای تمامی جفت پارامترهای فیزیکی-شیمیایی (مانند pH، EC، TDS، یون‌های اصلی و فلزات سنگین) به صورت هم‌زمان نمایش می‌دهد. تحلیل این ماتریس اهداف کلیدی شامل شناسایی منشاء مشترک آلاینده‌ها (مانند پساب‌های شهری و کشاورزی)، جلوگیری از خطای هم‌خطی شدید پیش از اجرای مدل‌سازی‌های پیشرفته نظیر تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، و تأیید رفتار ژئوشیمیایی و دقت داده‌های آزمایشگاهی (از طریق همبستگی پایدار میان EC و TDS) را دنبال می‌کند (Kuznetsov, V., et al. 2025). برای محاسبه ضریب همبستگی پیرسون بین دو متغیر کمی (مانند X و Y) از فرمول استاندارد آماری زیر استفاده می‌شود (رابطه ۸).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن n تعداد کل مشاهدات یا نمونه‌های بررسی‌شده (در این پژوهش، تعداد کل داده‌های نمونه‌برداری‌شده در ایستگاه‌ها و فصل‌های مختلف)، x_i و y_i مقادیر متناظر هر یک از مشاهدات برای پارامترهای اول و دوم، و $\bar{x}$ و $\bar{y}$ میانگین حسابی مقادیر مربوط به متغیرهای x و y می‌باشند.

۲.۵.۲. تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)

تحلیل مؤلفه‌های اصلی ابزاری پیشرفته برای کاهش ابعاد داده‌های حجیم هیدروژئوشیمیایی و منبع‌یابی آلاینده‌هاست که متغیرهای هم‌بسته را به متغیرهای مستقل جدید تحت عنوان مؤلفه‌های اصلی با حفظ بیشترین میزان واریانس تبدیل می‌کند. اجرای این تحلیل در نرم‌افزارهای آماری ابتدا مستلزم استانداردسازی داده‌ها با روش نمره‌گذاری با میانگین صفر و انحراف معیار یک جهت خنثی‌سازی اثر مقیاس‌های مختلف پارامترها است، و سپس با تشکیل ماتریس همبستگی، ارزش‌های ویژه استخراج می‌شوند که

بر اساس معیار کایزر، تنها مؤلفه‌های با ارزش ویژه بزرگ‌تر از یک به عنوان عوامل معنادار انتخاب می‌گردند. برای تسهیل تفسیر بار عاملی مؤلفه‌ها و وضوح ساختار داده‌ها، از روش چرخش متعامد واریماکس استفاده می‌شود تا هر پارامتر بیشترین بار را روی یک مؤلفه خاص داشته باشد. بارهای عاملی به‌دست‌آمده که همبستگی بین پارامترها و مؤلفه‌ها را نشان می‌دهند، معمولاً به دسته‌های قوی (بالا تر از ۰,۷۵)، متوسط (۰,۵ تا ۰,۷۵) و ضعیف (۰,۳ تا ۰,۵) تقسیم می‌شوند و به پژوهشگر اجازه می‌دهند تا منشاء آلاینده‌ها را تفکیک کند؛ به‌طوری‌که بار قوی برای پارامترهایی نظیر هدایت الکتریکی (EC) نشان‌دهنده عوامل زمین‌زاد و شوری طبیعی و بار قوی برای سایر موارد بیانگر ورود پساب‌های کشاورزی و فعالیتهای آنتروپوژنیک است (Helisa et al., 2021).

۳,۵,۲. تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis - HCA)

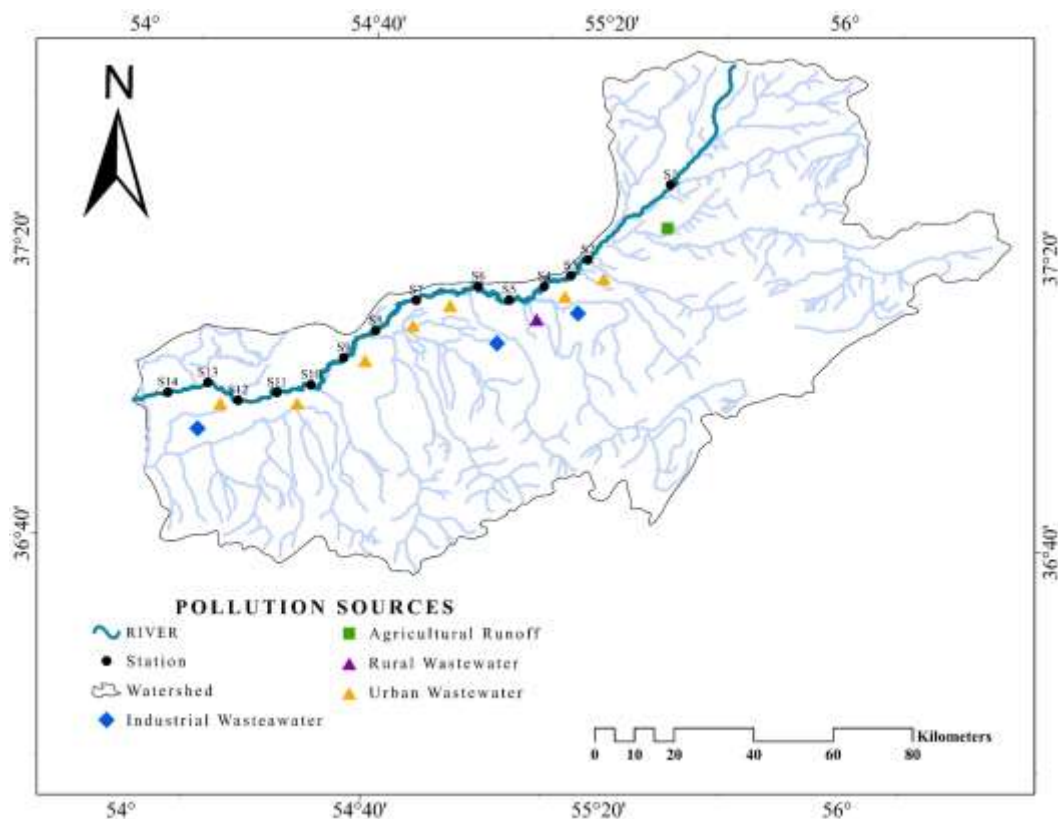
تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی یکی از کارآمدترین روش‌های آماری چندمتغیره برای گروه‌بندی نمونه‌ها، ایستگاه‌ها یا پارامترهای کیفی بر اساس میزان شباهت و فاصله (مانند فاصله اقلیدسی) در مطالعات منابع آب است که با هدف ایجاد خوشه‌های همگن با بیشترین شباهت درون خوشه‌ای و تفاوت بین خوشه‌ای اجرا می‌شود. در این روش تجمیعی، هر داده به عنوان یک خوشه مستقل آغاز شده و در فرآیندی متوالی با شبیه‌ترین خوشه‌ها ادغام می‌گردد، به‌طوری‌که روش وورد (Ward) به دلیل حداقل سازی واریانس درون خوشه‌ای به عنوان استانداردترین الگوریتم پیوند شناخته می‌شود. خروجی نهایی این تحلیل به‌صورت نمودار دندوگرام است که با برش آن در سطح فاصله معین می‌توان تعداد بهینه خوشه‌ها را تعیین کرد، ایستگاه‌ها را بر اساس منابع آلودگی دسته‌بندی نمود، نواحی با کیفیت مشابه را شناسایی کرد و نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) را اعتباربخشی نمود (Kadir et al., 2024).

۳. نتایج و بحث

۳,۱,۳. میزان تغییرات پارامترهای کیفی در ایستگاه‌های مورد سنجش در امتداد رودخانه

بررسی مقادیر پارامترهای فیزیکوشیمیایی در ایستگاه‌های چهارده‌گانه گرگانرود در مقایسه با استانداردهای ملی و رهنمودهای سازمان بهداشت جهانی (WHO) نشان داد که کیفیت آب به شدت تحت تأثیر فصول سال قرار دارد. به عنوان مثال، در فصول گرم سال، میزان اکسیژن محلول (DO) در ایستگاه‌های مورد بررسی پایین‌تر از حد استاندارد مجاز برای آبزیان و مصارف محیط‌زیستی قرار گرفت. همچنین، غلظت اکسیژن بیوشیمیایی (BOD₅) و شیمیایی (COD) در ایستگاه‌های واقع در پایین‌دست مناطق شهری و کشاورزی به ترتیب در فصول مختلف از حد مجاز استانداردهای ایران فراتر رفته که گویای بار آلودگی نقطه‌ای و ورود پساب‌های تصفیه‌نشده است.

به‌منظور ریشه‌یابی و اعتبارسنجی مکانی این تغییرات، توزیع منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای در امتداد حوضه گرگانرود مورد تحلیل قرار گرفت. همان‌طور که در نقشه حوضه مشاهده می‌شود، ایستگاه‌های بالادست (نظیر S1 تا S3) به دلیل فاصله از کانون‌های آلودگی، حداقل بارگذاری را تجربه می‌کنند؛ در حالی که استقرار متراکم پساب‌های شهری، واحدهای صنعتی و پهنه‌های کشاورزی در بازه‌های میان‌دست و پایین‌دست، به‌ویژه در محدوده ایستگاه‌های انتهایی (S10 تا S14)، عامل اصلی افت شدید کیفیت آب و افزایش پارامترهای آلاینده است. این هم‌خوانی مکانی، اعتبار نتایج حاصل از ارزیابی‌های چندشاخصه و تحلیل‌های آماری را تأیید می‌نماید (شکل ۲).



شکل ۲. ایستگاه‌های نمونه‌برداری و توزیع مکانی منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای.

بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه در فصل بهار (ایستگاه‌های S1 تا S14) نشان می‌دهد که در بخش بالادست و سرچشمه (ایستگاه‌های S1 و S2)، کیفیت آب نسبتاً پایدار بوده و پارامترهای آلودگی آلی (BOD_5 و COD) در سطح پایینی قرار دارند، هرچند شاخص کلی‌فرم‌های مدفوعی (FC) از همان ابتدا در سطح بحرانی (بالتر از ۱۱۰۰ MPN/100 ml) گزارش شده است. با ورود به بخش میانی حوضه (ایستگاه‌های S3 تا S8) و بروز اثرات پساب‌های شهری و کشاورزی، بار آلودگی و شوری به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که غلظت فسفات در ایستگاه S5 به ۴۶ میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی (EC) در ایستگاه S8 تا ۲۴۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر صعود می‌کند. در نهایت، بحرانی‌ترین شرایط کیفی در بخش پایین‌دست و انتهای حوضه (ایستگاه‌های S9 تا S14) ثبت می‌شود که در آن شوری آب در ایستگاه S10 به اوج بی‌سابقه خود (EC معادل ۶۶۲۵۰) می‌رسد، بار آلودگی ارگانیک به‌شدت افزایش می‌یابد، بیشترین مقادیر BOD_5 و COD در ایستگاه‌های انتهایی نظیر S11، S13 و S14 ثبت می‌گردد و آلودگی میکروبی (کلی‌فرم‌های مدفوعی) نیز بدون استثنا در تمامی ایستگاه‌های مسیر در سقف اندازه‌گیری (بیش از ۱۱۰۰) باقی می‌ماند (جدول ۶).

جدول ۶. میانگین پارامترهای کیفی بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل بهار

Parameters	DO	T	pH	TDS	EC	Turbidity	BOD_5	COD	NO_3^-	PO_4^{3-}	FC
Stations	mg/l	°C	-	mg/l	$\mu S/cm$	NTU	mg/l	mg/L	mg/l	mg/l	MPN/100
S1	۹/۷۳	۲۱/۹	۷/۹	۵۱۰	۱۰۳۰	۳۰	۰/۳	۸	۳/۷	۰	>۱۱۰۰
S2	۱۰/۱۷	۲۶/۷	۸/۴	۸۹۰	۱۸۰۰	۶/۸	۲/۵	۲۴	۳/۵	۰	>۱۱۰۰
S3	۷/۹۳	۲۶/۲	۷/۵	۳۴۰۰	۶۹۰۰	۹/۲	۱/۱	۱۶	۳/۶	۰/۲۴	>۱۱۰۰
S4	۱۱/۶۲	۳۰/۷	۸	۴۷۵۰	۱۱۰۰۰	۲۰	۱۶/۸	۶۳	۳/۴	۰/۲۹	>۱۱۰۰
S5	۹/۲۹	۲۹/۵	۷/۸	۲۵۵۰	۵۴۵۰	۳۰	۷/۹	۳۳	۳/۲	۰/۴۶	>۱۱۰۰
S6	۱۵/۷۶	۲۹/۷	۸/۱	۴۰۰۰	۸۰۵۰	۵۰	۶/۷	۵۴	۲/۴	۰	>۱۱۰۰
S7	۱۲/۵۹	۲۹/۸	۷/۸	۱۱۵۰۰	۳۳۲۵۰	۱۲/۷	۴/۵	۵۷	۲	۰/۰۸	>۱۱۰۰
S8	۱۱/۵	۳۱/۵	۸/۱	۱۲۰۰۰	۳۴۰۰۰	۶/۸	۳/۲	۵۹	۰/۲	۰/۰۳	>۱۱۰۰
S9	۵/۴۹	۳۹/۹	۸/۴	۲۰۲۵۰	۴۰۷۵۰	۶۰	۵/۴	۱۰	۰/۴	۰/۰۸	>۱۱۰۰
S10	۶/۸۶	۳۳/۸	۸/۵	۲۹۵۰۰	۶۶۲۵۰	۱۵	۴/۹	۱	۰/۶	۰	>۱۱۰۰
S11	۶/۷۶	۲۵/۱	۸/۲	۱۰۵۰۰	۱۸۵۰۰	۱۳/۵	۱۵/۲	۱۰۱	۰/۹	۰/۰۳	>۱۱۰۰

S12	۷/۳	۲۴/۴	۸/۱	۳۴۰۰	۶۹۰۰	۱۰	۱/۱	۱۶	۱	۰	>۱۱۰۰
S13	۹/۰۹	۲۶/۲	۸/۷	۱۹۰۰۰	۳۳۷۵۰	۵۰	۱۷/۸	۱۵۶	۱/۵	۰	>۱۱۰۰
S14	۱۰/۹۶	۲۷/۷	۸/۶	۱۳۷۵۰	۲۸۰۰۰	۴۷	۳۶/۸	۱۰۸	۱/۸	۰	>۱۱۰۰
Min	۵/۴۹	۲۱/۹	۷/۵	۵۱۰	۱۰۳۰	۶/۸	۰/۳	۱	۰/۲	۰	-
Max	۱۵/۷۶	۳۹/۹	۸/۷	۲۹۵۰۰	۶۶۲۵۰	۶۰	۳۶/۸	۱۵۶	۳/۷	۰/۴۶	-
Mean	۹/۶۵	۲۸/۷۹	۸/۱۵	۹۷۱۴/۲۹	۱۹۶۸۷/۸۶	۲۵/۷۹	۸/۸۷	۵۰/۴۳	۲/۰۱	۰/۰۹	-
SD	۲/۷۴	۴/۴۸	۰/۳۴	۸۶۱۵/۵۹	۱۸۲۲۹/۲۲	۱۸/۷۰	۹/۹۳	۴۵/۱۹۷	۱/۲۸	۰/۱۴	-
Range	۶/۱۱	۱۱/۱۱	۰/۵۵	۱۹۷۸۵/۷۱	۴۶۵۶۲/۱۴	۳۴/۲۱	۲۷/۹۳	۱۰۵/۵۶	۱/۶۹	۰/۳۷	-

در فصل تابستان در جدول شماره ۷ نشان می‌دهد که هم‌زمان با افزایش دما، بارگذاری آلاینده‌ها و شوری به‌طور چشمگیری تشدید می‌شود؛ به‌طوری‌که در بخش بالادست و سرچشمه (ایستگاه S1)، آب با داشتن مقادیر پایین آلودگی آلی (BOD₅ معادل ۰,۲ و COD معادل ۱۲) از کیفیت مطلوبی برخوردار است، اما با عبور از آن، شوری در ایستگاه S2 به‌سرعت افزایش می‌یابد. با ورود به بخش میانی حوضه (ایستگاه‌های S3 تا S8)، مقادیر شوری، مواد مغذی و آلودگی ارگانیک به‌صورت تصاعدی بالا می‌رود؛ به‌گونه‌ای که هدایت الکتریکی (EC) در ایستگاه S4 به ۱۶۷۵۰ و در ایستگاه S8 به ۱۹۷۵۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد و مقادیر BOD₅ و COD در ایستگاه‌های S4، S6 و S8 نوسانات صعودی شدیدی را تجربه می‌کنند. بحرانی‌ترین شرایط کیفی در بخش پایین‌دست و انتهایی حوضه (ایستگاه‌های S9 تا S14) ثبت می‌شود که در آن شوری آب در ایستگاه S9 به اوج بی‌سابقه خود (EC معادل ۴۸۷۵۰) می‌رسد و ایستگاه S14 با داشتن بالاترین میزان کدورت فصلی (۱۸۲ NTU)، بیشترین مقدار COD (۱۲۱ میلی‌گرم بر لیتر) و بالاترین غلظت BOD₅ (۴۲,۲ میلی‌گرم بر لیتر) مواجه است؛ همچنین آلودگی میکروبی در بسیاری از ایستگاه‌های میانی و انتهایی نظیر S4، S5، S6، S7، S11 و S14 در سطح بحرانی بالاتر از ۱۱۰۰ MPN/100 ml قرار دارد.

جدول ۷. میانگین پارامترهای کیفی بیولوژیکی و فیزیکی-شیمیایی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل تابستان

Parameters Stations	DO mg/l	T °c	pH -	TDS mg/l	EC µs/cm	Turbidity NTU	BOD ₅ mg/l	COD mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l	FC MPN/100
S1	۹/۴۶	۲۳	۷/۴	۵۱۰	۱۰۳۰	۷/۵	۰/۲	۱۲	۰/۱	۰/۱۰۵	۱۱۰۰
S2	۶/۳۶	۲۷/۵	۷/۶	۲۰۰	۴۰۰۰	۳۳	۳/۸	۲۵	۰/۲	۰/۶۵	۹۳
S3	۷/۴۷	۲۷/۶	۷/۷	۵۲۵۰	۱۰۷۵۰	۳۳/۳	۶/۴	۲۸	۰/۲	۱/۵۶	۹۳
S4	۲/۶۲	۲۹/۱	۷/۶	۹۲۵۰	۱۶۷۵۰	۱۱/۲	۱۶/۷	۶۰	۱/۶	۲/۴۶	>۱۱۰۰
S5	۹/۷۵	۲۹/۷	۷/۹	۳۰۰	۶۰۰۰	۱۲	۹	۲۶	۰/۶	۱/۳۶	>۱۱۰۰
S6	۷/۹	۳۶	۸/۸	۶۷۵۰	۱۳۵۰۰	۹۰	۳۹	۹۱	۱	۰/۲۶	>۱۱۰۰
S7	۶/۴۳	۲۵/۹	۷/۹	۱۲۲۵۰	۲۵۵۰۰	۹۸	۷	۶	۰/۷	۰/۲	>۱۱۰۰
S8	۱۱/۸	۲۸/۰۱	۸	۹۷۵۰	۱۹۷۵۰	۳۱	۲۱/۹	۵۴	۰/۴	۰/۱۰۵	۴۶۰
S9	۱۱/۳۳	۲۵/۹	۸/۶	۲۵۲۵۰	۴۸۷۵۰	۳/۴	۳/۱	۳۶	۰/۵	۰/۵	۲۳
S10	۱۱/۷۸	۲۱/۴	۸	۱۲۰۰۰	۲۴۵۰۰	۵۴	۷/۹	۲۰	۰/۳	۰/۵۲	۹۳
S11	۱۲/۵	۳۸	۷/۹	۱۳۵۰۰	۲۷۲۵۰	۴۵	۱۳/۲	۲۶	۱	۰/۶۵	>۱۱۰۰
S12	۱۳/۰۶	۳۴/۵	۸/۴	۱۴۰۰۰	۲۵۵۰۰	۵۵/۵	۸/۷	۴۶	۰/۶	۰/۷	۴۳
S13	۷/۱۸	۳۴/۲	۸/۱	۱۹۷۵۰	۳۹۵۰۰	۵۱/۵	۷/۹	۵۵	۰/۱	۰/۸۳	۲۴۰
S14	۱۹/۶۸	۳۳/۱	۸/۳	۲۲۲۵۰	۴۴۴۰۰	۱۸۲	۴۲/۲	۱۲۱	۰/۲	۰/۶۹	>۱۱۰۰
Min	۲/۶۲	۲۱/۴	۷/۴	۵۱۰	۱۰۳۰	۳/۴	۰/۲	۶	۰/۱	۰/۱۱	۲۳
Max	۱۹/۶۸	۳۶	۸/۸	۲۵۲۵۰	۴۸۷۵۰	۱۸۲	۴۲/۲	۱۲۱	۱	۲/۴۶	-
Mean	۹/۸۱	۲۹/۵۷	۸/۰۱	۱۱۱۰۷/۸۶	۲۱۹۴۵/۴۳	۵۰/۵۳	۱۳/۳۶	۴۳/۲۹	۰/۴۹	۰/۷۶	-
SD	۳/۹۳	۴/۴۴	۰/۳۸	۷۲۴۴/۸۵	۱۴۲۲۵/۲۶	۴۵/۷۱۲	۱۲/۳۴	۳۰/۴۵۵	۰/۳۲	۰/۶۲	-
Range	۱۷/۰۶	۱۴/۶	۱/۴	۲۴۷۴۰	۴۷۷۲۰	۱۷۸/۶	۴۲	۱۱۵	۰/۹	۲/۳۶	-

بررسی وضعیت کیفی در فصل پاییز نشان می‌دهد که بار آلودگی و شوری با نوسانات چشمگیری همراه است؛ به‌طوری‌که در بخش بالادست (ایستگاه‌های S1 و S2)، مقادیر اولیه هدایت الکتریکی و مواد محلول متغیر بوده و در حالی که ایستگاه S1 آلودگی ارگانیک نسبتاً کمتری دارد، ایستگاه S2 با افزایش BOD₅ (۲۷,۷ میلی‌گرم بر لیتر) و COD (۵۷ میلی‌گرم بر لیتر) مواجه است. با ورود به بخش میانی حوضه (ایستگاه‌های S3 تا S11)، پارامترهای آلودگی ارگانیک و مواد مغذی جهش صعودی شدیدی را تجربه می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که اوج بار آلودگی ارگانیک فصل در ایستگاه S7 با BOD₅ معادل ۴۲ و COD معادل ۱۲۸ میلی‌گرم بر لیتر ثبت می‌شود و مقدار کلی‌فرم‌های مدفوعی به‌جز در ایستگاه S2، در تمامی ایستگاه‌های این بخش در سطح بحرانی بالاتر از ۱۱۰۰ MPN/100 ml باقی می‌ماند. در نهایت، در بخش پایین‌دست و انتهایی حوضه (ایستگاه‌های S9 تا S14)، مقادیر شوری آب جهش

بسیار شدیدی پیدا می‌کند (از جمله EC بالغ بر ۱۵۳۳۳ و TDS معادل ۹۹۶۰ در ایستگاه S12) و آلودگی میکروبی در سرتاسر این بخش بدون استثنا بر روی سقف اندازه‌گیری (بیش از ۱۱۰۰) تداوم می‌یابد (جدول ۸).

جدول ۸. میانگین پارامترهای کیفی بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل پاییز

Parameters Stations	DO mg/l	T °C	pH -	TDS mg/l	EC µs/cm	Turbidity NTU	BOD ₅ mg/l	COD mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l	FC MPN/100
S1	۱۲/۱۱	۲۸/۱	۷/۳	۱۲۴۰	۱۹۰۷	۲۰	۱۸/۱	۳۸	۰/۲۱	۰/۶۳	>۱۱۰۰
S2	۷/۵۷	۳۵/۵	۸/۱	۴۷۰	۹۵۰	۱۰	۲۷/۷	۵۷	۰/۰۹	۱/۹۷	۴۳
S3	۸/۴۷	۳۰/۷	۷/۵	۵۰۰	۱۰۰۰	۷۰	۳۷/۸	۷۵	۰/۱۲	۱/۹۷	>۱۱۰۰
S4	۷/۸۲	۳۱/۳	۷/۹	۵۰۰	۱۰۱۰	۸۰	۲۳/۵	۴۷	۰/۱۷	۲/۰۵	>۱۱۰۰
S5	۷/۵۷	۳۱/۱۴	۷/۸	۵۳۰	۱۰۸۰	۹۰	۲۸/۳	۷۳	۰/۱۷	۱/۹	>۱۱۰۰
S6	۷/۷۶	۳۱/۷	۷/۷	۵۰۰	۱۰۲۰	۸۰	۱۸	۴۸	۰/۵۷	۱/۷۵	>۱۱۰۰
S7	۱۰/۸۸	۳۳/۳	۸/۲	۸۴۰	۱۶۶۰	۱۶/۵	۴۲	۱۲۸	۰/۳۶	۱/۶	>۱۱۰۰
S8	۱۰/۷	۳۲/۲	۸/۱	۸۶۰	۱۷۲۰	۱۳/۵	۴۰	۱۱۲	۰/۱۵	۱/۱۸	>۱۱۰۰
S9	۱۰/۸۸	۳۲/۲	۸	۸۳۰	۱۶۷۰	۳۰	۳۴	۸۰	۰/۲۸	۱/۳۳	>۱۱۰۰
S10	۱۱/۰۱	۳۲/۲	۸/۱	۸۴۰	۱۶۹۰	۲۳/۵	۳۲	۸۰	۰/۴۱	۱/۳۳	>۱۱۰۰
S11	۹/۷۵	۲۹/۶	۷/۸	۸۹۰	۱۷۹۰	۲۶/۸	۳۸	۹۶	۰/۴۹	۱/۳۳	>۱۱۰۰
S12	۱۰/۸۳	۲۹/۷	۸/۱	۹۹۶۰	۱۵۳۳۳	۲۶/۸	۲۲	۶۴	۰/۴۱	۲/۰۵	>۱۱۰۰
S13	۱۱/۴۹	۲۹/۶	۷/۹	۹۳۰۰	۱۴۳۰۸	۳۳/۲	۲۶	۸۰	۰/۲	۲/۰۵	>۱۱۰۰
S14	۱۰/۲۴	۳۰/۱	۸/۴	۷۷۲۰	۱۱۸۷۶	۴۷	۲۶	۸۰	۰/۱۷	۲/۰۵	>۱۱۰۰
Min	۷/۵۷	۲۸/۱	۷/۳	۴۷۰	۹۵۰	۱۰	۱۸	۳۸	۰/۰۹	۰/۵۳	۴۳
Max	۱۲/۱	۳۵/۵	۸/۴	۹۹۶۰	۱۵۳۳۳	۹۰	۴۲	۱۲۸	۰/۵۷	۲/۰۴	-
Mean	۹/۷۹	۳۱/۲۴	۷/۹۲	۲۴۹۸/۵۷	۴۰۷۱/۷۱	۴۰/۵۲	۳۰/۲۴	۷۵/۵۷	۰/۲۷	۱/۶۵	-
SD	۱/۵۵	۱/۷۸	۰/۲۷	۳۲۵/۸۶	۵۱۵۳/۲	۲۶/۶۸	۷/۹۵	۲۳/۹۷	۰/۱۴	۰/۴۲	-
Range	۴/۵۳	۷/۴	۱/۱	۹۴۹۰	۱۴۳۷۳	۸۰	۲۴	۹۰	۰/۴۸	۱/۴۲	-

در فصل زمستان بررسی وضعیت کیفی آب رودخانه‌شان می‌دهد (جدول ۹) که در بخش بالادست و سرچشمه (ایستگاه‌های S1 و S2)، کیفیت آب به دلیل مقادیر پایین آلودگی ارگانیک (BOD₅ و COD) نسبتاً مناسب است، هرچند شاخص کلی‌فرم‌های مدفوعی در ایستگاه S2 به سطح بحرانی بالاتر از ۱۱۰۰ MPN/100 ml می‌رسد. با ورود به بخش میانی حوضه، شوری آب و مواد مغذی افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که هدایت الکتریکی (EC) در ایستگاه‌های S3 و S4 به ۳۹۰۰ و در ایستگاه S7 به ۴۲۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر می‌رسد، غلظت فسفات در ایستگاه S5 به مقدار چشمگیر ۸۹ میلی‌گرم بر لیتر بالغ می‌شود و آلودگی میکروبی (کلی‌فرم‌های مدفوعی) به‌جز در ایستگاه S3، در سراسر این بخش در سقف اندازه‌گیری (>۱۱۰۰) قرار دارد. در نهایت، بخش پایین‌دست و انتهای حوضه (ایستگاه‌های S9 تا S14) با جهش فوق‌العاده شدید کدورت مشخص می‌شود؛ به‌گونه‌ای که ایستگاه S14 بالاترین میزان کدورت فصلی را با عدد چشمگیر ۶۲۳۳ NTU ثبت می‌کند، شوری در ایستگاه‌های این بخش (مانند S11 تا S13) تا ۶۰۰۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر افزایش می‌یابد و آلودگی شدید میکروبی بدون استثنا در تمامی ایستگاه‌های انتهای مسیر تداوم می‌یابد.

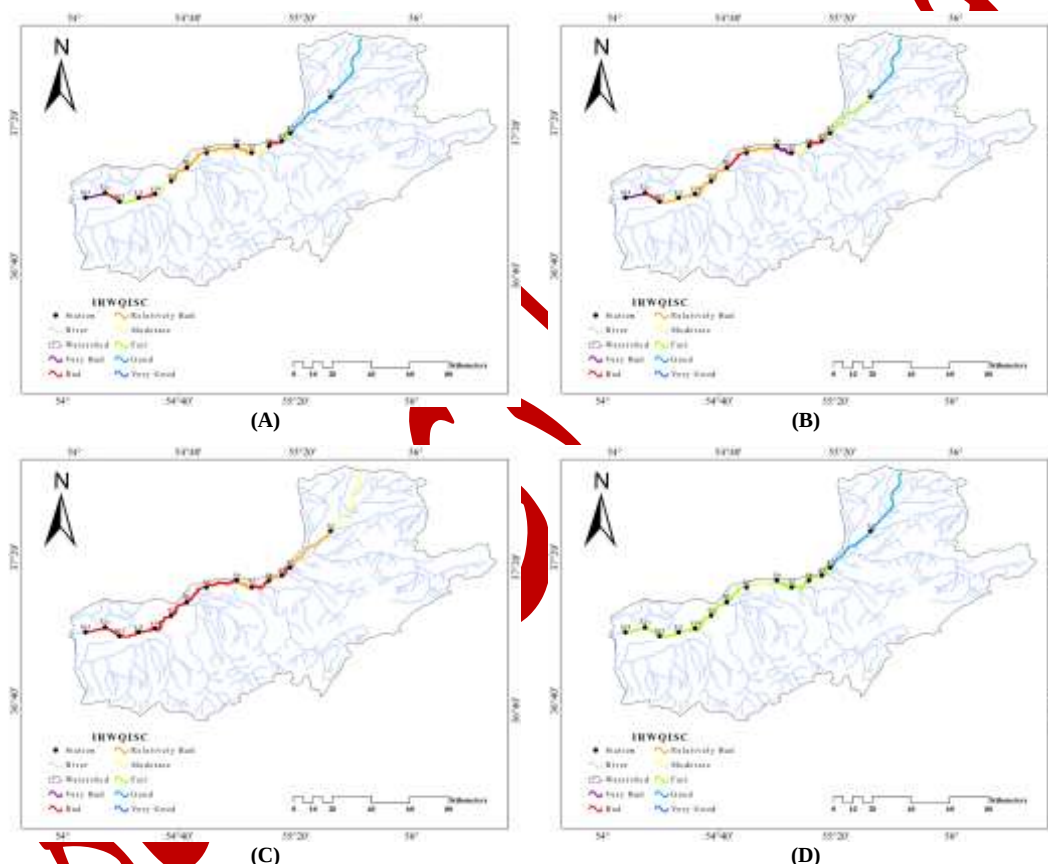
جدول ۹. میانگین پارامترهای کیفی بیولوژیکی و فیزیکوشیمیایی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در فصل زمستان

Parameters Stations	DO mg/l	T °C	pH -	TDS mg/l	EC µs/cm	Turbidity NTU	BOD ₅ mg/l	CO mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	PO ₄ ³⁻ mg/l	FC MPN/100 ml
S1	۱۳/۴۳	۱۰/۸	۷/۳	۳۶۰	۷۳۰	۳۲۰	۲/۹	۶	۴/۲۸	۰/۰۱	۱۵/۱۵
S2	۱۳/۷۳	۱۰	۷/۳	۲۷۰	۵۵۰	۵۱/۵	۱/۸	۴	۰/۴	۰/۳	>۱۱۰۰
S3	۱۱/۲۱	۱۳/۱	۷/۲	۱۹۰۰	۳۹۰۰	۹۰/۵	۳/۳	۷	۰/۱	۰/۳	۲۱۰
S4	۵/۶۲	۱۲/۴	۷/۱	۱۹۰۰	۳۹۰۰	۱۴/۳	۴	۸	۰/۳	۱/۴۶	>۱۱۰۰
S5	۱۲/۳۴	۸/۳	۶/۹	۵۹۰	۱۱۹۰	۱۲۴	۳	۶	۰/۲	۰/۸۹	>۱۱۰۰
S6	۱۱/۴۲	۱۰/۸	۷/۱	۷۴۰	۱۵۰۰	۸۵/۳	۲/۸	۶	.	۰/۷۴	>۱۱۰۰
S7	۱۱/۲۴	۹/۷	۷/۱	۲۰۰۰	۴۲۰۰	۲۱۷	۲	۴	۹/۹	۰/۵۹	>۱۱۰۰
S8	۱۰/۹	۱۱/۵	۲/۷	۱۲۰۰	۲۴۰۰	۱۴۵	۲/۳	۵	۷/۰۲	۰/۴۳	>۱۱۰۰
S9	۱۵/۵	۱۱/۱	۷/۵	۶۴۰	۶۴۰	۲۰۳	۲/۵	۵	۰/۳	۰/۴۴	>۱۱۰۰
S10	۱۱/۲۲	۱۱/۱	۷/۲	۱۹۰۰	۴۰۰۰	۸۴/۲	۲/۱	۴	۰/۱	۰/۱۵	>۱۱۰۰
S11	۱۰/۶۲	۱۴/۷	۷/۴	۲۵۰۰	۵۲۰۰	۹۲/۵	۳/۳	۷	۰/۲	۰/۳	>۱۱۰۰
S12	۱۳/۴	۱۲/۷	۷/۲	۲۸۰۰	۵۶۰۰	۴۳/۹	۴/۵	۹	۰/۴	۰/۷۴	>۱۱۰۰
S13	۱۲/۲	۱۱/۷	۷/۳	۲۹۰۰	۶۰۰۰	۴۴/۴	۳/۶	۷	.	۰/۷۴	>۱۱۰۰
S14	۱۳/۱۶	۱۱/۷	۷/۱	۱۲۰۰	۲۴۰۰	۶۲۳	۳/۳	۷	۱/۷۶	۰/۷۴	>۱۱۰۰
Min	۵/۶۲	۸/۳	۶/۹	۲۷۰	۵۵۰	۱۴/۳	۱/۸	۴	.	۰/۰۱	۱۵/۱۵

Max	۱۵/۵	۱۴/۷	۷/۵	۲۹۰۰	۶۰۰/۱	۶۲۳	۴/۵	۹	۹/۹	۱/۴۶	-
Mean	۱۱/۸۶	۱۱/۴	۷/۲۲	۱۴۹۲	۳۰۱۵	۱۵۲/۷۶	۲/۹۶	۶/۰۷	۱/۷۸	۰/۴۸	-
SD	۲/۱۷	۱/۵۱	۰/۱۴	۸۶۶	۱۸۴/۵	۱۵۲/۶۹	۰/۷۵	۱/۴۸	۲/۹۸	۰/۳۹	-
Range	۹/۸۸	۶/۴	۰/۶	۲۶۳۰	۵۴۵۰	۶۰۸/۷	۲/۷	۵	۹/۹	۱/۴۵	-

۲.۳. نتایج شاخص های کیفی آب

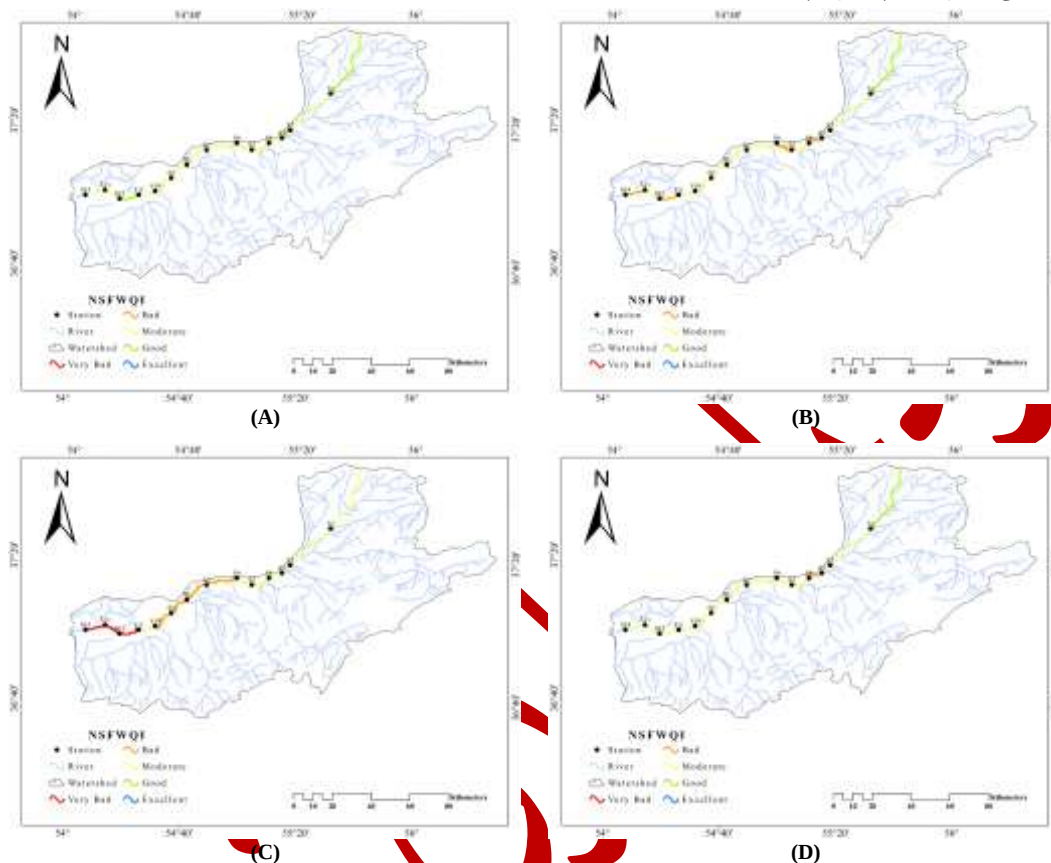
با توجه به پارامترهای اندازه گیری شده و نتایج حاصل از آزمایش ها، شاخص های کیفی محاسبه گردید و نتایج در نقشه های پهنه بندی شده GIS در عکسهای ۳ تا ۵، کیفیت آب بر اساس هر شاخص نشان داده شده است. در محاسبه شاخص CCMWQI چون محاسبات را برای یک مقطع زمانی منفرد (یک ایستگاه در یک زمان) انجام می دهیم، تعداد کل پارامترها با تعداد کل تست ها برابر است؛ در نتیجه، عامل F_1 (درصد پارامترهای دارای خطا) و عامل F_2 (درصد تست های دارای خطا) برای هر ایستگاه یکسان خواهند بود.



شکل ۳. ارزیابی زمانی-مکانی کیفیت آب بر اساس شاخص IRWQIsc؛ بهار (A)، تابستان (B)، پاییز (C) و زمستان (D)

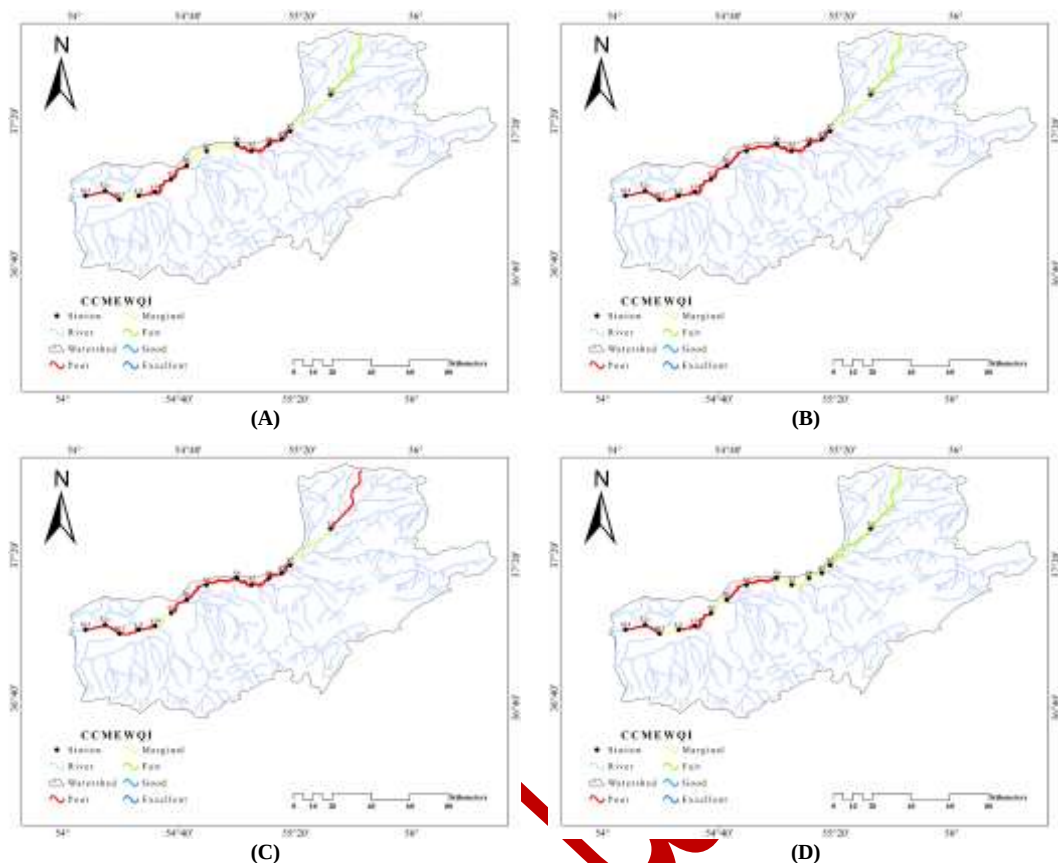
تحلیل وضعیت کیفیت آب رودخانه بر اساس شاخص کیفیت آب ایران (IRWQIsc) در چهار فصل سال نشان می دهد که در فصل بهار، در بخش بالادست حوضه و ایستگاه های اولیه (به ویژه ایستگاه S1)، به دلیل دور بودن از منابع اصلی آلاینده، کیفیت آب در وضعیت مطلوبی (کلاس های «خوب» تا «بسیار خوب») قرار دارد. با این حال، با حرکت به سمت پایین دست و ورود به مناطق مسکونی، کشاورزی و تخلیه پسماندها، کیفیت آب به تدریج افت می کند؛ به طوری که در ایستگاه های میانی و انتهایی شاهد افت کیفی به کلاس های «متوسط»، «نسبتاً بد» و در برخی مقاطع انتهایی به کلاس های «بد» و «بسیار بد» هستیم. در فصل تابستان، الگوهای کیفی تغییرات نسبی را نشان می دهند و بخش عمده ای از مسیر رودخانه در کلاس های کیفی «قابل قبول» و «متوسط» قرار می گیرد، هرچند اثرات فعالیت های انسانی و مصارف کشاورزی همچنان در نقاط مشخصی موجب افت کیفی آب می شود. با آغاز فصل پاییز و تغییر شرایط هیدرولوژیکی و اقلیمی، گستره مناطق با کیفیت نامطلوب به طور چشمگیری افزایش می یابد و بخش بزرگی از طول رودخانه از ایستگاه های میانی تا پایین دست تحت پوشش کلاس های «بد» و «نسبتاً بد» درمی آید که گویای تشدید

بارگذاری آلاینده‌ها و کاهش ظرفیت خودپالایی اکوسیستم آبی است. در نهایت، نقشه مربوط به فصل زمستان بحرانی‌ترین شرایط کیفی را به نمایش می‌گذارد؛ به‌طوری‌که تقریباً سرتاسر مسیر رودخانه از ایستگاه S2 تا انتهای حوضه (S14) در کلاس کیفی «بد» قرار می‌گیرد که این پدیده بیانگر انباشت آلاینده‌ها، کاهش شدید جریان‌های رقیق‌کننده و افت عمومی کیفیت آب در تمام طول رودخانه در این فصل است (شکل ۳).



شکل ۴. ارزیابی زمانی-مکانی کیفیت آب بر اساس شاخص NSFQI: بهار (A)، تابستان (B)، پاییز (C) و زمستان (D)

تغییرات کیفیت آب بر اساس شاخص کیفیت آب انستیتو ملی بهداشت (NSFWQI) در شکل ۴ گویای یک روند کاهشی و معنادار در طول مسیر رودخانه از بالادست به سمت پایین‌دست است، به‌طوری‌که در تمامی فصول سال، ایستگاه مرچشمه و بالادست (S1) به دلیل دوری از کانون‌های آلاینده و فعالیت‌های انسانی، وضعیت مطلوبی را حفظ کرده و در کلاس کیفی «خوب» قرار دارد. با این حال، با ورود جریان به ایستگاه‌های میانی و تحت تأثیر بارگذاری آلاینده‌های مختلف شاخص NSFQI افتی چشمگیر را تجربه می‌کند؛ به‌طوری‌که مابقی ایستگاه‌ها (S2 تا S14) عمدتاً در محدوده‌های کیفی «متوسط» و «بد» نوسان می‌کنند. بررسی ابعاد فصلی و مکانی این شاخص نشان می‌دهد که با حرکت به سمت بخش‌های انتهایی حوضه، وضعیت به‌طور پیوسته وخیم‌تر شده و شرایط در ایستگاه‌های پایانی (S11 تا S14) به‌ویژه در فصل زمستان به بحرانی‌ترین حد خود رسیده و شاخص به کلاس کیفی «بسیار بد» سقوط می‌کند. این افت شدید در فصول سرد و در مقاطع انتهایی، بیانگر انباشت آلاینده‌های آلی و بیولوژیکی، کاهش شدید ظرفیت خودپالایی و جریان‌های رقیق‌کننده، و همچنین تخلیه مداوم پساب‌های شهری و کشاورزی در طول مسیر است.



شکل ۵. ارزیابی زمانی-مکانی کیفیت آب بر اساس شاخص CCMEWQI: (A) تابستان، (B) پاییز، (C) زمستان و (D)

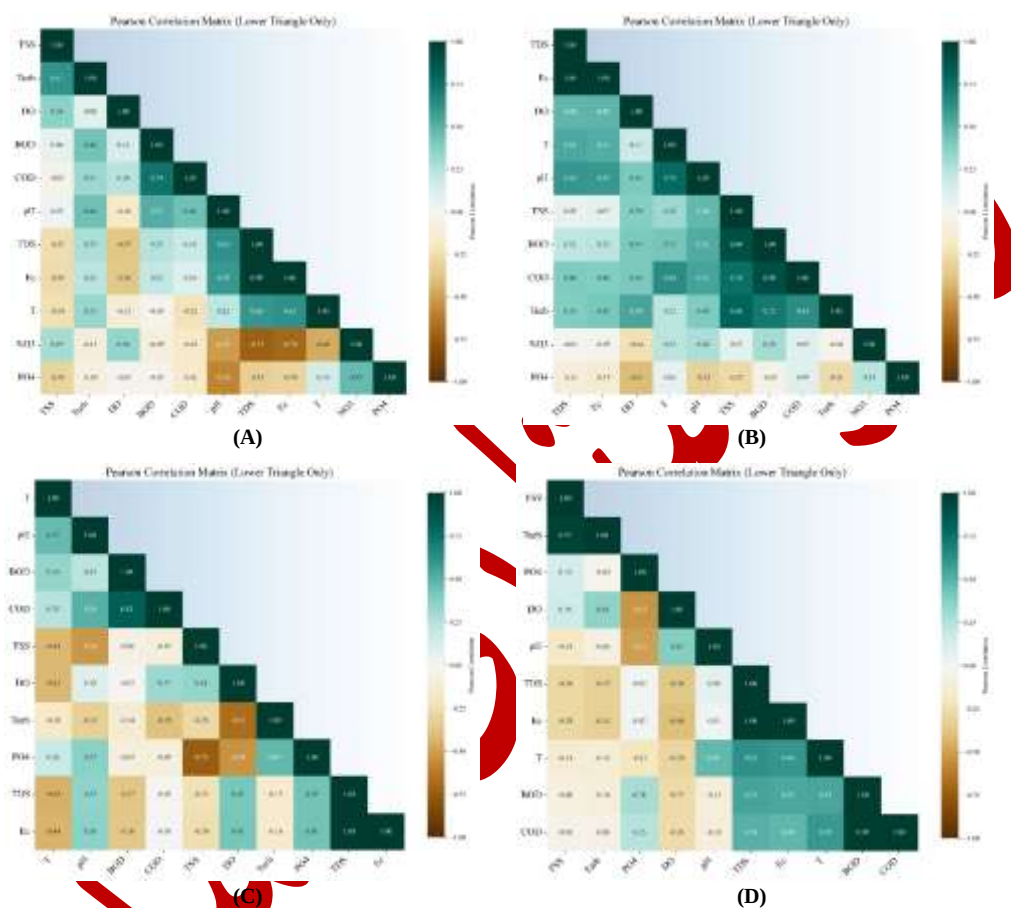
ارزیابی کیفی منابع آب رودخانه بر اساس شاخص کیفیت آب شورای وزین محیط زیست کانادا (CCMEWQI) گویای ابعاد ویژه‌ای از تغییرات کیفیت آب در طول ۱۴ ایستگاه نظارتی در چهار فصل سال است (شکل ۵). شاخص CCMEWQI به دلیل ماهیت ساختاری خود و بهره‌گیری از ضوابط حفاظتی و استانداردهای بسیار سخت‌گیرانه، تصویری بسیار دقیق، واقع‌گرایانه و در عین حال محدودکننده‌تر از میزان عدم تطابق کیفیت آب با حدود مجاز زیست‌محیطی ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج این شاخص، حتی ایستگاه سرچشمه و بالادست (S1) نیز تنها در محدوده شرایط «قابل قبول» (Fair) تا «حاشیه‌ای» (Marginal) قرار می‌گیرد. این امر نشان می‌دهد که در بخش‌های ابتدایی حوضه نیز پارامترهای ارزیابی‌شده (شامل EC، TDS، BOD₅، COD، pH، دما، کدورت، DO و مواد مغذی) تا حدودی از استانداردهای سخت‌گیرانه حفاظتی فاصله دارند. با حرکت جریان آب به سمت مناطق میانی و انتهایی حوضه و امتداد مسیر تا ایستگاه S14، وضعیت کیفی با افتی چشمگیر مواجه شده و بخش عظیمی از طول رودخانه در تمامی فصول سال در کلاس کیفی «ضعیف» (Poor) قرار می‌گیرد. استقرار مستمر و گسترده این محدوده در کلاس کیفی ضعیف، گویای بارگذاری مداوم، انباشته و فراتر از حد مجاز آلاینده‌های نیمه‌پایه و بیولوژیکی در بستر رودخانه است. این تحلیل جامع به‌خوبی نشان می‌دهد که فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی، تخلیه پساب‌ها و عوامل محیطی در سراسر حوضه، اکوسیستم آبی را از پایداری و تطابق با استانداردهای زیست‌محیطی دور کرده و ضرورت اعمال راهبردهای مدیریتی و حفاظتی دقیق‌تر را برجسته می‌سازد.

مقایسه نتایج شاخص‌های کیفی به‌دست‌آمده در ۱۴ ایستگاه پایش رودخانه گرگانود با سایر پژوهش‌های انجام‌شده در حوضه‌های آبریز شهری و کشاورزی (Bateni et al., 2023) نشان می‌دهد که وضعیت آلودگی این سیستم هیدرولوژیکی با چالش‌های مشابهی در مناطق نیمه‌خشک مواجه است. به عنوان مثال، میانگین شاخص IRWQIsc در فصول گرم در این مطالعه (که در بازه کیفیت متوسط تا ضعیف قرار گرفت) با مطالعات صورت‌گرفته روی رودخانه‌های مشابه در فلات مرکزی ایران همخوانی دارد. همچنین، مقایسه با مطالعات بین‌المللی در حوضه‌های با تعداد ایستگاه‌های مشابه (۱۰ تا ۲۰ ایستگاه) و طیف پارامترهای مشابه (Goodarzi

(et al., 2023)، بیانگر آن است که مقدار بارگذاری مواد مغذی و افت اکسیژن محلول در گرگانرود به دلیل فعالیت‌های متمرکز کشاورزی و تخلیه پساب، در بالاترین سطوح هشدار در مقایسه با نمونه‌های منطقه‌ای مشابه قرار دارد

۳.۳. تحلیل آماری

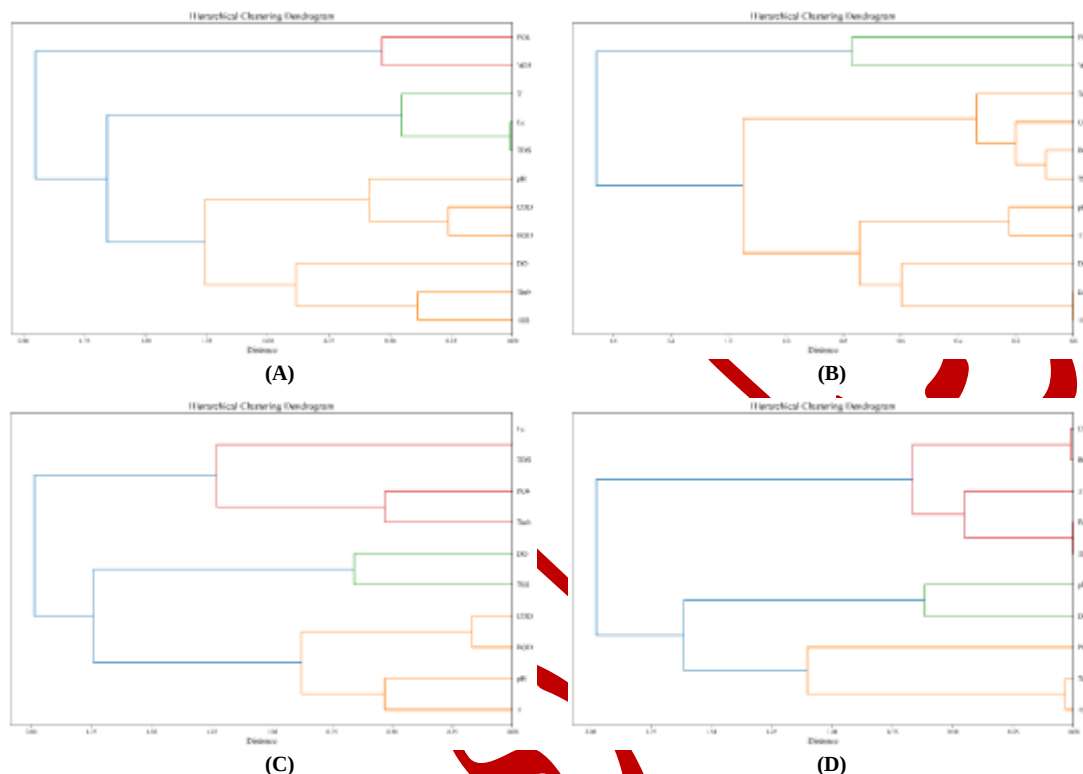
به منظور کشف روابط پنهان، ساختار داده‌های فیزیکوشیمیایی و شناسایی منابع آلودگی در طول رودخانه گرگانرود، تحلیل‌های آماری چندمتغیره شامل ماتریس همبستگی پیرسون، تحلیل خوشه‌ای (HCA) و تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به تفکیک فصول مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل‌های ۶ تا ۸).



شکل ۶. ماتریس‌های همبستگی پیرسون فصلی پارامترهای کیفیت آب: بهار (A)، تابستان (B)، پاییز (C) و زمستان (D)

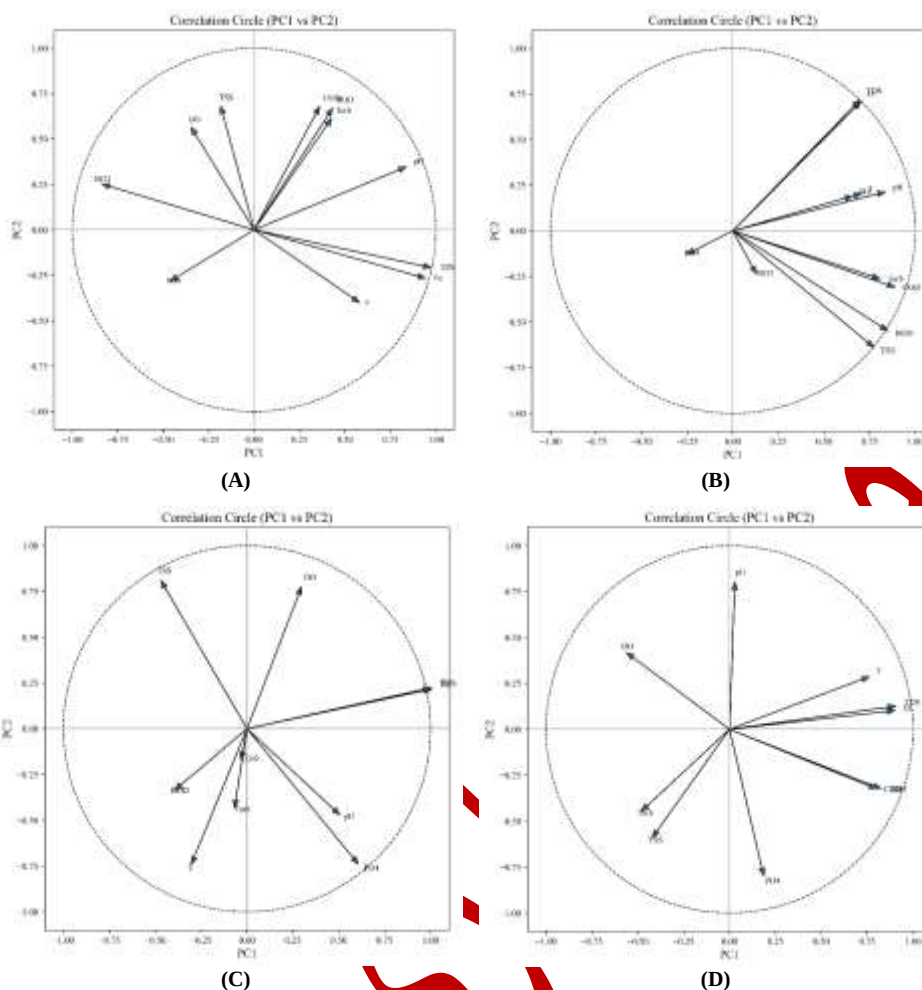
ماتریس همبستگی پیرسون (شکل ۶) به تفکیک فصول مختلف سال، ابعاد دقیق و روابط خطی میان پارامترهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی رودخانه گرگانرود را به نمایش می‌گذارد. در تمامی فصول سال، همبستگی میان هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد محلول (TDS) به صورت پایدار و نزدیک به سطح کامل (تقریباً معادل ۱,۰۰) ثبت شده است که این امر حاکی از فرآیندهای انحلال املاح معدنی، پایداری ترکیب یونی و غلبه عوامل زمین‌ساختی و هیدرودینامیکی طبیعی را در بستر حوضه تأیید می‌کند. از سوی دیگر، بررسی بار آلودگی ارگانیک نشان می‌دهد که همبستگی بسیار قوی و مثبتی میان تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن (BOD_5) و تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) در تمامی فصول با ضرایب همبستگی بالا (در محدوده ۰,۷۴ تا ۰,۹۹) برقرار است؛ این همبستگی گویای منشأ واحد، متمرکز و همگن پساب‌های ورودی اعم از منابع شهری، صنعتی و کشاورزی به طول مسیر رودخانه است. علاوه بر این، ارتباط خطی معنادار میان مواد معلق کل (TSS) و کدورت (Turbidity)، به‌ویژه در فصول پربارش سال، نقش مستقیم رواناب‌های سطحی، شستشوی خاک حوضه آبخیز و فرسایش را در افت کیفیت فیزیکی آب به تصویر می‌کشد. در این میان، نوسانات سایر پارامترها نظیر مواد مغذی (NO_3^- و PO_4^{3-}) و اکسیژن محلول (DO) در فصول گوناگون، تغییرات

فصلی در میزان فعالیت‌های زیستی و ورود منابع آلودگی غیرنقطه‌ای را بازتاب می‌دهد که به همراه همبستگی‌های یادشده، ساختار جامع و چندبعدی کیفیت آب گرگان‌رود را تبیین می‌کند.



شکل ۷. دندروگرام‌های تحلیل خوشه‌ای سلسله‌مراتبی (HCA) فصلی کیفیت آب؛ بهار (A)، تابستان (B)، پاییز (C) و زمستان (D)

بررسی دندروگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای (HCA - شکل ۷) ابعاد عمیق‌تری از ساختار روابط و الگوهای شباهت میان سنجه‌های کیفی آب رودخانه گرگان‌رود را نمایان می‌سازد. بررسی شاخه‌های این نمودار درختی نشان می‌دهد که پارامترهای فیزیکوشیمیایی و بیولوژیکی در سطوح مختلف ضریب فاصله و میزان شباهت، در خوشه‌های کاملاً متمایز دسته‌بندی می‌شوند. به طوری که در بخش نخست، پارامترهای مرتبط با شوری و املاح محلول از جمله هدایت الکتریکی (EC) و کل مواد محلول (TDS) در پایین‌ترین سطح فاصله و بالاترین میزان شباهت به یکدیگر پیوند می‌خورند؛ این پیوند مستحکم بیانگر تسلط فرایندهای طبیعی انحلال مواد معدنی سازندهای زمین‌شناسی بستر حوضه و هوازگی سنگ‌ها است. در شاخه‌ای دیگر، پارامترهای کلیدی آریایی آلودگی نظیر تقاضای بیوشیمیایی اکسیژن (BOD_5)، تقاضای شیمیایی اکسیژن (COD) و مواد مغذی در کنار یکدیگر خوشه‌بندی می‌شوند که نزدیکی فاصله اتصال آن‌ها گویای ماهیت همگن و منشاء واحد پساب‌های ورودی ناشی از فعالیت‌های شهری، صنعتی و کشاورزی در طول مسیر ایستگاه‌های پایش است. علاوه بر این، مواد معلق کل (TSS) و کدورت نیز زیرخوشه مجزایی را تشکیل می‌دهند که این امر وابستگی شدید این سنجه‌ها را به عوامل دینامیکی حوضه نظیر شدت جریان آب و رواناب‌های سطحی بازتاب می‌دهد. در مجموع، ساختار تفکیک‌شده در دندروگرام HCA به خوبی تأیید می‌کند که کیفیت آب گرگان‌رود تحت تأثیر دو طیف کاملاً مجزا از عوامل شامل پدیده‌های طبیعی و زمین‌ساختی از یک سو و بارهای آلودگی ناشی از فعالیت‌های انسانی از سوی دیگر قرار دارد.



شکل ۸. دایره همبستگی (PC1 در مقابل PC2) فصلی کیفیت آب: بهار (A)، تابستان (B)، پاییز (C) و زمستان (D)

شکل ۸ دایره همبستگی حاصل از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)، ساختار چندمتغیره و روابط میان پارامترهای کیفی آب رودخانه گرگان‌رود را به تصویر می‌کشد. بر اساس طول بردارها، پارامترهای EC، TDS، BOD₅ و COD بیشترین کیفیت تبیین و نقش را در واریانس داده‌ها دارند. بررسی زاویه میان بردارها حاکی از هم‌راستایی و همبستگی شدید میان EC و TDS (نشان‌گر فرایندهای ژئوشیمیایی و انحلال املاح) و همچنین BOD₅ و COD (نشان‌گر منشاء واحد پساب‌های ارگانیکی) است؛ در حالی که زوایای منفرجه میان سایر شاخص‌ها استقلال مکانیزم‌های طبیعی و انسانی را تایید می‌کند. استقرار پارامترها در محورهای مختصات، ساختار دو عاملی حوضه را عیان می‌سازد: محور افقی (PC1) نمایانگر عامل «زمین‌زاد و ژئوشیمیایی» و محور عمودی (PC2) نماینده عامل «آنتروپوژنیک و انسانی» است که هماهنگی کاملی با نتایج ماتریس پیرسون و تحلیل خوشه‌ای (HCA) دارد.

۴. نتیجه‌گیری

ارزیابی مکانی و زمانی کیفیت آب رودخانه گرگان‌رود نشان داد که این حوضه به‌شدت تحت تأثیر فعالیت‌های آنتروپوژنیک، شامل ورود پساب‌های شهری و رواناب‌های کشاورزی حاوی کود و سموم قرار دارد. مقادیر شاخص‌های کیفی حاکی از افت قابل‌توجه کیفیت آب، به‌ویژه در بخش‌های پایین‌دست و فصول گرم سال است. بر این اساس، مدیریت پایدار منابع آب در این حوضه نیازمند یک رویکرد جامع‌نگر است که فراتر از راهکارهای صرفاً مهندسی عمل کند. راهبردهای کلیدی برای بهبود شرایط که شامل کنترل منابع نقطه‌ای از طریق توسعه و ارتقای تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهری (نظیر گنبد کاووس)، مهار منابع غیرنقطه‌ای با ترویج کشاورزی پایدار، مدیریت مصرف سموم و ایجاد نوارهای حفاظتی گیاهی و ابعاد اجتماعی و اقتصادی شامل بسته‌های تشویقی

دولتی و افزایش آگاهی و مشارکت جوامع محلی است تا پایداری بلندمدت اکوسیستم رودخانه تضمین گردد. همچنین، بررسی مکانی منابع آلاینده نشان داد که افت کیفیت آب در بازه‌های پایین‌دست حوضه کاملاً هم‌راستا با بارگذاری پساب‌های شهری، صنعتی و اراضی کشاورزی است که این تطابق، اعتبار خروجی ارزیابی‌های چندشاخصه و تحلیل‌های آماری را تأیید می‌نماید.

۵. تأمین مالی

این پژوهش هیچ‌گونه کمک مالی از سوی سازمان‌های دولتی، تجاری یا غیرانتفاعی دریافت نکرده است. تمامی هزینه‌های مربوط به نمونه‌برداری‌های میدانی، تحلیل‌های آزمایشگاهی و پردازش داده‌ها به طور کامل توسط نویسندگان تأمین شده است.

۶. منابع

- Akoteyon, I. S., Soladoye, O., & Adekola, A. (2023). Assessment of surface water quality using National Sanitation Foundation Water Quality Index and multivariate statistical approaches in tropical river basins. *Environmental Earth Sciences*, 82(14), Article 342.
- Bateni, M., et al. (2023). Spatial and temporal assessment of water quality using advanced environmental monitoring indices. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 11265.
- Batugedara, I., & Senanayake, I. (2024). Application of CCME Water Quality Index for Drinking Water Quality Assessment along Kalu Ganga, Sri Lanka. *Science & Technology Asia*, 29(1), 239-255.
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index—do we dare? *Water and Sewage Works*, 117(10), 339-343.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME). (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0, Technical Report*. Winnipeg, MB.
- Chapman, D. (Ed.). (2023). *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. CRC Press.
- Doua, M., et al. (2022). Environmental risk assessment and water quality evaluation in semi-arid regions under agricultural and urban pressures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(14), 20450-20465.
- Goodarzi, M. R., Niknam, A. R. R., Barzkar, A., Niazkar, M., Zare Mehrjerdi, Y., Abedi, M. J., & Heydari Pour, M. (2023). Water Quality Index Estimations Using Machine Learning Algorithms: A Case Study of Yazd-Ardakan Plain, Iran. *Water*, 15(10), 1876. <https://doi.org/10.3390/w15101876>
- Goodarzi, M.R., Niknam, A.R.R., Rahmati, S.H. et al. Evaluation of the effects of climate change and pollution discharge scenario on the quality of Dez River using the QUAL2Kw model. *Environ Earth Sci* **82**, 479 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11175-9>
- Ebrahimi, M., et al. (2024). "Evaluating quantitative and qualitative pressures on riverine ecosystems under global and regional environmental changes." *Water Research*, 250, 121045.
- Heidari, A., et al. (2024). Multivariate statistical modeling of water quality data to enhance management reliability in regional river basins. *Journal of Hydroinformatics*, 26(1), 145-162.
- Helisa, M., et al. (2021). Hydrogeochemical assessment and multivariate analysis of surface water quality in agricultural watersheds. *Water Research*, 190, 116712.
- Kadir, A., et al. (2024). Spatial variation and source identification of heavy metals in river ecosystems using cluster analysis and PCA. *Chemosphere*, 345, 140412.
- Karbassi, A. R., et al. (2020). Application of the Iranian Water Quality Index for Rivers (IRWQISc) in assessing surface water pollution and ecological health. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(4), 215-228.
- Karimi, H., & Zolfagharzadeh, M. (2023). Assessment of heavy metal pollution and eutrophication in northern Iran rivers due to anthropogenic and agricultural point sources. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 3421-3435.
- Khan, H. (2025). Water Quality Indices, their uses in water resources, benefits, and limitations: a three decadal analysis. *Water Quality Research Journal*, wqrj2025002.
- Kuznietsov, V., et al. (2025). A study of surface water quality using organic pollution indices: Comparative characteristics and educational opportunities. *Water Quality Research Journal*, 60(2), 333-350.
- Lata, S., Sharma, P., & Kumar, A. (2023). Comprehensive assessment of river water quality using CCME WQI and multivariate statistical techniques in semi-arid river basins. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(18), 52310-52325.
- Mateo-Sagasta, J., Zoumides, C., & Burke, J. (2023). Water resources management and sustainable development: Addressing agricultural pollution hotspots. *Journal of Environmental Management*, 328, 116982.
- Moradi, H., et al. (2024). Multivariate statistical approaches for water quality monitoring and identification of critical pollution zones in river basins. *Environmental Earth Sciences*, 83(5), 140.

Mousavi, S. M., et al. (2023). Spatial and temporal variations of water quality in the Gorganrud River basin, northern Iran: Assessment of anthropogenic impacts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(4), 512.

Nazari, M., et al. (2020). *Weight for each parameter in the IRWQISC index* [Data file and figure]. ResearchGate.

Papp, Z., et al. (2025). Integrated Assessment of Groundwater Quality Using Water Quality Indices, Geospatial Analysis, and Neural Networks in a Rural Hungarian Settlement. *Water*, 17(16), 2371.

Papp, Z., et al. (2025). Integrated water quality assessment using water quality indices, geostatistical analysis, and machine learning in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 910, 168450.

Rahnama, S. J., et al. (2026). Seasonal assessment of physical, chemical and microbial water quality of Gorganrud River using IRWQISC index. *Journal of Environmental Sciences Studies*.

Rezaei, A., et al. (2022). Hydrogeochemical evaluation and factor analysis of water resources using Pearson correlation matrix under anthropogenic and climatic influences. *Applied Water Science*, 12(4), 85.

Saffari, M., et al. (2025). Water quality assessment using IRWQISC and NSFQI water quality indicators; A case study: Talar River (Iran). *Heliyon*, 11(2), e41812.

Sarkar, B., & Islam, A. (2021). Assessing the suitability of groundwater for irrigation in the light of natural forcing and anthropogenic influx: A study in the Gangetic West Bengal, India. *Environmental Earth Sciences*, 80(24), 1–19.

Singh, A., Kumar, M., & Das, S. (2023). "Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater using multivariate statistical techniques." *Environmental Science and Pollution Research*, 30(12), 34500–34515.

Soltani, M., & Ahmadi, B. (2023). Climate change impacts on river flow regime and self-purification capacity: Implications for water quality management in northern Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 48, 101452.

Swain, L. G. (2024). The evolution of the Canadian (CCME) Water Quality Index. *Water Quality Research Journal*, 59(4), 342–346.

Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index (WQI) and its use as an indicator in water quality assessment. *Ecological Indicators*, 122, 107235.

Varis, O., et al. (2023). Global freshwater resources, water security, and sustainable development: Challenges and prospects for the coming decades. *Global Environmental Change*, 80, 102678.

Wang, Y., et al. (2023). Spatiotemporal variations and source apportionment of surface water pollution based on PCA and cluster analysis. *Environmental Pollution*, 321, 121115.

Zare, M., et al. (2022). Revised Iranian Water Quality Index (RIWQI): a tool for the assessment and management of water quality in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6), 415.