FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

Journal of Environmental Sciences Studies (JESS)
Volume 10 , Number 3 , Winter (2025)

Journal Homepage: www.jess.ir
Print ISSN: 2588-6851 Online ISSN: 2645-520X

Modelling the summer and winter variations of water chemical parameters in the Gheshlaqh, Gaveroud, and Sirvan rivers

Behzad Rahnama[1] ; Mehdi Khoshnamvand[1]* ; Hassan Nasrollahzadeh Saravi[1] ; Abdol Azim Fazel [2] ; Eisa Hajiradkouchak [1] ; Tahere Eskandari[1] ; Hoorieh Younesipour [1]

*1. Department of Ecology, Caspian Sea Ecology Research Center, Iranian Fisheries Science Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Sari, Iran.
2. Inland Waters Aquatics Resources Research Center, Iranian Fisheries Sciences Research Institute, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Gorgan, Iran.
*Email Address: mehdi.khoshnam@yahoo.com

Article Info

Article Type:
Research Paper

Article History:

Received Date:
2025/10/03
Revised Date:
2025/10/10
Accepted Date:
2025/11/11
Published Date:
2025/12/30

Keywords:
Water quality,
Seasonal variations,
Gheshlaqh River,
Sirvan River,
Inverse Distance Weighting (IDW).

ABSTRACT

The quality of river water is influenced by a combination of natural and human factors, and its spatial and seasonal variations can have significant impacts on the health of aquatic ecosystems and human uses. The present study aimed to investigate and compare the summer and winter variations of chemical parameters of water, including nitrate (NO^{3-}), phosphate (PO_4^{3-}), bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), ammonium (NH_4^+), silica (SiO_2), sodium (Na^+), potassium (K^+), and total dissolved solids (TDS) in the Gheshlaqh, Gaveroud, and Sirvan rivers in Kurdistan Province. Sampling was conducted at six stations during two seasons (summer and winter) of 2024, and the data were modelled using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in the GIS environment. The results showed that in summer, due to reduced flow discharge and increased pollutant inputs, the concentrations of most parameters increased, while in winter, dilution effects caused by precipitation and runoff led to their relative decrease. Downstream of the Sanandaj wastewater treatment plant (station 3) had the highest concentrations of nitrate, phosphate, ammonium, sodium, and potassium in both seasons, indicating the dominant role of point sources in determining water quality. The Gaveroud branch acted as a diluting flow, resulting in a relative reduction in pollutant concentrations when merging with the main river. The variation patterns of bicarbonate and silica were mainly controlled by geological characteristics and hydrological conditions. The assessment of TDS indicated that high values, especially in summer, could pose a serious threat to the quality of water for agricultural and drinking purposes. Overall, the findings demonstrated that improving the efficiency of the wastewater treatment plant and land-use management in the watershed could serve as key strategies for enhancing the sustainability of water resources in the region.

Cite this article: Behzad Rahnama , Mehdi Khoshnamvand , Hassan Nasrollahzadeh Saravi , Abdol Azim Fazel , Eisa Hajiradkouchak , Tahere Eskandari , Hoorieh Younesipour(2025) , Modelling the summer and winter variations of water chemical parameters in the Gheshlaqh, Gaveroud, and Sirvan rivers , Journal of Environmental Sciences Studies , 10(3) , Pages 10786 - 10797.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The quality of surface water resources is strongly influenced by both natural processes and anthropogenic activities. Seasonal and spatial fluctuations in river chemistry directly affect ecosystem health, agricultural sustainability, and drinking water safety. In Kurdistan Province, Iran, rivers such as Gheshlaqh, Gaveroud, and Sirvan serve as vital water sources. However, urban wastewater discharges, agricultural return flows, and seasonal hydrological changes pose serious risks. Understanding these dynamics through spatial modelling is critical for sustainable water management. The Inverse Distance Weighting (IDW) method in a GIS environment provides a reliable and widely applied tool for evaluating the spatial variability of water quality parameters.

Materials and methods

This study examined the seasonal (summer *vs.* winter) and spatial variations of nine key chemical parameters including nitrate (NO_3^-), phosphate (PO_4^{3-}), bicarbonate (HCO_3^-), sulphate (SO_4^{2-}), ammonium (NH_4^+), silica (SiO_2), sodium (Na^+), potassium (K^+), and total dissolved solids (TDS). Samples were collected at six stations along the Gheshlaqh–Sirvan river system in 2024, covering upstream, downstream, and tributary conditions, including the Sanandaj wastewater treatment plant discharge. Laboratory analyses were conducted in accordance with APHA (2017) standards, and spatial distribution maps were generated using IDW interpolation in ArcGIS 10.8. Parameters were evaluated not only for absolute concentration changes but also for their spatial gradients across the basin to identify critical hotspots of pollution better.

Results and discussion

The results revealed strong spatiotemporal contrasts in water chemistry. In summer, reduced discharge and increased pollutant inputs led to significant elevation of most parameters, whereas in winter, rainfall-driven dilution resulted in lower concentrations. However, downstream of the Sanandaj wastewater treatment plant (station 3), nutrient and ion concentrations consistently remained the highest in both seasons. Nitrate, phosphate, and ammonium showed pronounced enrichment, particularly in summer, emphasising the overwhelming influence of continuous point-source effluent discharges. Such nutrient accumulation is strongly associated with eutrophication risk, algal blooms, and oxygen depletion, which can have cascading ecological impacts. Sodium and potassium exhibited similar patterns, with elevated levels at stations 3 and 4. Their sources are linked to urban wastewater, domestic detergents, and agricultural return flows, reflecting both point and nonpoint pollution. In contrast, bicarbonate and silica exhibited weaker seasonal fluctuations and were largely influenced by the geochemical weathering and hydrological characteristics of the catchment, indicating a natural background influence rather than direct anthropogenic pressure. TDS showed the most distinct spatial variation. In summer, concentrations peaked at stations 3 and 4 due to effluent loading, evaporation, and reduced dilution capacity. Although the Gaveroud tributary (station 5) acted as a diluting flow, its effect was insufficient to offset elevated loads in the main river. At the Sirvan outlet (station 6), concentrations decreased relative to midstream stations but remained higher than upstream reference levels, highlighting the persistence of downstream pollution. Overall, seasonal hydrology moderated but did not remove the influence of pollution. The persistence of elevated nutrient and TDS levels even during high-flow winter conditions underscores the limited natural self-purification capacity of the Gheshlaqh–Sirvan river system. Similar findings have been reported in other rivers worldwide, where wastewater discharges significantly influence water quality patterns, despite seasonal variability. This highlights the urgent need for improved wastewater treatment efficiency, stricter control of agricultural inputs, and targeted land-use management to protect water resources.

Conclusion

The Gheshlaqh–Sirvan river system exhibits strong spatial and seasonal variation in water quality, driven primarily by point-source wastewater inputs. Seasonal hydrology acts as a secondary factor, influencing concentration levels but not altering overall patterns of contamination. Effective management strategies should focus on improving wastewater treatment efficiency, reducing agricultural nutrient inputs, and applying GIS-based monitoring tools to support the long-term sustainability of regional water resources.

مجله مطالعات علوم محیط زیست
جلد ۱۰ ، شماره ۳
Journal Homepage:www.jess.ir
شاپای چاپی: 2588-6851 شاپای الکترونیکی: 2645-520X
FANPAYA
Knowledge Based Company
(PUBLISHERS)

مدل‌سازی تغییرات تابستانه و زمستانه پارامترهای شیمیایی آب در رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان

بهزاد رهنما[۱]، مهدی خوشنامواند[۱]*، حسن نصراله زاده ساروی[۱]، عبدالعظیم فاضل[۲]، عیسی حاجی راد کوچک[۱]، طاهره اسکندری[۱]، حوریه یونسی پور[۱]

[*]۱- گروه اکولوژی، پژوهشکده اکولوژی دریای خزر، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ایران.
۲- مرکز تحقیقات ذخایر آبزیان آب‌های داخلی، مؤسسه تحقیقات علوم شیلاتی کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، گرگان، ایران.
[*]ایمیل نویسنده مسئول: mehdi.khoshnam@yahoo.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۷/۱۱
تاریخ بازنگری:
۱۴۰۴/۰۷/۱۸
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۴/۰۸/۲۰
تاریخ انتشار:
۱۴۰۴/۱۰/۰۹

کلید واژه ها:
کیفیت آب،
تغییرات فصلی،
رودخانه قشلاق،
رودخانه سیروان،
درون‌یابی فاصله معکوس.

چکیده

کیفیت آب رودخانه‌ها تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد و تغییرات مکانی و فصلی آن می‌تواند پیامدهای مهمی بر سلامت اکوسیستم‌های آبی و مصارف انسانی داشته باشد. پژوهش حاضر با هدف بررسی و مقایسه تغییرات تابستانه و زمستانه پارامترهای شیمیایی آب شامل نیترات (NO_3^-)، فسفات (PO_4^{3-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، سولفات (SO_4^{2-})، آمونیوم (NH_4^+)، سیلیس (SiO_2)، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+) و کل مواد محلول (TDS) در رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان در استان کردستان انجام شد. نمونه‌برداری در شش ایستگاه طی دو فصل (تابستان و زمستان) سال ۱۴۰۳ صورت گرفت و داده‌ها با استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting; IDW) در محیط GIS مدل سازی شدند. نتایج نشان داد که در فصل تابستان به دلیل کاهش دبی جریان و افزایش ورودی آلاینده‌ها، غلظت بیشتر پارامترها افزایش یافت؛ در حالی که در زمستان اثر رقیق‌سازی ناشی از بارش‌ها و رواناب موجب کاهش نسبی آن‌ها شد. پایین‌دست تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج (ایستگاه سوم) بیشترین غلظت نیترات، فسفات، آمونیوم، سدیم و پتاسیم را در هر دو فصل داشت که بیانگر نقش غالب منابع نقطه‌ای در تعیین کیفیت آب است. شاخه گاوه‌رود به‌عنوان جریان رقیق‌کننده موجب کاهش نسبی غلظت آلاینده‌ها در ترکیب با جریان اصلی شد. الگوی تغییرات بی‌کربنات و سیلیس بیشتر تحت کنترل ویژگی‌های زمین‌شناسی و شرایط هیدرولوژیکی قرار داشت. بررسی TDS نشان داد که مقادیر بالا به‌ویژه در تابستان می‌تواند تهدیدی جدی برای کیفیت آب کشاورزی و شرب محسوب شود. به‌طور کلی، یافته‌ها نشان دادند که ارتقای کارایی تصفیه‌خانه فاضلاب و مدیریت کاربری اراضی در حوضه آبریز می‌تواند راهکاری کلیدی برای بهبود پایداری کیفی منابع آب منطقه باشد.

ناشر: انتشارات فن پایا

DOI: 10.22034/jess.2025.550964.2411

۱- مقدمه

منابع آب سطحی به‌عنوان یکی از حیاتی‌ترین مؤلفه‌های زیست‌بوم‌های طبیعی و جوامع انسانی، نقش اساسی در توسعه پایدار و امنیت غذایی و زیست‌محیطی ایفا می‌کنند (UNESCO, 2020). در مناطق با بارندگی نسبتا" خوب و کوهستانی مانند استان کردستان، رودخانه‌ها منبع اصلی تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت هستند و هرگونه تغییر در کیفیت آن‌ها می‌تواند اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر سلامت انسان، پایداری اکوسیستم‌ها و بهره‌برداری‌های اقتصادی داشته باشد (WHO, 2017; Bilotta and Brazier, 2008). در سال‌های اخیر افزایش جمعیت، گسترش فعالیت‌های کشاورزی و ورود پساب‌های شهری و صنعتی، تهدیدی جدی برای کیفیت آب رودخانه‌ها در ایران محسوب می‌شود (Moghimi Nezad et al., 2018). کیفیت آب یک رودخانه تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد (دادخواه تهرانی و همکاران، ۱۴۰۲). تغییرات فصلی بارش، دما و رواناب، چرخه‌های هیدرولوژیکی را تغییر می‌دهد و در نتیجه غلظت یون‌ها و مواد محلول را در آب تغییر می‌دهد. از سوی دیگر، ورود فاضلاب‌های شهری، زه‌آب‌های کشاورزی غنی از کود و سموم، و پساب‌های صنعتی منجر به افزایش بار آلودگی آلی و غیرآلی می شود (Smith et al., 2006; Wang et al., 2021). این وضعیت می‌تواند فرایندهای یوتریفیکاسیون، کاهش اکسیژن محلول و در نهایت تهدید سلامت آبزیان و مصرف‌کنندگان انسانی را به دنبال داشته باشد (Guildford and Hecky, 2000; Vollenweider, 1976). بررسی تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای شیمیایی آب یکی از ابزارهای کلیدی برای مدیریت کیفی منابع آب است. پارامترهایی نظیر نیترات (NO_3^-)، فسفات (PO_4^{3-})، بی‌کربنات (HCO_3^-)، سولفات (SO_4^{2-})، آمونیوم (NH_4^+)، سیلیس (SiO_2)، سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+) و کل مواد محلول (TDS) شاخص‌های مهمی برای ارزیابی وضعیت شیمیایی آب هستند. افزایش غلظت این یون‌ها اغلب نشانه‌ای از ورود آلاینده‌ها یا تغییرات ژئوشیمیایی حوضه آبریز است (Henley et al., 2000; Aguilar-Torrejón et al., 2023).

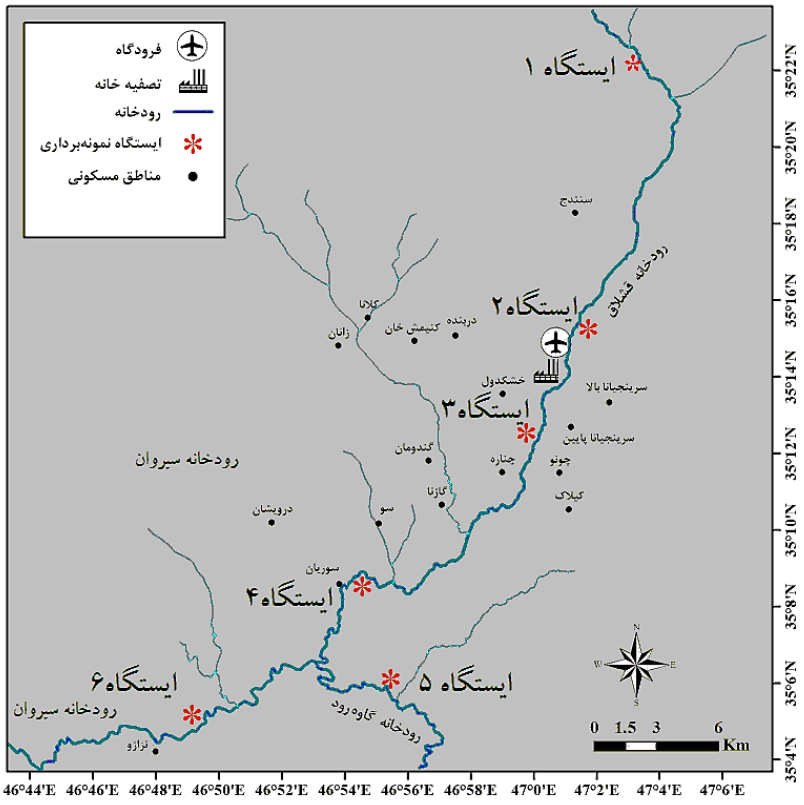
به‌عنوان مثال، افزایش نیترات و فسفات معمولاً به دلیل ورود فاضلاب و کودهای شیمیایی است (دولت آبادی و همکاران، ۱۴۰۱) که می‌تواند رشد جلبکی و یوتریفیکاسیون را تشدید کند، در حالی‌که افزایش TDS می‌تواند بازتابی از شوری و ورود املاح معدنی ناشی از فرسایش خاک باشد (Ali et al., 2021). رودخانه‌های قشلاق و سیروان به‌عنوان دو منبع مهم آب سطحی در استان کردستان اهمیت ویژه‌ای دارند (شکل ۱). رودخانه قشلاق پس از عبور از سد قشلاق، وارد شهر سنندج شده و پساب‌های شهری و تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج را دریافت می‌کند. این مسئله منجر به تغییرات قابل توجهی در کیفیت آب پایین‌دست می‌شود. در مقابل، شاخه گاوه‌رود که به‌عنوان یک جریان با بار آلودگی کمتر شناخته می‌شود، نقش مهمی در رقیق‌سازی آلودگی‌ها دارد. در نهایت، ترکیب این جریان‌ها رودخانه سیروان را شکل می‌دهد که به سد ژاوه ختم می شود و از منابع استراتژیک آب منطقه به شمار می‌رود. بررسی کیفیت شیمیایی این رودخانه ها به‌ویژه در شرایط متغیر فصلی تابستان (کم‌آبی) و زمستان (پرآبی) می‌تواند بینش دقیقی درخصوص پایداری کیفی این منابع ارائه کند (Saadi et al., 2025). با وجود اهمیت بالای پایش کیفیت آب، محدودیت‌های زمانی، مالی و دسترسی به همه نقاط رودخانه، امکان نمونه‌برداری گسترده را دشوار می‌سازد. بنابراین، توسعه و به‌کارگیری روش‌های درون‌یابی مکانی در محیط GIS به‌عنوان ابزارهای قدرتمند برای تخمین و نمایش پیوسته تغییرات کیفی آب مطرح شده است (Li and Heap, 2014). روش‌های مختلفی برای درون‌یابی وجود دارد که از میان آن‌ها، روش درون‌یابی فاصله معکوس (Inverse Distance Weighting; IDW) یکی از رایج‌ترین و پرکاربردترین روش‌ها در علوم محیطی است (Goovaerts, 1997; Kearney et al., 2023). روش IDW بر پایه اصل وزن‌دهی معکوس فاصله عمل می‌کند؛ به‌گونه‌ای که تأثیر نقاط نمونه‌برداری بر برآورد یک نقطه ناشناخته به‌طور معکوس با فاصله کاهش می‌یابد. در واقع، هرچه فاصله نقطه نمونه‌برداری از نقطه موردنظر بیشتر باشد، وزن آن کمتر در نظر گرفته می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود که داده‌های نزدیک‌تر سهم بیشتری در برآورد مقادیر داشته باشند (Liu et al., 2021). مزیت اصلی IDW در سادگی، شفافیت و توانایی آن در ارائه نقشه‌های معتبر حتی در شرایطی با داده‌های محدود است (Sajid et al., 2013). مطالعات متعدد نشان داده‌اند که IDW قادر است نتایج قابل اعتمادی در تحلیل تغییرات کیفی آب، خاک و سایر مؤلفه‌های محیطی ارائه دهد (Ali et al., 2021; Saadi et al., 2025). در مقایسه با روش‌های پیچیده‌تر مانند کریجینگ (Kriging)، هرچند دقت مطلق IDW در برخی شرایط کمتر است، اما در داده‌های با پراکنش محدود و یکنواخت، عملکرد آن بسیار مطلوب گزارش شده است (Li and Heap, 2014). افزون بر این، قابلیت پیاده‌سازی سریع IDW در محیط GIS آن را به ابزاری محبوب برای مدیران منابع آب و محققان محیط زیست تبدیل کرده است.از دیدگاه مدیریت منابع آب، تحلیل تغییرات مکانی و فصلی کیفیت آب با بهره‌گیری از روش‌های مکانی می‌تواند به شناسایی نقاط بحرانی، تعیین منابع آلودگی و طراحی راهکارهای مدیریتی مؤثر کمک کند. برای مثال، مکان‌یابی بخش‌هایی از رودخانه که بیشترین تأثیر را از ورود پساب‌های شهری دارند، امکان برنامه‌ریزی برای بهبود عملکرد تصفیه‌خانه‌ها یا اعمال اقدامات حفاظتی را فراهم می‌آورد (Moghimi Nezad et al., 2018). همچنین، بررسی نقش جریان‌های رقیق‌کننده نظیر گاوه‌رود می‌تواند مبنایی

برای مدیریت بهینه استفاده از منابع آب در شرایط کم‌آبی باشد (Ma et al., 2025). با توجه به آنچه بیان شد، ضرورت انجام پژوهشی جامع برای برر سی تغییرات مکانی و ف صلی کیفیت آب رودخانه‌های ق شلاق، گاوه‌رود و سیروان آ شکار می شود. پژوهش حا ضر با هدف تحلیل پارامترهای شیمیایی کلیدی آب شامل NO_3^-، HCO_3^-، PO_4^{3-}، SO_4^{2-}، NH_4^+، SiO_2، K^+، Na^+ و TDS در دو فصل تابستان و زمستان و با ا ستفاده از روش درون‌یابی فا صله معکوس طراحی شده ا ست. نتایج این مطالعه می‌تواند بینشی علمی برای درک الگوهای آلودگی، شـناسـایی نقش منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و ارائه راهکارهای مدیریتی در جهت پایداری اکوسـیسـتم‌های آبی منطقه فراهم آورد.

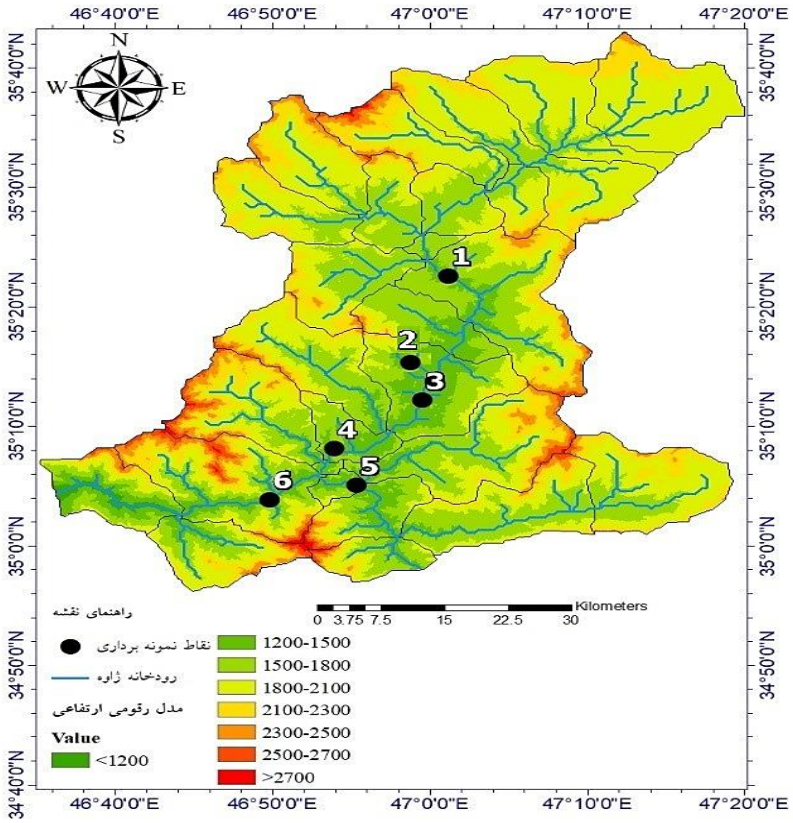
۲- روش انجام تحقیق

- **حوزه آبریز مورد بررسی و ایستگاههای نمونه برداری**

رودخانه ق شلاق به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب سطحی ا ستان کرد ستان، در شمال شرقی شهر سنندج قرار دارد. این رودخانه پس از عبور از سد ق شلاق وارد محدوده شهری می شود و در پایین‌د ست با شاخه گاوه‌رود تلاقی کرده و در نهایت رودخانه سیروان را ت شکیل می‌دهد که به سد ژاوه منتهی می‌گردد (شکل ۱). نقش کلیدی این حو ضه آبریز در تأمین آب کشاورزی و سایر م صارف منطقه، ضرورت بررسی و پایش مستمر کیفیت آن را آشکار می‌سازد.به‌منظور ارزیابی تغییرات مکانی و فصلی کیفیت آب در فصول تابستان و زمستان سال ۱۴۰۳، شش ایستگاه نمونه‌برداری تعیین شدند (اشکال ۱ و ۲). ایستگاه نخست در پایین‌د ست سد ق شلاق به‌عنوان نقطه مرجع با حداقل تأثیر فعالیت‌های انسانی در نظر گرفته شد. ایستگاه دوم در بالاد ست تصفیه‌خانه فا ضلاب سنندج انتخاب شد تا و ضعیت آب پیش از ورود پساب‌ها مشخص گردد. ایستگاه سوم در پایین‌دست خروجی تصفیه‌خانه قرار گرفت تا اثر مستقیم ورود پساب‌ها بر کیفیت آب بررسی شود. ای ستگاه چهارم حدود ۱۰ کیلومتر پایین‌تر از ای ستگاه سوم واقع شد تا تغییرات کیفی پس از طی م سافت ارزیابی شود. ای ستگاه پنجم به شـاخه گاوه‌رود اختصـاص یافت که به دلیل بار آلودگی کمتر، نقش رقیق‌کننده آلاینده‌ها را بر عهده دارد. در نهایت، ایسـتگاه شـشـم در خروجی سد ژاوه انتخاب شد تا کیفیت نهایی آب پس از ترکیب جریان‌ها مورد سنجش قرار گیرد. مختصات جغرافیایی کلیه ای ستگاه‌ها با استفاده از دستگاه GPS دستی برداشت و در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 ترسیم گردیدند.



شکل ۱. حوزه آبریز مطالعه‌شده و موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان.



شکل ۲. مدل رقومی ارتفاعی (DEM) حوزه آبریز و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری.

- **نمونه برداری آب و آنالیز شیمیایی**

عملیات نمونه‌برداری آب در دو فصل تابستان و زمستان سال ۱۴۰۳ انجام گرفت تا شرایط هیدرولوژیکی متضاد شامل دوره کم‌آبی (تابستان) و پرآبی (زمستان) نمایان گردد. به‌منظور افزایش دقت و اطمینان از نتایج، در هر ایستگاه سه تکرار نمونه‌برداری صورت گرفت. نمونه‌ها از عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متری سطح آب و از بخش میانی جریان برداشت شدند تا نماینده‌ای مناسب از کیفیت آب جریان اصلی باشند. ظروف نمونه‌برداری از جنس پلی‌اتیلن و پیش از استفاده با اسید رقیق و آب مقطر شسته و آماده شده بودند. بلافاصله پس از جمع‌آوری، نمونه‌ها در یخدان‌های ایزوله با دمای حدود ۴ درجه سانتی‌گراد نگهداری و در کوتاه‌ترین زمان ممکن به آزمایشگاه منتقل شدند تا تحت آنالیزهای شیمیایی قرار گیرند (APHA, 2017). پارامترهای شیمیایی شامل NO_3^-، HCO_3^-، PO_4^{3-}، SO_4^{2-}، NH_4^+، SiO_2، K^+، Na^+ و TDS مطابق با دستورالعمل‌های "روش‌های استاندارد برای آزمایش آب و فاضلاب" ((APHA, 2017 Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater) اندازه‌گیری شدند. به‌طور خاص، یون‌های نیترات، فسفات و آمونیوم با اسپکتروفتومتر UV-Vis (Cintra 1010)، آنیون‌های سولفات و بی‌کربنات با تیتراسیون شیمیایی و کاتیون‌های سدیم و پتاسیم با فلیم‌فتومتر (JENWAY PFP7) تعیین شدند.

- **مدل‌سازی تغییرات شیمیایی آب با روش درون‌یابی فاصله معکوس**

برای ترسیم الگوهای مکانی پارامترهای شیمیایی شامل NO_3^- ، HCO_3^-، PO_4^{3-}، SO_4^{2-}، NH_4^+، SiO_2، K^+، Na^+ و TDS از روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW) در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.8 بهره‌گیری شد. در این روش، وزن هر نقطه نمونه متناسب با معکوس فاصله آن از نقطه برآوردشونده محاسبه گردید. توان وزن‌دهی در این پژوهش برابر با ۲ انتخاب شد و شعاع جستجو به گونه‌ای تنظیم گردید که بین حداقل ۸ و حداکثر ۱۲ نقطه همسایه در برآورد نهایی مشارکت داشته باشند. همچنین، اندازه سلول نقشه‌های رستری حاصل ۳۰ متر تعیین شد. به‌منظور جلوگیری از برون‌یابی خارج از محدوده مطالعه، کلیه نقشه‌ها به مرزهای حوضه آبریز محدود شدند.

۳- نتایج

- **الگوی کلی تغییرات مکانی و فصلی**

نتایج به‌دست‌آمده از نقشه‌های درون‌یابی مکانی نشان داد که کیفیت آب رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان به‌شدت متأثر از عوامل انسانی و تغییرات هیدرولوژیکی فصلی است. در فصل تابستان، که با دبی پایین و تبخیر بالاتر مشخص می‌شود، غلظت بیشتر پارامترهای شیمیایی در مقایسه با زمستان افزایش یافت. این پدیده ناشی از دو عامل اصلی است: افزایش غلظت آلاینده‌ها به دلیل کاهش حجم جریان و افزایش ورودی منابع آلاینده نظیر پساب تصفیه خانه فاضلاب شهری و زه‌آب‌های کشاورزی. در مقابل، در فصل زمستان، به‌دلیل افزایش رواناب ناشی از بارش‌ها و رقیق‌سازی جریان، غلظت بسیاری از پارامترها کاهش یافت (اشکال ۳ و ۴). با این حال، در ایستگاه سوم (پایین‌دست تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج) حتی در زمستان نیز غلظت بالاتر نسبت به سایر نقاط مشاهده گردید. این یافته مشابه مطالعات انجام‌شده در سایر رودخانه‌های ایران و جهان است. برای مثال، Moghimi Nezhad و همکارانش (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای بر رودخانه کارون نشان دادند که اگرچه بارندگی و افزایش دبی در زمستان به کاهش نسبی غلظت آلاینده‌ها کمک می‌کند، اما ورود مداوم پساب شهری همچنان موجب باقی‌ماندن سطوح بالای آلاینده‌ها در پایین‌دست می‌شود. چنین الگویی در سطح جهانی نیز گزارش شده است. در پژوهش Ali و همکاران در سال ۲۰۲۱ در رودخانه Ganga در هند، آنها دریافتند که تغییرات فصلی اثر مشخصی بر الگوهای مکانی آلاینده‌ها دارد، اما تمرکز آلودگی در نقاطی که ورودی‌های نقطه‌ای پساب وجود دارد، حتی در شرایط پرآبی، همچنان حفظ می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بارگذاری نقطه‌ای ناشی از پساب فاضلاب شهری در رودخانه قشلاق و شاخه‌های آن نقش غالب را در تعیین کیفیت آب ایفا می‌کند و تغییرات فصلی تنها اثر تعدیل‌کننده دارد، نه حذف‌کننده.

- **تغییرات مواد مغذی نیترات (NO_3^-)، فسفات (PO_4^{3-}) و آمونیوم (NH_4^+)**

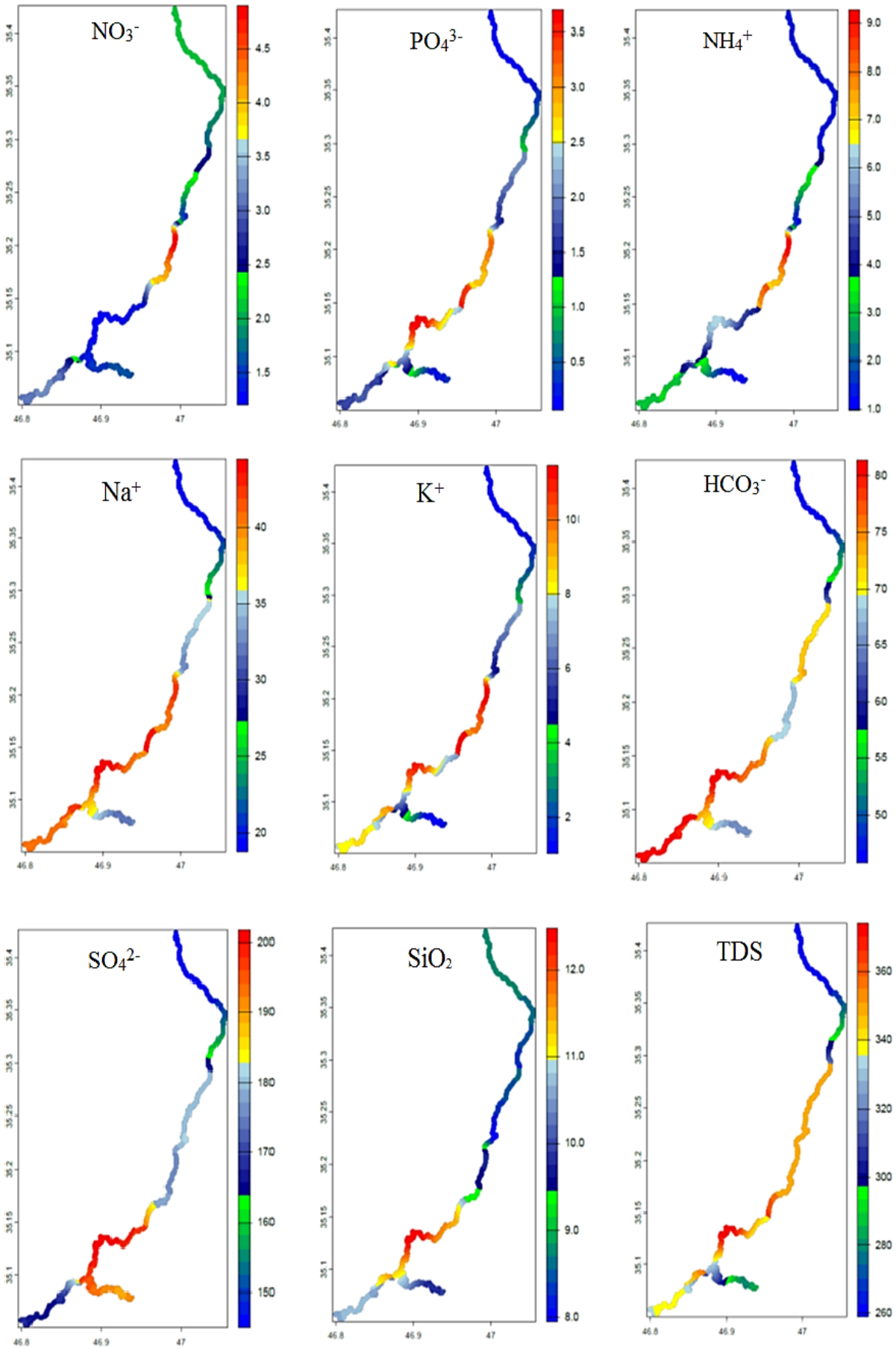
نتایج نشان داد که غلظت نیترات در ایستگاه سوم (پایین‌دست تصفیه‌خانه فاضلاب) به‌طور معناداری بیشتر از سایر ایستگاه‌ها بود. این موضوع در هر دو فصل مشاهده شد، اما شدت آن در تابستان بیشتر بود (اشکال ۳ و ۴). دلیل این افزایش، ورود مستمر پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهری به رودخانه است که حاوی غلظت بالایی از ترکیبات نیتروژن‌دار می‌باشد. در تابستان، کاهش دبی جریان موجب تمرکز بیشتر این ترکیبات شده و غلظت‌ها را افزایش می‌دهد. این یافته‌ها با مطالعات قبلی همخوان است. به‌عنوان مثال، Smith et al. (2006) گزارش کردند که ورود مداوم نیتروژن به اکوسیستم‌های آبی از طریق پساب‌ها عامل اصلی یوتریفیکاسیون و کاهش کیفیت آب است. کاهش نسبی نیترات در ایستگاه چهارم نشان‌دهنده وجود فرآیندهای خودپالایی طبیعی در رودخانه است. این فرآیندها می توانند شامل دنیتریفیکاسیون میکروبی، جذب توسط رسوبات و برداشت توسط زی‌توده آبی می‌باشد (Moghimi Nezad et al., 2018). با وجود این، سطح نیترات حتی در ایستگاه چهارم نیز بالاتر از ایستگاه‌های مرجع باقی ماند که نشان می‌دهد ظرفیت خودپالایی رودخانه محدود است و نمی‌تواند به‌طور کامل اثر بارگذاری شدید را جبران کند. همچنین، در مطالعات انجام‌شده بر رودخانه‌های آمریکای شمالی نیز الگوهای مشابهی مشاهده شده است که بارگذاری نیتروژن از پساب شهری و کودهای کشاورزی منجر به افزایش غلظت نیترات در پایین‌دست می‌شود (Carpenter et al., 1998). این همسویی نتایج تأکیدی است بر نقش غالب منابع انسانی در تعیین الگوی مکانی و فصلی نیترات. فسفات نیز مانند نیترات بیشترین غلظت خود را در ایستگاه سوم داشت (اشکال ۳ و ۴). در تابستان، مقادیر فسفات به‌طور محسوسی افزایش یافت که نشان‌دهنده اثر ترکیبی کاهش جریان و ورود پساب‌های غنی از فسفر است. منابع اصلی فسفات در رودخانه‌ها شامل پساب‌های خانگی حاوی مواد شوینده و زه‌آب‌های کشاورزی حاوی کودهای فسفاته است (Ma et al., 2025). از دیدگاه مدیریتی، حضور فسفات در مقادیر بالا در پایین‌دست شهر سنندج هشداری برای افزایش خطر رشد جلبکی و کاهش کیفیت زیست‌محیطی آب است. یافته‌های این مطالعه با نتایج Smith et al. (2006) مطابقت دارد که نشان دادند ورود فسفر از منابع نقطه‌ای، عامل کلیدی در تشدید فرایند یوتریفیکاسیون است. در ایستگاه پنجم (گاوه‌رود)، غلظت فسفات نسبتاً پایین‌تر بود که نشان می‌دهد این شاخه نقش رقیق‌کننده برای جریان اصلی می تواند ایفا کند. Saadi و همکارانش (۲۰۲۵) بیان کردند که ورود شاخه‌های فرعی با کیفیت بهتر می‌تواند به کاهش غلظت آلاینده‌ها در رودخانه‌های اصلی کمک کند. آمونیوم هم در پایین‌دست تصفیه‌خانه بیشترین غلظت را داشت (اشکال ۳ و ۴). این یافته نشان‌دهنده ناکارآمدی نسبی فرآیندهای تصفیه در حذف کامل ترکیبات نیتروژنی است. در فصل تابستان، به دلیل کاهش جریان و تمرکز پساب، غلظت‌ها بالاتر بود، در حالی‌که در زمستان کاهش نسبی مشاهده شد. این کاهش می‌تواند ناشی از رقیق‌سازی جریان و نیز تبدیل آمونیوم به نیترات در فرآیند نیتریفیکاسیون باشد (Hamdhani et al., 2023). همچنین، مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که آمونیوم یکی از شاخص‌های کلیدی آلودگی فاضلابی است و غلظت بالای آن اغلب در نزدیکی تخلیه‌های نقطه‌ای مشاهده می‌شود (Camargo and Alonso, 2006).

- **تغییرات سدیم (Na^+)، پتاسیم (K^+)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، سولفات (SO_4^{2-}) و سیلیس (SiO_2)**

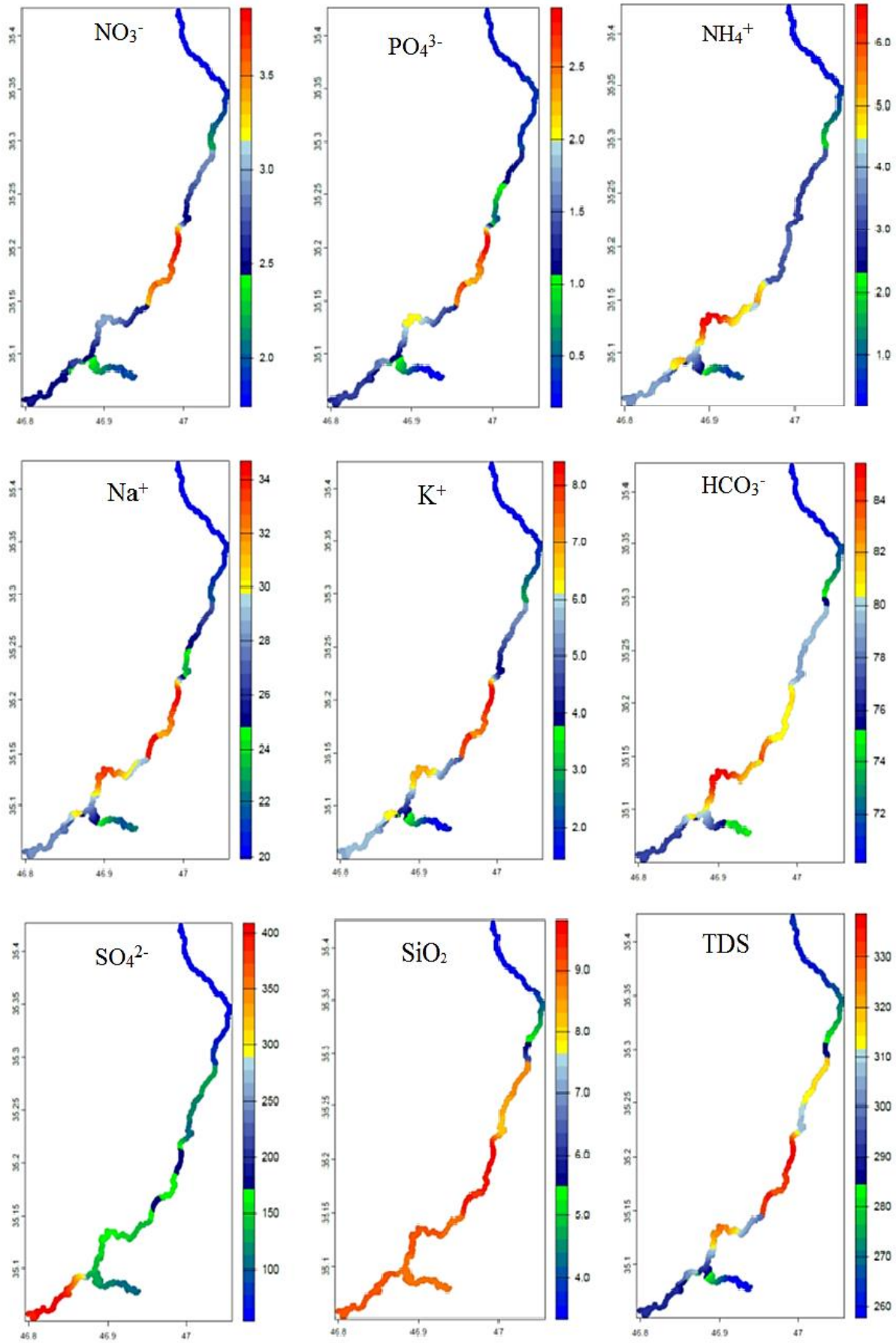
غلظت سدیم در تابستان افزایش قابل توجهی نسبت به زمستان داشت و کمترین و بیشترین مقادیر آن به ترتیب در ایستگاههای اول و سوم ثبت گردید (اشکال ۳ و ۴). سدیم به‌طور طبیعی در منابع آبی حضور دارد، اما تخلیه پساب‌های خانگی (به‌ویژه ناشی از مصرف شوینده‌ها) و آب برگشتی از زمین‌های آبیاری‌شده می‌تواند سهم عمده‌ای در افزایش غلظت آن داشته باشد (Halliwell et al., 2001). در زمستان، با وجود افزایش جریان و رقیق‌سازی، غلظت سدیم در ایستگاه سوم و چهارم همچنان بالاتر از سایر ایستگاه‌ها باقی ماند که نشان‌دهنده ورود مداوم آلاینده‌ها ست. یافته‌های مشابهی تو سط Ali et al. (2021) در رودخانه Ganga هند گزارش شد، جایی که بالاترین غلظت سدیم در پایین‌دست شهرهای پرجمعیت ثبت گردید. غلظت پتاسیم نیز مشابه سدیم در تابستان افزایش یافت و بیشترین مقدار در ایستگاه سوم مشاهده شد (اشکال ۳ و ۴). یکی از منابع اصلی پتاسیم، پساب خانگی و صنعتی است، اما نقش کشاورزی به‌ویژه کاربرد کودهای پتاسیمی نیز در این افزایش قابل توجه است (Tutor et al., 2024). در زمستان کاهش نسبی پتاسیم مشاهده گردید، اما تفاوت مکانی بین ایستگاه‌ها همچنان حفظ شد. به‌ویژه ایستگاه سوم و چهارم غلظت‌های بالاتری داشتند که نشان‌دهنده باقی‌ماندن اثر منابع انسانی است. بی‌کربنات یکی از مهم‌ترین آنیون‌های موجود در آب‌های سطحی است که عمدتاً از حل‌شدن کربنات‌ها و واکنش‌های ژئوشیمیایی حاصل می شود (Raut et al., 2025). نتایج نشان داد که غلظت بی‌کربنات در مقایسه با پارامترهای قبلی تغییرات فصلی کمتری داشت، اما الگوی مکانی آن به‌ویژه در ایستگاه‌های سوم و چهارم افزایش یافت (اشکال ۳ و ۴). این موضوع می‌تواند ناشی از ترکیب اثرات زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی باشد. در زمستان، افزایش جریان منجر به انحلال بیشتر مواد معدنی و در نتیجه افزایش اندک غلظت بی‌کربنات شد. یافته‌ها مشابه نتایج Raut et al. (2025) است که نشان دادند بیشینه غلظت بی‌کربنات پس از باران های مانسون افزایش یافت و بیشتر از تغییرات هیدرولوژیکی تبعیت می‌کند تا از منابع انسانی مستقیم. الگوی مکانی و فصلی سولفات در حوضه نشان‌دهنده ترکیبی از منابع طبیعی و انسانی است. اگرچه مقادیر پایه سولفات در سراسر حوضه حضور دارد که احتمالاً نشان‌دهنده حل‌شدن کانی‌های سولفاته و فرآیندهای ژئوشیمیایی بستر می‌باشد، افزایش نسبی سولفات در ایستگاه پایین‌دست تخلیه پساب فاضلاب نشان می‌دهد بخشی قابل‌توجه از سولفات موجود منشأ انسانی دارد (اشکال ۳ و ۴). منبع اصلی سیلیس، هوازدگی سنگ‌های سیلیکاتی و فرآیندهای زمین‌شناسی است (Dobrzyński, 2005). در زمستان، مقادیر اندکی افزایش یافت که می‌تواند ناشی از افزایش فرسایش و رواناب باشد. این الگو با نتایج Wang et al. (2021) همخوان است که گزارش کردند سیلیس در رودخانه‌های چین عمدتاً تحت کنترل ویژگی‌های زمین‌شناسی و نه منابع آلاینده انسانی قرار دارد.

- **تغییرات کل مواد محلول (TDS)**

الگوی مکانی و فصلی TDS نشان داد که این شاخص به‌طور بارز تحت تأثیر هم‌زمان عوامل طبیعی و انسانی قرار دارد. در تابستان، بیشترین مقادیر در ایستگاههای سوم و چهارم ثبت شدند و اختلاف آشکاری با ایستگاه مرجع (ایستگاه ۱) داشتند. این افزایش علاوه بر اثر مستقیم ورود پساب‌های فاضلاب شهری، نتیجه‌ی کاهش دبی جریان و افزایش تبخیر در فصل خشک است که باعث تمرکز بیشتر یون‌های محلول می‌شود. در زمستان، گرچه رقیق‌سازی ناشی از رواناب موجب کاهش نسبی TDS گردید، اما مقادیر آن در ایستگاه سوم و تا حدی ایستگاه چهارم همچنان بالاتر از سایر نقاط باقی ماند که نشان‌دهنده پایداری اثرات پساب حتی در شرایط پرآبی است (اشکال ۳ و ۴). همچنین، بررسی الگوی مکانی نشان داد که TDS در ایستگاه پنجم (گاوه‌رود) مقادیر پایین‌تری نسبت به ایستگاه‌های آلوده داشت، که نشان‌دهنده نقش این شاخه به‌عنوان رقیق‌کننده جریان اصلی است. در نهایت، ایستگاه ششم (خروجی سد ژاوه) نمایانگر ترکیب جریان‌ها بود؛ مقادیر TDS نسبت به ایستگاه سوم کاهش داشت اما همچنان بالاتر از مقادیر مرجع باقی ماند. این امر تأیید می‌کند که بارگذاری نقطه‌ای می‌تواند اثرات خود را در مقیاس حوضه‌ای نیز حفظ کند. از دیدگاه مدیریتی، مقادیر بالای TDS به‌ویژه در تابستان می‌تواند پیامدهای منفی برای کیفیت آب کشاورزی و شرب داشته باشد؛ زیرا افزایش بیش از حد یون‌های محلول به کاهش کیفیت خاک و شور شدن آن منجر می شود. بنابراین، کاهش بارگذاری نقطه‌ای از طریق ارتقای کارایی تصفیه‌خانه فاضلاب و مدیریت کاربری اراضی در حوضه می‌تواند نقش کلیدی در کنترل مقادیر TDS داشته باشد (Benaafi et al., 2024).



شکل ۳. تغییرات خصوصیات شیمیایی آب حوزه آبریز رودخانه های قشلاق، گاوه رود و سیروان در فصل تابستان با روش درون یابی فاصله معکوس.



شکل ۴. تغییرات خصوصیات شیمیایی آب حوزه آبریز رودخانه های قشلاق، گاوه رود و سیروان در فصل زمستان با روش درون یابی فاصله معکوس.

۴- نتیجه‌گیری

بررسی کیفی آب رودخانه‌های قشلاق، گاوه‌رود و سیروان نشان داد که تغییرات مکانی در کنار تغییرات فصلی، الگوهای متفاوتی از پراکنش آلاینده‌ها ایجاد می‌کند. یافته‌ها حاکی از آن ا ست که اگرچه بارش‌های زم ستانی می‌توانند موجب رقیق سازی جریان شوند، اما تخلیه‌های نقطه‌ای به‌ویژه از خروجی تصفیه‌خانه فاضلاب سنندج همچنان اثر غالب خود را بر کیفیت آب حفظ می‌کنند. این موضوع نشان می‌دهد که ظرفیت خودپالایی رودخانه محدود بوده و به‌تنهایی توان جبران فشار آلودگی را ندارد. در مقابل، شاخه گاوه‌رود با کیفیت نسبی بهتر، نقش حمایتی در کاهش غلظت آلاینده‌ها بر عهده دارد، اما این اثر در برابر بارگذاری شدید شهری کافی نیست. از دیدگاه مدیریتی، اولویت باید بر ارتقای فناوری و کارایی ت صفیه‌خانه فا ضلاب، کاهش ورودی کود و سموم ک شاورزی، و پایش م ستمر کیفیت آب با ابزارهای GIS و مدل‌های مکانی متمرکز شود. افزون بر این، نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از روش درون‌یابی فاصله معکوس (IDW) می‌تواند به‌عنوان ابزاری سریع و کارآمد در شناسایی نقاط بحرانی برای مدیران منابع آب به‌کار گرفته شود. استمرار چنین مطالعاتی، به‌ویژه با تلفیق داده‌های هیدرولوژیکی و زیستی، می‌تواند چشم‌انداز دقیق‌تری از پایداری اکوسیستم‌های آبی استان کردستان فراهم آورد.

منابع

- Aguilar-Torrejón, J. A., et al. 2023. Relationship, importance, and development of analytical techniques: COD, BOD, and TOC in water—An overview through time, SN Applied Sciences, Vol. 5, P. 118.
- Ali, S. Y., et al. 2021. Drinking water quality assessment of river Ganga in West Bengal, India through integrated statistical and GIS techniques, Water Science and Technology, Vol. 84, P. 2997–3017.
- APHA. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater (23rd ed.), American Public Health Association.
- Benaafi, M., et al. 2024. Suitability of treated wastewater for irrigation and its impact on groundwater resources in arid coastal regions: Insights for water resources sustainability, Heliyon, Vol. 10, e29320.
- Bilotta, G. S., Brazier, R. E. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota, Water Research, Vol. 42, P. 2849–2861.
- Camargo, J. A., Alonso, A. 2006. Ecological and toxicological effects of inorganic nitrogen pollution in aquatic ecosystems: A global assessment, Environment International, Vol. 32, P. 831–849.
- Carpenter, S. R., et al. 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen, Ecological Applications, Vol. 8, P. 559–568.
- Dobrzyński, D. 2005. Silica origin and solubility in groundwater from the weathered zone of sedimentary rocks of the Intra-Sudetic Basin, SW Poland, Acta Geologica Polonica, Vol. 55, P. 445-462.
- Goovaerts, P. 1997. Geostatistics for natural resources evaluation, Oxford University Press.
- Guildford, S. J., Hecky, R. E. 2000. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? Limnology and Oceanography, Vol. 45, P. 1213–1223.
- Halliwell, D. J., et al. 2001. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems, Soil Research, Vol. 39, P. 1259–1267.
- Hamdhani, H., et al. 2023. Seasonal and longitudinal water quality dynamics in three effluent-dependent rivers in Arizona, PeerJ, Vol. 11, e15069.
- Henley, W. F., et al. 2000. Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers, Reviews in Fisheries Science, Vol. 8, P. 125–139.
- Kearney, K. M., et al. 2023. Inverse distance weighting to rapidly generate large simulation datasets, Journal of Biomechanics, Vol. 158, 111764.
- Li, J., Heap, A. D. 2014. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review, Environmental Modelling and Software, Vol. 53, P. 173–189.
- Liu, Z. N., et al. 2021. The influence of distance weight on the inverse distance weighted method for ore-grade estimation, Scientific Reports, Vol. 11, P. 2689.

- Ma, C., et al. 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, Vol. 271, P. 104542.
- Moghimi Nezad, S., et al. 2018. Investigation of seasonal self-purification variations of Karun River, Iran, Amirkabir Journal of Civil Engineering, Vol. 49, P. 193–196.
- Raut, V., et al. 2025. Study of seasonal variation in groundwater geochemistry for beneficial use of drinking and irrigation in Aundha Nagnath tehsil of Maharashtra, India, Discover Sustainability, Vol. 6, 330.
- Saadi, H., 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, Vol. 61, 102695.
- Sajid, A. H., et al. 2013. Systematic evaluation of Kriging and inverse distance weighting methods for spatial analysis of soil bulk density, Canadian Biosystems Engineering, Vol. 55, P. 1.1–1.13.
- Smith, V. H., et al. 2006. Eutrophication of freshwater and coastal ecosystems, Limnology and Oceanography, Vol. 51, P. 351–355.
- Tutor, L., et al. 2024. Monitoring of potassium content in wastewater treatment plants, Journal of Central European Green Innovation, Vol. 12, P. 38–48.
- UNESCO. 2020. The United Nations world water development report 2020: Water and climate change, UNESCO Publishing.
- Vollenweider, R. A. 1976. Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, Vol. 33, P. 53–83.
- Wang, Y., et al. 2021. Coastal eutrophication in China: Trend, sources, and ecological effects, Harmful Algae, Vol. 107, 102058.
- WHO. 2017. Guidelines for drinking-water quality (4th ed.), World Health Organization.
- دادخواه تهرانی، م.، کریمی درمیان، س.، مریدی، ع.، خلیلی، ر.، ۱۴۰۲. ارزیابی کیفیت آب رودخانه چالوس بر اساس شاخص‌های کیفی IRWQIsc و NSFWQI، مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۸، شماره ۳، ص ۷۰۶۴-۷۰۷۲.
- دولت آبادی، ع.، ذوالفقاری، ق.، عثمانی، ن.، ۱۴۰۱. بررسی غلظت نیترات و فسفات در برخی گیاهان حاشیه رودخانه کال شور سبزوار، مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۷، شماره ۱، ص ۴۴۶۸-۴۴۷۷.