

## Spatiotemporal analysis of water quality and identification of pollution hotspots in the Sirvan River basin using the Inverse Distance Weighting (IDW) method

H. Nasrollahzadeh Saravi<sup>1</sup>, M. Khoshnamvand<sup>2\*</sup>, B. Rahnama<sup>3</sup>, A.A. Fazel<sup>4</sup>, M. Balouei<sup>5</sup>, E. Hajiradkouchak<sup>6</sup> and T. Eskandari<sup>7</sup>

### Extended Abstract

#### Introduction:

Water quality plays a crucial role in sustaining aquatic ecosystems, human health, and socio-economic development. River ecosystems are particularly vulnerable to anthropogenic pressures such as urbanization, agricultural runoff, and industrial discharges, which disrupt their physicochemical balance and ecological integrity. Monitoring key water quality parameters—such as Biological Oxygen Demand (BOD), Chemical Oxygen Demand (COD), Total Nitrogen (TN), Total Phosphorus (TP), Total Suspended Solids (TSS), and pH—is essential for assessing the health of river systems. Seasonal variations, especially between dry and wet periods, can significantly influence pollutant concentrations due to changes in river discharge, dilution, and runoff intensity. In regions like Kurdistan Province, Iran, where rivers such as Gheslagh and Gaveroud converge into the Sirvan River, the combined impacts of municipal effluents and agricultural return flows pose serious environmental challenges. This study aims to evaluate the spatial and temporal variations of major physicochemical parameters using the Inverse Distance Weighting (IDW) method within a GIS environment to identify pollution hotspots and provide insights for sustainable watershed management.

#### Materials and Methods:

Water samples were collected at six selected stations along the Gheslagh and Gaveroud tributaries and the main Sirvan River during two contrasting seasons—summer (low flow) and winter (high flow) of 2024. Station 1, located downstream of Gheslagh Dam, served as a reference site with minimal anthropogenic influence, while stations 2–4 were situated upstream and downstream of the Sanandaj wastewater treatment plant to assess the effects of effluent discharge. Station 5 represented the Gavehroud tributary with relatively low pollution, and station 6 was located at the Sirvan outlet near Zhavveh Dam. Three replicate samples were collected per site at a depth of 20–30 cm using pre-cleaned polyethylene bottles, transported on ice at 4°C, and analyzed according to APHA (2017) and WHO (2017) standards. BOD was determined using the five-day incubation method at 20°C, COD by the dichromate oxidation method, TN through persulfate digestion followed by spectrophotometric detection, TP via ammonium molybdate–ascorbic acid reaction, and TSS by gravimetric filtration through 0.42 µm glass-fiber filters. pH was measured in situ using a calibrated WTW portable meter. Spatial interpolation of the measured parameters was conducted using the IDW technique in ArcGIS 10.8, with a power parameter of 2, a search radius including 8–12 neighboring points, and a raster cell

1- Professor, Department of Ecology, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

2- Assistant Professor, Department of Ecology, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

3- Assistant Professor, Department of Ecology, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

4 - Assistant Professor, Inland Waters Aquatics Resources Research Center, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.

5 - PhD student, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

6 - PhD, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

7 - PhD, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.

\*Corresponding Author: [m.khoshnamvand@areeo.ac.ir](mailto:m.khoshnamvand@areeo.ac.ir)

Received: 2025/10/09

Accepted: 2025/11/04

size of 30 m. This method assigns weights inversely proportional to the distance between sampled and unsampled locations, enabling the continuous prediction across the study area.

## Results and Discussions:

The spatial maps derived from the IDW model revealed distinct seasonal trends in water quality. During summer, BOD exceeded 6 mg/L near stations 2 and 3, indicating the impact of untreated municipal effluents from the Sanandaj wastewater treatment plant. In contrast, the Gaveroud tributary (station 5) exhibited the lowest BOD values. COD values surpassed 25 mg/L in summer and increased to over 50 mg/L in winter, likely due to enhanced surface runoff carrying refractory organic compounds. The lower BOD/COD ratio in winter confirmed the dominance of non-biodegradable organic matter. The persistently high TN values in both seasons indicated sustained nutrient loading from domestic sewage and agricultural fertilizers. TP levels in summer exceeded 3 mg/L at stations 3 and 4—several orders above global thresholds for eutrophication (0.05 mg/L)—and showed a slight decline. This sustained phosphorus enrichment represents a critical eutrophication risk to downstream reservoirs such as Zhavveh Dam. TSS concentrations reached up to 80 mg/L in summer but decreased to 20–60 mg/L in winter due to dilution. Elevated suspended solids reduced water transparency and may impair photosynthetic activity and fish habitats. The pH values remained stable (7.6–8.2) across stations and seasons, staying within the safe range for aquatic life. Overall, spatial interpolation using IDW effectively delineated pollution gradients, particularly downstream of the wastewater discharge, confirming the method's reliability in riverine water quality assessment.

## Conclusion:

This study demonstrated that the Gheshlagh, Gaveroud, and Sirvan River systems are significantly influenced by municipal wastewater and agricultural runoff, particularly during the dry season. The marked increases in BOD, COD, TN, and TP in summer indicate intensified organic and nutrient pollution, leading to potential eutrophication and ecological degradation. Although winter flows partially dilute pollutants, persistent pollutant loads remain a serious concern. The application of the IDW interpolation method in GIS effectively visualized spatial pollution patterns and identified critical hotspots, supporting its use as a practical tool for environmental monitoring and watershed management. To safeguard the ecological integrity of these rivers, stricter wastewater control measures, improved treatment plant efficiency, and the adoption of sustainable agricultural practices are urgently recommended.

**Keywords:** Agricultural runoff, Eutrophication, Inverse Distance Weighting, Physicochemical parameters, Wastewater treatment plant

**Citation:** Nasrollahzadeh Saravi, H., Khoshnamvand, M., Rahnama, B., Fazel, A.A., Balouei, M., Hajiradkouchak, E., Eskandari, T., 2025. Spatiotemporal analysis of water quality and identification of pollution hotspots in the Sirvan River basin using the Inverse Distance Weighting (IDW) method. *Iranian Water Research Journal*. 19(59). pp: 103-114. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15478.2720>

## Copyright:

© Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/> ).



## تحلیل مکانی-زمانی کیفیت آب و شناسایی مناطق بحرانی آلودگی در حوضه رودخانه سیروان با

### استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس

حسن نصراله‌زاده ساروی<sup>۱</sup>؛ مهدی خوشناموند<sup>۲\*</sup>؛ بهزاد رهنما<sup>۳</sup>؛ عبدالعظیم فاضل<sup>۴</sup>؛ مهدیه بالوئی<sup>۵</sup>؛ عیسی حاجی

رادکوچک<sup>۶</sup> و طاهره اسکندری<sup>۷</sup>

### چکیده

این پژوهش با هدف مطالعه و تحلیل مکانی-زمانی خصوصیات فیزیکوشیمیایی و شناسایی مناطق آلوده آب حوضه آبریز رودخانه سیروان و شاخه‌های فرعی آن شامل قشلاق و گاوه‌رود در استان کردستان انجام شد. به این منظور، در دو فصل تابستان و زمستان سال ۱۴۰۳ از شش ایستگاه منتخب، نمونه‌برداری صورت گرفت و پارامترهای اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، نیتروژن کل (TN)، فسفر کل (TP)، مواد معلق کل (TSS) و pH اندازه‌گیری شد. داده‌ها با کمک روش درون‌یابی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting, IDW) در محیط GIS نقشه‌سازی شدند. نتایج نشان داد که در فصل تابستان غلظت پارامترهای آلودگی به‌ویژه در پایین‌دست ایستگاه‌های مرتبط با ورود تصفیه‌خانه فاضلاب شهری افزایش یافته است. بیشینه BOD و COD در نزدیکی خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب شهری مشاهده شد که نشان‌دهنده بار بالای ترکیبات آلی و غیرقابل تجزیه بود. همچنین غلظت TN و TP در ایستگاه‌های پایین دست تصفیه‌خانه فاضلاب به مقادیر بالاتر از استانداردهای جهانی رسید و پتانسیل بالای پر غذایی (Eutrophication) را نشان داد. در مقابل، در زمستان به دلیل افزایش دبی و پدیده رقیق‌سازی، مقادیر TSS کاهش یافت و توزیع مکانی BOD و TSS هم‌یکنواخت‌تر شد، هرچند COD و TN همچنان در سطح نسبتاً بالایی باقی ماندند. تغییرات pH در هر دو فصل اندک و در محدوده قابل قبول برای حیات آبریان قرار داشت. به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که کیفیت آب حوضه آبریز مورد مطالعه، تحت تأثیر ورود پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری و رواناب‌های کشاورزی قرار دارد و تغییرات فصلی هم در کنترل شدت آلودگی نقش مهمی ایفا می‌کند. استفاده از روش IDW در این پژوهش توانست با دقت مناسب الگوهای مکانی آلودگی را آشکار ساخته و اطلاعات مفیدی برای مدیریت پایدار منابع آب سطحی منطقه فراهم آورد.

**واژه‌های کلیدی:** خصوصیات فیزیکوشیمیایی، درون‌یابی فاصله معکوس، رودخانه سیروان، قشلاق، گاوه‌رود

**ارجاع:** نصراله‌زاده ساروی، ح. خوشناموند، م. رهنما، ب. فاضل، ع.ا. بالوئی، م. حاجی رادکوچک، ع. اسکندری، ط. ۱۴۰۴. تحلیل مکانی-زمانی کیفیت آب و شناسایی مناطق بحرانی آلودگی در حوضه رودخانه سیروان با استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹ (۵۹): صص: ۱۰۳-۱۱۴. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2025.15478.2720>

- ۱- استاد، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۲- استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۳- استادیار، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۴- استادیار، مرکز تحقیقات ذخایر آب‌های داخلی، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
- ۵- دانشجوی دکتری، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۶- دکتری، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
- ۷- دکتری، گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.

\* نویسنده مسئول: [m.khoshtamvand@areeo.ac.ir](mailto:m.khoshtamvand@areeo.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۷

## مقدمه

آب یکی از اساسی‌ترین نیازهای حیات و عامل اصلی پایداری اکوسیستم‌های طبیعی و انسانی است. منابع آب سطحی، به‌ویژه رودخانه‌ها، علاوه بر نقش حیاتی در تأمین آب شرب و کشاورزی، زیستگاه‌هایی ارزشمند برای گونه‌های مختلف گیاهی و جانوری محسوب می‌شوند (Smith et al., 2006; Moghimi Nezaad et al., 2018). با این حال، رشد روزافزون جمعیت، توسعه شهری و صنعتی و افزایش فعالیت‌های کشاورزی منجر به وارد شدن انواع آلاینده‌ها به این منابع شده است که تهدیدی جدی برای سلامت انسان و پایداری اکوسیستم‌های آبی به شمار می‌روند (Guildford and Hecky, 2000; UNESCO, 2020; Saleh et al., 2025). کیفیت آب رودخانه‌ها نه تنها بر اکوسیستم‌های محلی تأثیر می‌گذارد، بلکه اثرات اجتماعی و اقتصادی گسترده‌ای از جمله، کاهش قابلیت استفاده از منابع آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی را نیز به همراه دارد.

برای پایش و ارزیابی کیفیت آب، شاخص‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها پارامترهای فیزیکی-شیمیایی جایگاه ویژه‌ای دارند. اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) به‌عنوان شاخصی از بار مواد آلی قابل تجزیه زیستی در آب شناخته می‌شود. مقادیر بالای BOD نشان‌دهنده ورود پساب‌های شهری و کشاورزی غنی از مواد آلی است که منجر به کاهش اکسیژن محلول و تهدید حیات آبریان می‌گردد (APHA, 2017). اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) بیانگر کل مواد آلی موجود در آب است و معمولاً مقادیر آن بالاتر از BOD گزارش می‌شود. افزایش COD می‌تواند نشان‌دهنده حضور آلاینده‌های غیرقابل تجزیه زیستی همچون ترکیبات صنعتی باشد (Li and Heap, 2014). شاخص‌های تغذیه‌ای همچون نیتروژن کل (TN) و فسفر کل (TP) اهمیت زیادی در بررسی پدیده پر غذایی دارند، همچنین ورود مقادیر بالای نیتروژن و فسفر به رودخانه‌ها از طریق رواناب کشاورزی و فاضلاب شهری سبب رشد بیش از حد جلبک‌ها و در نهایت کاهش کیفیت زیست‌محیطی و اقتصادی منابع آب می‌شود (Smith et al., 2006). مواد معلق کل (TSS) شاخصی برای اندازه‌گیری کدورت و شفافیت آب است و ارتباط مستقیمی با فرسایش بستر و کناره‌های رودخانه دارد. افزایش TSS علاوه بر کاهش کیفیت زیباشناختی آب، انتقال آلاینده‌های فلزی و آلی را نیز تسهیل می‌کند (Wang et al., 2021).

نهایت، pH شاخصی کلیدی برای تعیین اسیدیته یا قللیت آب است که بر فرآیندهای شیمیایی و زیستی در محیط‌های آبی اثر مستقیم دارد (APHA, 2017).

یکی از عوامل تعیین‌کننده کیفیت آب رودخانه‌ها، تغییرات فصلی است. در فصل تابستان که دبی جریان کاهش می‌یابد، غلظت آلاینده‌ها می‌تواند افزایش پیدا کند و شاخص‌هایی مانند BOD و COD مقادیر بالاتری را نشان می‌دهند. در مقابل، در زمستان با افزایش بارش و رواناب، می‌توان انتظار افزایش دبی رودخانه‌ها و در نتیجه رقیق‌سازی طبیعی غلظت آلاینده‌ها را داشت (Ali et al., 2021; Moghimi Nezaad et al., 2025). از همین رو، بررسی این تغییرات فصلی برای مدیریت منابع آب و تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه‌ها ضروری است.

با توجه به محدودیت‌های زمانی و مالی، نمونه‌برداری از همه نقاط یک رودخانه امکان‌پذیر نیست. از این رو، روش‌های درون‌یابی مکانی برای تخمین و نمایش پیوسته تغییرات کیفی آب توسعه یافته‌اند. روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW) یکی از رایج‌ترین روش‌ها در این زمینه است. این روش بر پایه اصل وزن‌دهی معکوس فاصله عمل می‌کند و هرچه فاصله نقطه نمونه‌برداری از نقطه مورد برآورد بیشتر باشد، وزن آن کمتر در نظر گرفته می‌شود (Li and Heap, 2014). مطالعات نشان داده‌اند که IDW در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تر مانند کریجینگ (Kriging)، برای داده‌های محیطی با نمونه‌برداری محدود، دقت بالاتری دارد و نقشه‌های قابل اعتمادتری ارائه می‌دهد (Sajid et al., 2013).

رودخانه سیروان در استان کردستان از منابع مهم آب سطحی منطقه به شمار می‌رود (شکل ۱). این رودخانه علاوه بر نقش حیاتی در تأمین آب کشاورزی، تأثیر زیادی بر پایداری اکوسیستم‌های محلی دارد. ورود پساب شهر سنندج، پساب تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج و رواناب‌های کشاورزی از مهم‌ترین تهدیدهای کیفیت آب این رودخانه محسوب می‌شوند. در کنار آن، وجود شاخه گاوهرود به‌عنوان جریان انحرافی با بار آلودگی کمتر، فرصتی برای بررسی نقش رقیق‌سازی طبیعی فراهم می‌سازد. با وجود اهمیت بالای این منابع، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات مکانی و فصلی پارامترهای BOD، COD، TN، TP، TSS و pH در حوضه آبریز رودخانه سیروان و شاخه‌های فرعی آن شامل قشلاق و گاوهرود با استفاده از روش IDW در محیط GIS طراحی و اجرا شد. این پژوهش

نمونه‌ها در یخدان با دمای ۴ درجه سلسیوس قرار گرفتند و به آزمایشگاه منتقل شدند (APHA, 2017).

در آزمایشگاه پارامترهای BOD, COD, TN, TP, TSS و pH بر اساس استانداردهای (2017) APHA و WHO (2017) اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری BOD، روش آنکوباسیون پنج‌روزه در دمای ثابت ۲۰ درجه سلسیوس در شرایط تاریکی کامل به کار رفت و کاهش اکسیژن محلول توسط دستگاه DO متر ثبت شد. COD با روش دی‌کرومات پتاسیم تعیین گردید؛ بدین‌صورت که نمونه‌ها در حضور دی‌کرومات پتاسیم و سولفات نقره به‌عنوان کاتالیزور در بلوک هاضم با دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس به مدت دو ساعت هضم شدند و پس از خنک‌سازی، تیتراسیون با فروس آمونیوم سولفات انجام گرفت. نیتروژن کل به روش پرسولفات (اکسیدکننده) و با استفاده از اسپکتروفتومتر مرئی-فرابنفش (Cintra 1010) اندازه‌گیری شد. در این روش، نمونه‌ها ابتدا تحت هضم اسیدی قرار گرفته و کلیه ترکیبات نیتروژنی به نیترات تبدیل شدند. برای اندازه‌گیری فسفر کل، نمونه‌ها با پرسولفات پتاسیم هضم شده و سپس معرف مولیبدات آمونیوم و اسید آسکوربیک به آن‌ها افزوده شد و شدت رنگ آبی حاصل در طول موج ۸۸۰ نانومتر UV-Vis (Cintra 1010) سنجیده شد. مقدار مواد معلق کل با فیلتراسیون حجم معینی از نمونه‌ها از فیلتر فیبر شیشه‌ای ۰/۴۲ میکرون از پیش توزین‌شده و خشک‌کردن آن‌ها در ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد و در نهایت محاسبه اختلاف وزن قبل و بعد از فیلتراسیون تعیین گردید. اندازه‌گیری pH نیز با دستگاه pH متر پرتابل (WTW 320) انجام شد.

#### روش درون‌یابی فاصله معکوس برای نقشه‌سازی تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب

روش درون‌یابی فاصله معکوس یکی از معروف‌ترین روش‌های درون‌یابی در دنیا می‌باشد. از این روش برای تخمین مقدار یک سطح پیوسته (Continuous) در مکان‌های نمونه‌برداری نشده براساس مقادیر نقاط نمونه اطراف استفاده می‌شود. اساس این روش براساس فاصله است. به این معنی که نمونه‌هایی که فاصله نزدیک‌تر دارند ارزش و تاثیر بیشتری باید دارند. IDW با تخصیص وزن به هر نقطه نمونه براساس فاصله آن تا محل مورد نظر کار می‌کند و وزن نهایی براساس فاصله نقاط اطراف و مقدار وزن نیز براساس فاصله خواهد بود. اساس IDW این است که نقاط نمونه نزدیک‌تر باید تأثیر بیشتری بر تخمین نسبت به نقاط نمونه دورتر داشته باشند. وزن تخصیص داده شده به هر نقطه نمونه متناسب با فاصله معکوس بین نقطه نمونه و محل هدف است. IDW یک روش

برای نخستین بار تحلیل مکانی-زمانی کیفیت آب رودخانه سیروان و سرشاخه‌های آن را با استفاده از روش IDW انجام داده و اثرات هم‌زمان پساب شهری، رواناب کشاورزی و جریان رقیق‌کننده شاخه گاوهرود را در مقیاس حوضه‌ای ارزیابی کرده است. استخراج نقشه‌های مناطق بحرانی آلودگی یکی از جنبه‌های کاربردی این تحقیق محسوب می‌شود.

#### مواد و روش‌ها

##### حوضه آبریز مورد مطالعه

رودخانه قشلاق در استان کردستان در شمال‌شرقی شهر سنندج واقع شده و پس از عبور از سد قشلاق، وارد محدوده شهری می‌شود. این رودخانه سپس در پایین دست با شاخه گاوهرود ترکیب شده و در نهایت تشکیل رودخانه سیروان را داده و به سد ژاوه می‌ریزد (شکل ۱). اهمیت این حوضه آبریز برای کاربرد در کشاورزی سبب شده است که بررسی کیفیت آن ضرورت ویژه‌ای داشته باشد.

##### ایستگاه‌های نمونه‌برداری

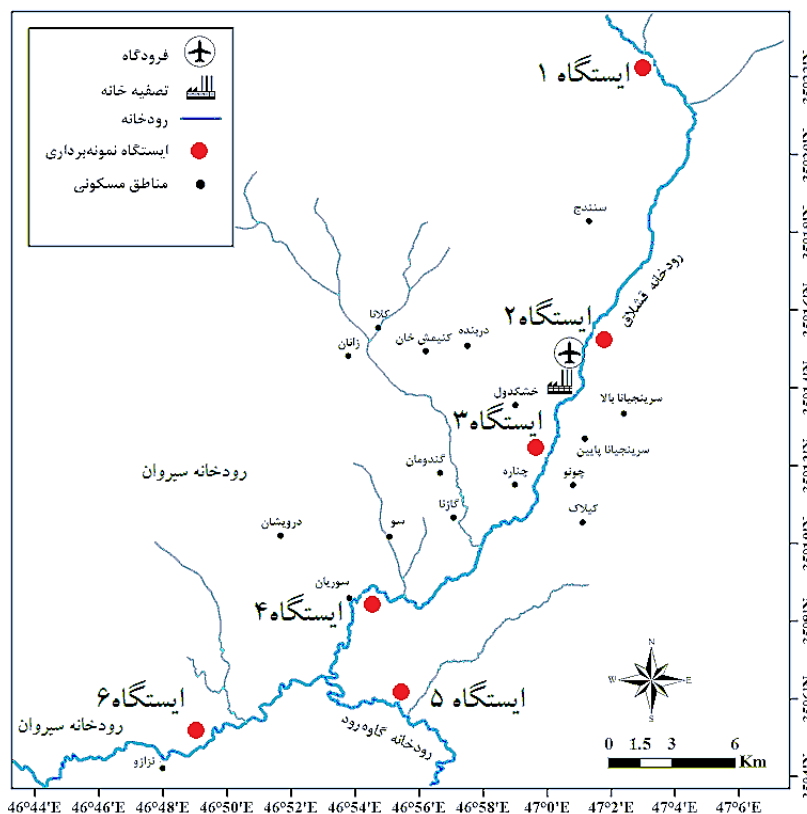
به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و فصلی کیفیت آب (در فصول تابستان و زمستان سال ۱۴۰۳)، شش ایستگاه نمونه‌برداری انتخاب شد (شکل ۱). ایستگاه اول در پایین‌دست سد قشلاق به‌عنوان نقطه مرجع با کمترین اثرگذاری انسانی در نظر گرفته شد. ایستگاه دوم در بالادست تصفیه‌خانه فاضلاب واقع شد تا وضعیت آب پیش از ورود پساب‌ها مشخص شود. ایستگاه سوم در پایین‌دست تصفیه‌خانه تعیین شد تا اثر مستقیم ورود پساب‌ها بر کیفیت آب آشکار شود. ایستگاه چهارم در پایین‌دست ایستگاه سوم قرار گرفت تا تغییرات کیفی پس از طی مسافت (حدود ۱۰ کیلومتر) ارزیابی شود. ایستگاه پنجم به شاخه گاوهرود اختصاص یافت که به‌دلیل بار آلودگی پایین‌تر نقش رقیق‌کننده ایفا می‌کند و در نهایت ایستگاه ششم در خروجی سد ژاوه انتخاب شد تا وضعیت نهایی آب پس از ترکیب شاخه‌ها مورد سنجش قرار گیرد. مختصات جغرافیایی ایستگاه‌ها با GPS دستی برداشت و در محیط ArcGIS نسخه ۱۰/۸ ترسیم شدند (شکل ۲).

##### نمونه‌برداری آب

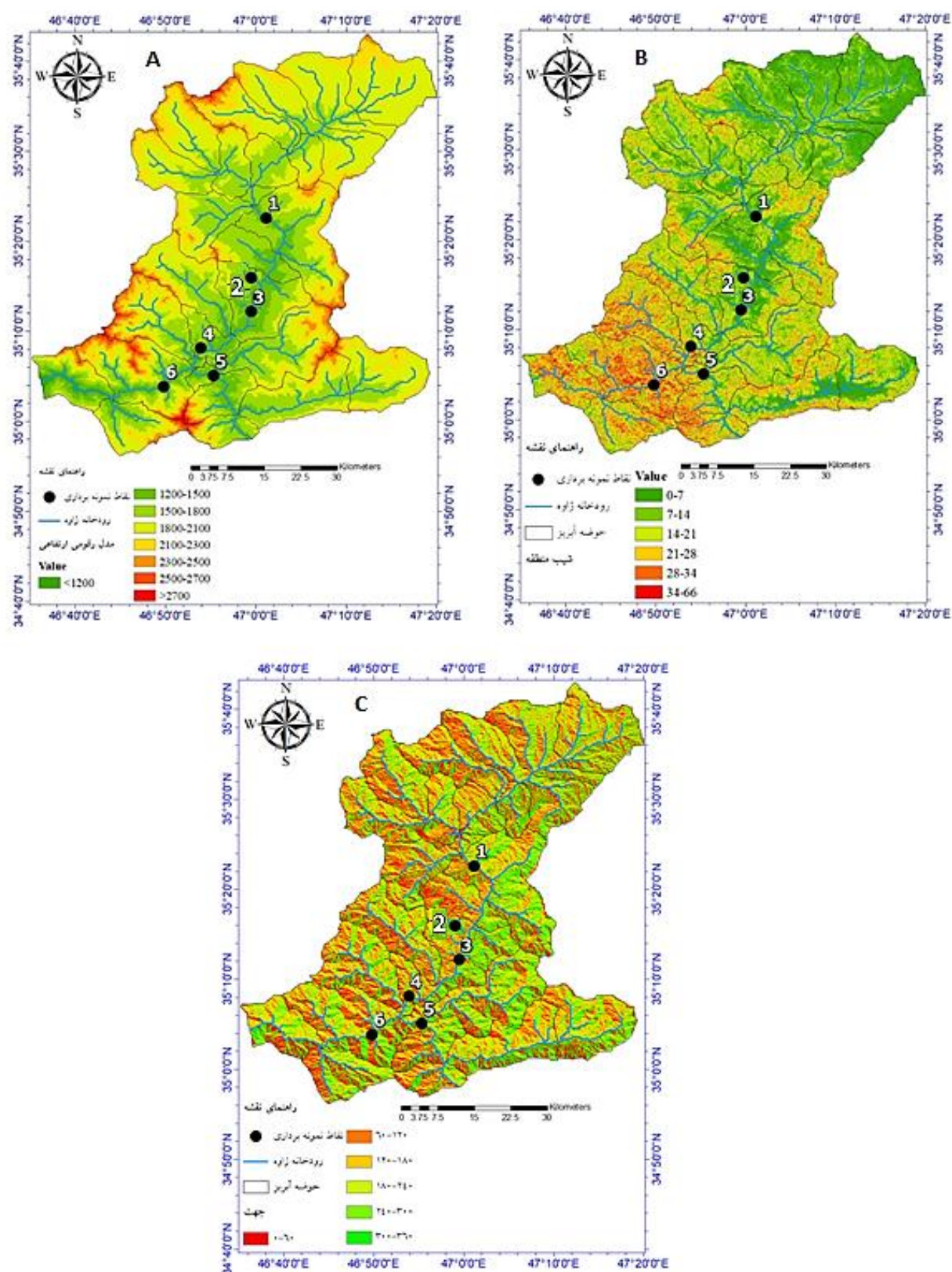
نمونه‌برداری آب در ماه‌های مرداد (تابستان) و بهمن (زمستان) سال ۱۴۰۳ انجام شد که به‌ترتیب نمایانگر شرایط کم‌آبی و پرآبی هستند. از هر ایستگاه سه نمونه برداشت شد تا دقت نتایج افزایش یابد. نمونه‌ها از عمق ۳۰-۲۰ سانتی‌متری سطح آب و در بخش میانی جریان جمع‌آوری شدند. ظروف مورد استفاده از جنس پلی‌اتیلن و از پیش شسته شده بودند. پس از نمونه‌برداری،

توان وزن‌دهی در این مطالعه برابر با ۲ در نظر گرفته شد و شعاع جستجو به گونه‌ای تنظیم شد که حداقل هشت و حداکثر دوازده همسایه در برآورد مشارکت کنند. اندازه سلول خروجی رستر ۳۰ متر تعیین شد. برای جلوگیری از برون‌یابی خارج از محدوده، نقشه‌ها به مرز حوضه آبریز ماسک شدند.

درون‌یابی ساده و پرکاربرد است که در بسیاری از موارد به‌ویژه هنگامی که داده‌ها نسبتاً همگن هستند و نقاط نمونه به‌طور گسترده توزیع شده‌اند، مناسب است (Li and Heap, 2014; Kearney et al., 2023; Goovaerts, 1997; Liu et al., 2021). برای نمایش تغییرات مکانی پارامترهای BOD، COD، TN، TP، TSS و pH از روش IDW در محیط ArcGIS استفاده شد.



شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز مورد مطالعه (رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان) و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

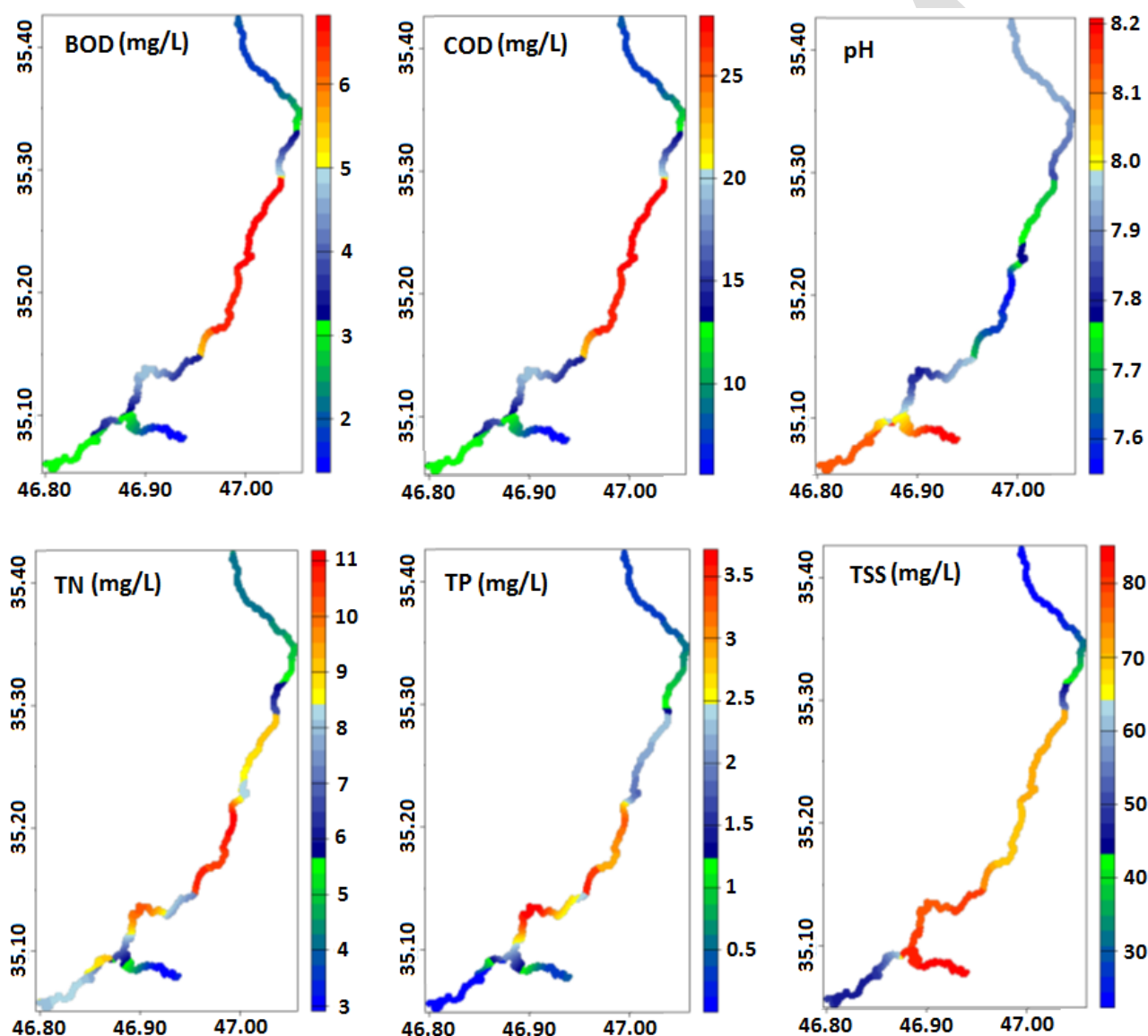


شکل ۲- (A) مدل رقومی ارتفاعی، (B) شیب و (C) جهت شیب حوضه آبریز و ایستگاه‌های نمونه‌برداری مورد مطالعه

## نتایج و بحث

در نقشه تابستانی BOD، ناحیه‌ای با بیشینه مقدار (بیش از ۶ میلی گرم بر لیتر) به وضوح در محدوده پایین دست ایستگاه‌های شماره ۲ و ۳ یعنی محل ورود پساب تصفیه خانه فاضلاب سنج و تا نزدیکی ایستگاه شماره ۴ شکل گرفته است (شکل ۳). این تمرکز مکانی نشان دهنده ورود بار بالای ترکیبات آلی قابل تجزیه زیستی به رودخانه است که به دلیل تخلیه مستقیم پساب‌های فاضلاب شهری رخ داده است. مقادیر بالای BOD در این

محدوده نه تنها کاهش اکسیژن محلول را در پی دارد، بلکه می‌تواند موجب بروز شرایط کم اکسیژنی (هیپوکسی) یا حتی بی اکسیژنی (آنوکسی) در برخی بازه‌ها گردد؛ شرایطی که به شدت بر حیات ماهی‌ها و بی مهرگان کفزی تأثیر منفی می‌گذارد. مقایسه این نتایج با مطالعات مشابه در رودخانه کارون و زاینده رود نیز نشان می‌دهد که الگوی افزایش BOD در پایین دست نقاط تخلیه پساب، یک الگوی رایج در رودخانه‌های شهری ایران است (Moghim Nezad et al., 2018; Bateni et al., 2013).



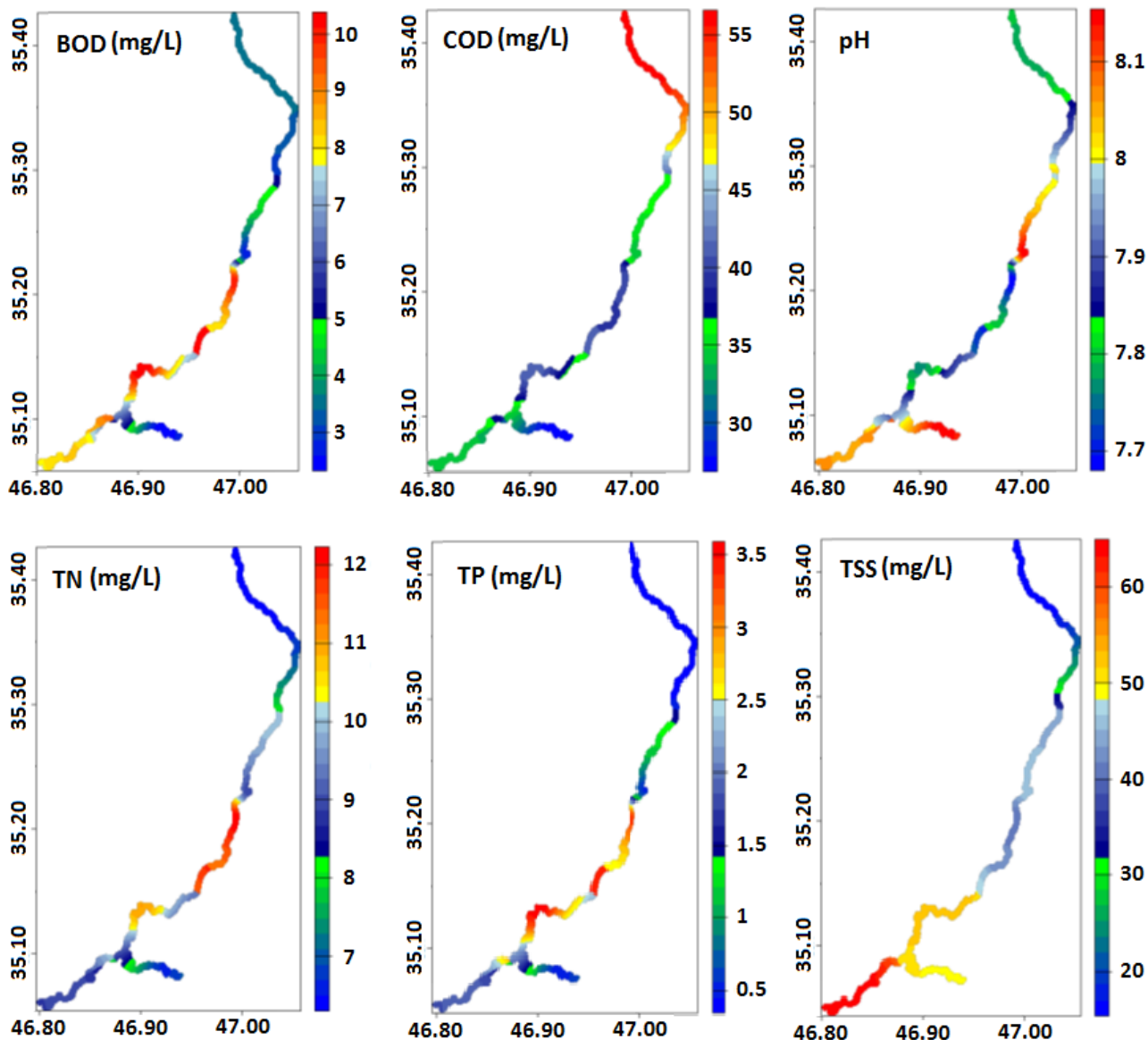
شکل ۳- تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب حوضه آبریز شاخه‌های قشلاق، گاوه رود و سیروان در فصل تابستان

آلودگی آلی در این بخش‌ها ناچیز است و آب از کیفیت بهتری برخوردار می‌باشد. در مقابل، نقشه زمستانی (شکل ۴) نشان می‌دهد که مقدار BOD در بعضی جاها کاهش یافته و توزیع مکانی آن یکنواخت‌تر شده

ایستگاه‌های مرجع شامل ایستگاه ۱ (پایین دست سد قشلاق) و ایستگاه ۵ (شاخه گاوه رود) با مقادیر پایین BOD به صورت پهنه‌هایی با رنگ سرد و کم مقدار نمایان شدند (اشکال ۳ و ۴). این موضوع تأیید می‌کند که در غیاب اثر مستقیم پساب، بار

ایستگاه‌ها در زمستان کمتر بوده و کنتراست رنگی در نقشه کاهش یافته است، موضوعی که نشان می‌دهد کیفیت آب در این فصل همگن‌تر است.

است (محدوده بحرانی پایین‌دست تصفیه‌خانه فاضلاب هنوز قابل مشاهده است)، این تغییر بیانگر اثر رقیق‌سازی جریان در زمستان است که باعث کاهش غلظت ترکیبات آلی می‌شود (Ma et al., 2025). همچنین دامنه تغییرات BOD بین



شکل ۴- تغییرات خصوصیات فیزیکوشیمیایی آب حوزه آبریز شاخه‌های قشلاق، گاوهرود و سیروان در فصل زمستان

وارد رودخانه می‌شوند. نسبت BOD/COD به‌عنوان شاخصی برای تعیین سهم مواد آلی زیست‌تجزیه‌پذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ نتایج این تحقیق نشان داد که نسبت BOD/COD در زمستان پایین‌تر از تابستان بود، به این معنا که سهم ترکیبات آلی پایدار در این فصل بیشتر است (Aguilar-Torrejón et al., 2023). در تحقیقی توسط Ma et al. (2025) در چین نیز روندی مشابه مشاهده شده است، به گونه‌ای که COD در فصل‌های بارانی به‌دلیل ورود رواناب‌های گسترده افزایش یافت.

در تابستان، بیشینه COD به بیش از ۲۵ میلی گرم بر لیتر رسید که همبستگی بالایی با تغییرات BOD دارد و نشان‌دهنده ورود بار بالای آلاینده‌های آلی است (شکل ۳). با این حال، برخلاف انتظار، در زمستان بیشینه COD حتی به مقادیر بالاتر (بیش از ۵۰ میلی گرم بر لیتر) افزایش یافت (شکل ۴). این افزایش در شرایط پرآبی احتمالاً ناشی از ورود گسترده رواناب‌های سطحی غنی از ترکیبات آلی پایدار و غیرقابل تجزیه زیستی است که عمدتاً از منابع کشاورزی، زهکش‌های شهری و فرسایش خاک

پرغذایی در دریاچه‌ها معمولاً کمتر از ۰/۰۵ میلی گرم بر لیتر گزارش شده است (Vollenweider, 1976). در زمستان نیز اگرچه مقادیر TP به ۰/۵ تا ۳/۵ میلی گرم بر لیتر کاهش یافت (شکل ۴)، اما همچنان چندین برابر بالاتر از استانداردهای جهانی است. مقایسه این نتایج با سایر مطالعات داخلی و خارجی نشان می‌دهد که این سطح از TP یک وضعیت بحرانی است. در رودخانه زاینده‌رود نیز مقادیر بالای TP ناشی از ورود پساب کشاورزی و شهری، گزارش شده است (Bateni et al., 2013). مطالعات انجام‌شده روی رودخانه‌های اروپایی نیز نشان داده‌اند که مقادیر TP بالا می‌تواند اکوسیستم‌های آبی را در معرض خطر پرغذایی قرار دهد (Guildford and Hecky, 2000). بنابراین، مقادیر بالای فسفر در مطالعه حاضر، نشان‌دهنده شرایط بحرانی و نیاز فوری به مداخلات مدیریتی است.

همچنین نتایج نشان داد که در تابستان غلظت مواد معلق کل (TSS) در بخش‌های پایین‌دست حوضه آبریز تا حدود ۸۰ میلی گرم بر لیتر افزایش یافته است (شکل ۳). این مقدار بالا موجب افزایش کدورت آب و کاهش نفوذ نور به عمق می‌شود که در نتیجه فتوسنتز جلبک‌ها و گیاهان آبی کاهش یافته و چرخه تولید اولیه تحت فشار قرار می‌گیرد. چنین شرایطی می‌تواند موجب کاهش زیستگاه مناسب برای ماهی‌ها و بی‌مهر-گان کفزی گردد و حتی فرآیندهای تنفسی آن‌ها را مختل کند. مطالعات مشابه در انگلستان نیز نشان داده است که افزایش TSS رابطه مستقیمی با کاهش تنوع زیستی و آسیب به جوامع آبی دارد (Bilotta and Brazier, 2008).

مقادیر TSS در زمستان، عمدتاً در محدوده ۲۰ تا ۶۰ میلی گرم بر لیتر قرار دارد (شکل ۴). این کاهش در مقایسه با تابستان به دلیل رقیق‌سازی طبیعی جریان است، اما همچنان در برخی نقاط پایین‌دست مقادیر بالایی مشاهده شد که ناشی از رواناب‌های سطحی و فرسایش خاک در اثر بارش‌های زمستانی است. نتایج مشابهی در مطالعه (Henley et al., 2000) گزارش شده که در فصل‌های پرآب، بار رسوبی رودخانه‌ها افزایش یافته و شفافیت آب به شدت کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر نشان داد که حوضه آبریز مورد مطالعه در رودخانه‌های قشلاق، گاوهرود و سیروان تحت اثر منفی پساب‌های تصفیه فاضلاب شهری و رواناب‌های کشاورزی قرار دارند و این امر به‌ویژه در تابستان به اوج می‌رسد. افزایش غلظت BOD و COD در پایین‌دست تصفیه‌خانه فاضلاب و

مقادیر ثبت‌شده pH در تابستان در بازه‌ی ۷/۶ تا ۸/۲ بود، همچنین مقادیر pH در زمستان در محدوده‌ی ۷/۷ تا ۸/۱ باقی ماند و تغییر چندانی نسبت به تابستان نداشت (اشکال ۳ و ۴). این دامنه در محدوده‌ی استانداردهای کیفیت آب برای شرب و حیات آبریان قرار دارد (WHO, 2017). ثبات نسبی pH در طول سال نشان‌دهنده وجود سیستم بافری قوی در رودخانه است که توانسته اثرات ناشی از ورود پساب فاضلاب‌های شهری و کشاورزی را تعدیل کند. چنین پایداری pH به حفظ تعادل شیمیایی رودخانه کمک می‌کند و از بروز تغییرات شدید اسیدی-بازی که می‌تواند برای آبریان زیان‌بار باشد، جلوگیری می‌کند. با این حال، باید توجه داشت که حتی تغییرات جزئی pH می‌تواند بر فرآیندهای شیمیایی مانند انحلال فلزات سنگین، سمیت آمونیاک و قابلیت جذب مواد مغذی تأثیرگذار باشد. به‌طور مثال، در شرایط pH بالاتر از ۸، سمیت آمونیاک افزایش می‌یابد و می‌تواند به مرگ و میر ماهی‌ها شود (APHA, 2017).

غلظت TN در تابستان در پایین‌دست ایستگاه شماره ۳ (محل ورود پساب تصفیه‌خانه فاضلاب) تا ۱۱ میلی گرم بر لیتر افزایش یافت که نشان‌دهنده اثرگذاری مستقیم فاضلاب انسانی است (شکل ۳). در زمستان، مقادیر TN در محدوده ۷ تا ۱۲ میلی گرم بر لیتر باقی ماند (شکل ۴). پایداری این سطح بالا در زمستان نشان می‌دهد که رقیق‌سازی ناشی از افزایش دبی رودخانه نمی‌تواند بار بالای نیتروژن ناشی از رواناب‌های کشاورزی و ورودی فاضلاب خانگی را جبران کند. چنین الگویی در رودخانه کارون ایران نیز گزارش شده است که در آن نیتروژن کل حتی در فصول پرآب همچنان بالا باقی می‌ماند (Moghimi Neza et al., 2018). در مطالعه دیگری توسط Saadi et al. (2025) روی دریاچه Guiers سنگال، نشان داده شد که بار نیتروژنی ناشی از کشاورزی در تمام فصول تهدیدی جدی برای کیفیت آب است. این یافته‌ها بیانگر آن است که مدیریت کودهای نیتروژنی و پساب‌های انسانی نقش کلیدی در کنترل کیفیت آب دارد. نتایج مشابهی توسط Cao et al. (2025) نیز گزارش شده است که در آن فاضلاب‌های انسانی و کاربری زمین، خروج نیتروژن و فسفر را به‌طور قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دادند.

در فصل تابستان، غلظت فسفر کل (TP) در ایستگاه‌های ۳ و ۴ به بیش از ۳ میلی گرم بر لیتر رسیده است (شکل ۳). این غلظت می‌تواند سبب پدیده پرغذایی برای آب‌های جاری شود (Vollenweider, 1976). همچنین، این سطح از فسفر کل نشان‌دهنده خطر بسیار بالای پرغذایی در مخزن پایین‌دست (سد ژاوه) است. مقادیر آستانه فسفر کل برای آغاز شرایط

نویسنده چهارم: ترسیم نقشه‌های مقاله  
نویسنده پنجم: انجام مراحل آزمایشگاهی  
نویسنده ششم: ویرایش و بازبینی مقاله  
نویسنده هفتم: انجام مراحل آزمایشگاهی

### اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آن‌ها می‌باشد.

### منابع

- 1- Aguilar-Torrejón, J.A., Balderas-Hernández, P., Roa-Morales, G., Barrera-Díaz, C.E., Rodríguez-Torres, I. and Torres-Blancas, T., 2023. Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and TOC in water—An overview through time. *SN Applied Sciences*, 5, 118. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05318-7>
- 2- Ali, S.Y., Sunar, S., Saha, P., Mukherjee, P., Saha, S. and Dutta, S., 2021. Drinking water quality assessment of river Ganga in West Bengal, India through integrated statistical and GIS techniques. *Water Science and Technology*, 84(10–11), pp.2997–3017. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.293>
- 3- APHA, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (23rd ed.). American Public Health Association, Washington, DC. 1545p.
- 4- Bateni, F., Fakheran, S. and Soffianian, A., 2013. Assessment of land cover changes and water quality changes in the Zayandehroud River Basin between 1997–2008. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, pp.10511–10519. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3348-3>
- 5- Bilotta, G.S. and Brazier, R.E., 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research*, 42(12), pp.2849–2861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.03.018>
- 6- Cao, M., Gao, W., Zhang, Y. and Guo, F., 2025. Riverine nitrogen and phosphorus output in an arid watershed: combined effects of anthropogenic nutrient inputs, land use, and hydrology. *Environmental Systems Research*, 14, 8. <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00399-2>
- 7- Goovaerts, P., 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press. 120p. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195115383.001.0001>
- 8- Guildford, S.J. and Hecky, R.E., 2000. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? *Limnology and Oceanography*, 45(6), pp.1213–1223. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.6.1213>
- 9- Henley, W.F., Patterson, M.A., Neves, R.J. and Lemly, A.D., 2000. Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers. *Reviews in Fisheries*

سطوح بالای نیتروژن و فسفر، خطر پرغذایی و کاهش کیفیت زیست‌محیطی را نشان داد. در زمستان اگرچه اثر رقیق‌سازی جریان به همگن‌تر شدن کیفیت آب کمک می‌کند، اما بار آلاینده‌های پایدار همچنان تهدیدی جدی باقی می‌ماند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به صورت مستقیم در پایش مستمر کیفیت منابع آب سطحی، شناسایی مناطق بحرانی آلودگی (Hotspots) و اولویت‌بندی مداخلات مدیریتی در حوضه‌های رودخانه‌ای استفاده شود. نقشه‌های تولیدشده از طریق مدل IDW، ابزار تصمیم‌گیری مناسبی برای سازمان حفاظت محیط زیست، شرکت‌های آب منطقه‌ای و وزارت نیرو محسوب می‌شوند تا بر اساس آن بتوانند ایستگاه‌های پایش جدید، طرح‌های بهبود تصفیه فاضلاب و الگوهای کاربری اراضی کشاورزی را بهینه‌سازی کنند. همچنین، نتایج این پژوهش مبنای علمی مناسبی برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب در سناریوهای اقلیمی آینده و پایش اثرات طرح‌های توسعه‌ای در حوضه سیروان و سایر مناطق مشابه کشور فراهم می‌سازد.

### تقدیر و تشکر

نگارندگان از همکاری و حمایت شرکت آب منطقه‌ای کردستان در فراهم کردن برخی تسهیلات برای تیم نمونه‌برداری صمیمانه قدردانی می‌کنند. همچنین از کارشناسان آزمایشگاه‌های پژوهشکده اکولوژی دریای خزر جهت همکاری در انجام آنالیزهای شیمیایی سپاسگزاریم.

### تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است.

### دسترسی به داده‌ها

داده‌ها استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

### مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل اولیه داده‌ها و بازبینی متن مقاله

نویسنده دوم: نگارش مقاله

نویسنده سوم: جمع‌آوری داده‌ها و بازبینی متن مقاله

- 20- UNESCO, 2020. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. UNESCO Publishing. 219p.
- 21- Vollenweider, R.A., 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. *Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia*, 33, pp.53–83.
- 22- Wang, Y., Liu, D., Xiao, W., Zhou, P., Tian, C., Zhang, C., et al., 2021. Coastal eutrophication in China: Trend, sources, and ecological effects. *Harmful Algae*, 107, 102058. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102058>
- 23- WHO, 2017. Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed.). World Health Organization. 541p.
- Science, 8(2), pp.125–139. <https://doi.org/10.1080/10641260091129198>
- 10- Kearney, K.M., Harley, J.B. and Nichols, J.A., 2023. Inverse distance weighting to rapidly generate large simulation datasets. *Journal of Biomechanics*, 158, 111764. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2023.111764>
- 11- Li, J. and Heap, A.D., 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, pp.173–189. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- 12- Liu, Z.N., Yu, X.Y., Jia, L.F., Wang, Y.S., Song, Y.C. and Meng, H.D., 2021. The influence of distance weight on the inverse distance weighted method for ore-grade estimation. *Scientific Reports*, 11, 2689. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82227-y>
- 13- Ma, C., Sun, W., Yang, Z., Wang, J. and Zhou, L., 2025. Spatiotemporal variations in land use impacts on river water quality in a mountain-to-plain transitional basin in arid region of northern China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 271, 104542. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2025.104542>
- 14- Moghimi Nezaad, S., Ebrahimi, K. and Kerachian, R., 2018. Investigation of seasonal self-purification variations of Karun River, Iran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), pp.621–634. [10.22060/CEEJ.2016.866](https://doi.org/10.22060/CEEJ.2016.866)
- 15- Pakoksung, K., Inseeyong, N., Chawaloeshonsiya, N., Punyapalakul, P., Chaiwiwatworakul, P., Xu, M. and Chuenchum, P., 2025. Seasonal dynamics of water quality in response to land use changes in the Chi and Mun River Basins, Thailand. *Scientific Reports*, 15(1), 7101. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91820-4>
- 16- Saadi, H., Diongue, D.M.L., Ogilvie, A., Martin, D., Tall, O., Bellanger, J., et al., 2025. Seasonal variations and drivers of water quality in semi-arid freshwater lakes: Multivariate spatial analysis in Lake Guiers, Senegal. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 61, 102695. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102695>
- 17- Sajid, A.H., Rudra, R.P. and Parkin, G., 2013. Systematic evaluation of Kriging and inverse distance weighting methods for spatial analysis of soil bulk density. *Canadian Biosystems Engineering*, 55(1), pp.1–13. [10.7451/CBE.2013.55.1](https://doi.org/10.7451/CBE.2013.55.1)
- 18- Saleh, M., Salehi, M., Khanaki, S., Ebrahimi, H., Liaghat, A., Mousavi, S.M., et al., 2025. Effects of treated wastewater irrigation on soil properties, nutrient uptakes, and crop yields of agronomic crops under different crop rotations. *Agricultural Water Management*, 316, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109585>
- 19- Smith, V.H., Joye, S.B. and Howarth, R.W., 2006. Eutrophication of freshwater and coastal ecosystems. *Limnology and Oceanography*, 51, pp.351–355. [https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1\\_part\\_2.0351](https://doi.org/10.4319/lo.2006.51.1_part_2.0351)