



Environmental Risk Assessment and Human Health Hazard Index in the Gorgan Rood River by Pyrethroid Insecticides

Ali Heshmatpour ^{1*} , Yusuf Mohammadian ²

1. Assoc. Prof., Dept. of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran
(Corresponding Author) heshmatpour@gonbad.ac.ir
2. Graduate, Dept. of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Gonbad Kavous University, Gonbad Kavous, Golestan, Iran



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.568185.3538>

Original Paper

Abstract

Cypermethrin and permethrin are two widely used pyrethroid insecticides in agriculture and household pest management, which can enter surface water sources through urban sewage and agricultural runoff due to their relative stability and high tendency to bind to sediment particles. The aim of the present study was to assess the environmental risk and human health hazard index based on the concentrations of cypermethrin and permethrin toxins in the Gorgan Rood River. Sampling was conducted at five stations and in two seasons, spring and summer 2024, repeated 3 times a week. After solid phase extraction, the samples were analyzed by high-performance liquid chromatography. The limit of detection was determined based on the signal-to-noise ratio (S/N=3) and using data from the HPLC instrument used in this study. The results showed that permethrin was not present in any of the samples, while cypermethrin increased from the upstream station to the downstream, especially in summer (maximum 0.43 ppm). In addition, the increase in cypermethrin concentration was accompanied by an increase in EC, TDS, water temperature, and a decrease in dissolved oxygen. The environmental risk assessment showed that in the summer season, the PEC/PNEC ratio at Basirabad station approached the warning threshold (0.22), while other stations were at a lower risk level. The health hazard quotient for humans at all stations was less than 1, indicating a direct non-carcinogenic risk through water consumption. This study, by providing empirical evidence, highlights the need for integrated water resources management to reduce ecological exposure to pyrethroids and emphasizes the need to develop management strategies based on continuous monitoring and reduction of pollutant loads in the Gorgan Rood River.

Keywords:

Cypermethrin, Gorgan Rood River, Permethrin, Risk Assessment, Urban and Agricultural Runoff.



Received: June 24, 2025

Revised: Sep. 5, 2025

Accepted: Sep. 30, 2025

To cite this article:

Heshmatpour, A., Mohammadian, Y., 2025. Environmental risk assessment and human health hazard index in the Gorgan Rood River by pyrethroid insecticides. *Water and Wastewater*, (In press). <https://doi.org/10.22093/wwj.2026.568185.3538>.

Use your device to scan and read the article online



1. Introduction

The widespread use of pesticides in recent decades, although it has played an important role in increasing agricultural production and controlling disease vectors, has also become a serious environmental and health challenge on a global scale (Shattuck et al., 2023). A significant portion of pesticides used, especially in developing countries, directly or indirectly enter the environment and cause pollution of surface and groundwater resources (Wang et al., 2025, Weston and Lydy, 2010). Among them, pyrethroid insecticides are of particular importance in water pollution monitoring studies due to their widespread use, relative stability, hydrophobicity, and high tendency to adsorb to sediments (Duan et al., 2025). These compounds can enter rivers through agricultural runoff, drainage, and urban wastewater and affect the quality of aquatic ecosystems and human health (Wang et al., 2025).

As one of the most important rivers in the north of the country, the Gorgan Rood River plays a vital role in providing agricultural water, sustaining aquatic ecosystems, and supporting the livelihoods of local communities in Golestan Province. However, the influx of urban wastewater, agricultural runoff, and reduced river flow in hot seasons have exposed the river to a variety of chemical pollutants, especially agricultural pesticides. Despite the importance of this issue, studies on the specific monitoring of pyrethroid insecticides in the rivers of northern Iran, especially the Gorgan Rood River, are limited. Therefore, the present study aimed to measure the concentrations of two widely used pyrethroid insecticides (cypermethrin and permethrin), investigate their spatial and seasonal changes, and assess the environmental and human health risks in the Gorgan Rood River.

2. Materials and methods

This research was conducted along the Gorgan Rood River at five sampling stations, including the downstream cities of Kalaleh, Gonbad-Kavoos, Aliabad-Katul, Aqqala, and Basirabad. The stations were selected based on the identification of potential point and non-point sources of pollution, the hydrological conditions of the river, and the distribution of human activities. Sampling was conducted in the spring and summer of 2024, at the same time as the peak use of agricultural pesticides and the reduction in river flow. At each station, three replicate samples of river water were collected and transferred to the laboratory after being stored in cold conditions.

Solid phase extraction¹ was used to extract insecticides, and high-performance liquid chromatography² was used to measure the concentrations of cypermethrin and permethrin. Data quality control and assurance, including recovery review, instrument calibration, and determination of the detection limit and quantification limit, were performed. In addition, physical-chemical parameters of water including pH, temperature, electrical conductivity³, total dissolved solids⁴ and dissolved oxygen were measured. To assess the environmental risk, the ratio of predicted environmental concentration⁵ to predicted no effect concentration⁶ was calculated. Also, to assess the risk to human health, the non-carcinogenic health hazard quotient⁷ was calculated based on the standard models of the US Environmental Protection Agency and hypothetical drinking water consumption. Statistical analyses including normality tests, analysis of variance and correlation between toxicant concentrations and water quality factors were performed using SPSS software.

3. Results and discussion

The results showed that permethrin was not detected in any of the river water samples in both spring and summer, which could be due to lower consumption, shorter half-life, or faster decomposition of this compound in the environmental conditions of the region. In contrast, cypermethrin was detected in the downstream stations of the river, especially Basirabad station, and showed a clear spatial and seasonal variation pattern (Fig. 1). Cypermethrin concentration increased from upstream to downstream and reached its maximum value in the summer season. This increasing trend can be attributed to the increase in pesticide consumption during the growth period of agricultural products, the inflow of urban wastewater, and the decrease in river flow in the warm season. Statistical analysis of water quality factors showed that the increase in cypermethrin concentration is associated with an increase in EC, TDS, and water temperature, and a decrease in dissolved oxygen.

¹ Solid Phase Extraction (SPE)

² High-Performance Liquid Chromatography (HPLC)

³ Electrical Conductivity (EC)

⁴ Total Dissolved Solids (TDS)

⁵ Predicted Environmental Concentration (PEC)

⁶ Predicted No Effect Concentration (PNEC)

⁷ Hazard Quotient (HQ)



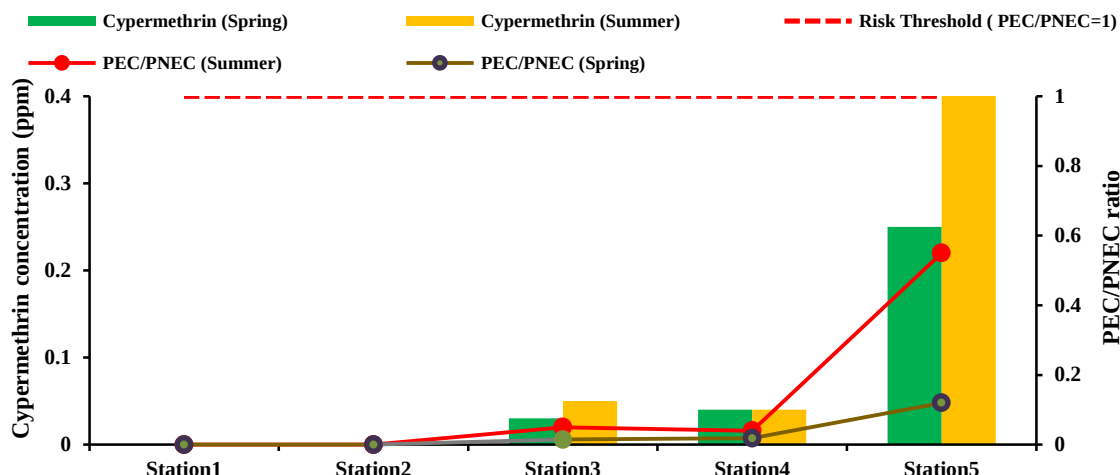


Fig. 1. Seasonal variation of cypermethrin concentration and risk ratio (PEC/PNEC) and human risk level Gorgan Rood River

These results indicate the effective role of urban wastewater and agricultural drainage in the transport and accumulation of this insecticide in the downstream sections of the river. From an environmental perspective, the risk assessment results showed that the PEC/PNEC ratio is in the low-risk range in spring at all stations, but in summer and at Basirabad station, it approaches the warning threshold. Given the high toxicity of pyrethroids to aquatic organisms even at low concentrations, this situation can be considered a potential threat to the Gorgan Rood River ecosystem. In terms of human health, the HQ values were obtained at all stations and in both seasons, which indicates the absence of direct non-carcinogenic risk through drinking water consumption. However, it should be noted that cumulative exposure from indirect routes such as consumption of agricultural products, dermal contact, and the food chain can be more important in the long term.

4. Conclusions

The results of this study showed that although the direct risk to human health through the consumption of water from the Gorgan Rood River is negligible under current conditions, the presence and seasonal accumulation of cypermethrin at downstream stations, especially in the summer, can pose a significant environmental risk to aquatic ecosystems. The increase in the concentration of this insecticide is directly related to human activities, especially agriculture and the discharge of urban wastewater. Accordingly, continuous monitoring of river water quality and sediments, improving wastewater treatment processes, managing pesticide consumption, and educating agricultural operators are among the most important proposed solutions to reduce the burden of pyrethroid pollution in the Gorgan Rood watershed. This research can be used as a scientific basis for management decisions and environmental policies to protect surface water resources in the region.





ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و شاخص خطر سلامت انسان در رودخانه گرگان‌رود توسط حشره‌کش‌های پیرتروئیدی

علی حشمت‌پور^{۱*}، یوسف محمدیان^۲

۱- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، گلستان، ایران
(نویسنده مسئول) heshmatpoor@gonbad.ac.ir
۲- دانش‌آموخته، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبدکاووس، گنبدکاووس، گلستان، ایران



<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.568185.3538>

مقاله پژوهشی

چکیده

سایپرترین و پرمترین دو ترکیب پرمصرف از حشره‌کش‌های پیرتروئیدی در کشاورزی و مدیریت آفات خانگی هستند که به دلیل پایداری نسبی و تمایل بالا در اتصال به ذرات رسوبی، می‌توانند از طریق فاضلاب شهری و رواناب‌های کشاورزی وارد منابع آب سطحی شوند. هدف این پژوهش، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و شاخص خطر سلامت انسان بر مبنای غلظت‌های سموم سایپرترین و پرمترین در رودخانه گرگان‌رود بود. نمونه‌برداری در پنج ایستگاه و در دو فصل بهار و تابستان ۱۴۰۳ با تکرار ۳ بار در هفته انجام شد. بعد از استخراج فاز جامد، آنالیز نمونه‌ها توسط دستگاه HPLC انجام شد. حد تشخیص بر اساس نسبت سیگنال به نویز (S/N=3) و با استفاده از داده‌های دستگاه HPLC استفاده شده در این پژوهش تعیین شد. نتایج نشان داد که پرمترین در هیچ‌یک از نمونه‌ها وجود نداشت، در حالی که سایپرترین از ایستگاه بالادست به پایین‌دست رودخانه خصوصاً در تابستان روند افزایشی داشت (حداکثر ۰/۴۳ ppm). بعلاوه، افزایش غلظت سایپرترین با افزایش TDS، EC، دمای آب و کاهش اکسیژن محلول همراه بود. ارزیابی ریسک زیست‌محیطی نشان داد که در فصل تابستان نسبت PEC/PNEC در ایستگاه بصیرآباد به آستانه هشدار نزدیک شده است (۰/۲۲)، در حالی که سایر ایستگاه‌ها در سطح ریسک پایین‌تری قرار داشتند. شاخص خطر سلامت برای انسان در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بود و نشان‌دهنده خطر غیر سرطانی مستقیم از طریق مصرف آب بود. این پژوهش با ارائه شواهد تجربی، لزوم مدیریت یکپارچه منابع آب برای کاهش مواجهه اکولوژیک با پیرتروئیدها را برجسته می‌کند و بر ضرورت تدوین راهبردهای مدیریتی مبتنی بر پایش مستمر و کاهش بار آلاینده‌ها در رودخانه گرگان‌رود تأکید دارد.

واژه‌های کلیدی:

سایپرترین، رودخانه
گرگان‌رود، پرمترین،
ارزیابی ریسک، رواناب
شهری و کشاورزی



دریافت: ۱۴۰۴/۴/۳

اصلاح: ۱۴۰۴/۶/۱۴

پذیرش: ۱۴۰۴/۷/۸

از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به
صورت آنلاین استفاده کنید



برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

حشمت‌پور، ع.، محمدیان، ی.، ۱۴۰۴، ارزیابی ریسک زیست‌محیطی و شاخص خطر سلامت انسان در رودخانه گرگان‌رود
توسط حشره‌کش‌های پیرتروئیدی، آب و فاضلاب. (در حال انتشار)
<https://doi.org/10.22093/wwj.2026.568185.3538>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

۱- مقدمه

آفت‌کش‌ها از نیمه دوم قرن بیستم به‌عنوان یکی از ابزارهای اصلی برای افزایش تولیدات کشاورزی و کنترل بیماری‌های ناقل توسط حشرات به کار گرفته شده‌اند. امروزه مصرف جهانی آن در کشورهای در حال توسعه تا ۱۵۳ درصد رشد یافته (Shattuck et al., 2023) و نقشی کلیدی در امنیت غذایی و کیفیت محصولات ایفا کرده است.

از طرف دیگر، گسترش و تنوع مصرف آفت‌کش‌ها چالش‌های زیست‌محیطی و بهداشتی گسترده‌ای در سطح جهان ایجاد کرده است. بخش عمده‌ای از آن‌ها بیش از ۹۵ درصد (Miller, 2000) وارد محیط شده و موجب آلودگی خاک، آب‌وهوا، کاهش تنوع زیستی و تهدید گونه‌های غیر هدف مانند زنبورها شده است (UNEP, 2025).

از نظر سلامت انسان نیز، تماس مستقیم یا غیرمستقیم با این ترکیبات با اختلالات مزمن همچون سرطان، مشکلات عصبی و ناباروری مرتبط است و طبق گزارش WHO در سال ۲۰۱۶ حدود ۱/۶ میلیون مرگ ناشی از مواد شیمیایی از جمله آفت‌کش‌های بسیار خطرناک ثبت شده است (WHO, 2023).

علاوه بر این، هزینه‌های اجتماعی و اقتصادی ناشی از مصرف آفت‌کش‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، نگرانی‌های گسترده‌ای ایجاد کرده و نمونه‌هایی مانند استفاده از دی‌کوات در برزیل باوجود ممنوعیت در اروپا، پیامدهای اخلاقی و زیست‌محیطی را پررنگ کرده است (Das, 2024).

در پاسخ به این خطرات، سازمان‌های بین‌المللی چون WHO و UNEP بر ضرورت مدیریت عاقلانه مواد شیمیایی و توسعه سیاست‌های جایگزین تأکید دارند. از این رو پایش مستمر و نظام‌مند این ترکیبات در محیط زیست، همراه با شناسایی منابع انتشار، ارزیابی مخاطرات اکولوژیکی و بهداشتی و توسعه راهکارهای پیشگیرانه و کنترلی، به‌عنوان گامی اساسی برای کاهش پیامدهای زیست‌محیطی و تضمین سلامت جوامع انسانی و پایداری اکوسیستم‌ها امری ضروری به شمار می‌رود. در میان آفت‌کش‌های مرسوم آفت‌کش‌های پیرتروئیدی به‌عنوان یکی از پرمصرف‌ترین گروه‌های حشره‌کش‌ها در جهان شناخته می‌شوند و با ارزش بازاری چند میلیارد دلاری، نقش مهمی در کنترل آفات، بیماری‌های ناقل حشره و مصارف خانگی ایفا می‌کنند (Duan et al., 2025).

از آنجاکه این ترکیبات ویژگی‌های هیدروفوبی و تمایل بالایی به جذب بر روی ذرات جامد دارند، عمدتاً از طریق رواناب سطحی ناشی از بارش‌های شدید که ذرات خاک و مواد آلی آلوده را از مزارع کشاورزی شسته و به مجاری آب منتقل می‌کند، به سیستم‌های آبی راه می‌یابند. از جنبه رفتار محیطی نیز، این آفت‌کش‌ها پایداری متوسطی دارند. نیمه عمر در خاک با توجه به شرایط محیطی (مانند pH، دما، فعالیت میکروبی و مواد آلی) می‌تواند از چندین روز تا چند ماه متغیر باشد. در سیستم‌های آبی، نیمه عمر این ترکیبات عمدتاً تحت تأثیر فرایندهای تجزیه نوری و هیدرولیز قرار دارد و معمولاً از چند روز تا چند هفته گزارش شده است (Aznar-Alemanly and Eljarrat, 2020).

این پایداری نسبی، همراه با قابلیت تجمع در رسوبات، پتانسیل ایجاد نگرانی برای تماس طولانی‌مدت اکوسیستم‌های آبی و موجودات زنده را فراهم می‌آورد. باوجود تمایل بالای آفت‌کش‌های پیرتروئیدی نظیر سایپرمترین^۱ به جذب بر روی ذرات معلق و مواد آلی رسوبات (به دلیل ضریب توزیع اکتانول-آب بالا)، این ترکیبات به‌صورت کامل در فاز جامد تثبیت نمی‌شوند و تحت شرایط محیطی خاص قابلیت جذب و بازگشت به فاز آبی را دارند (Hladik and Kuivila, 2012).

فرایند جذب می‌تواند تحت تأثیر عواملی مانند تغییرات pH، افزایش دما، تغییر در قدرت یونی، آشفتگی جریان و کاهش مواد آلی محلول تسهیل شود (Wang et al., 2025). در نتیجه، رسوبات می‌توانند به‌عنوان یک مخزن و منبع ثانویه آلودگی عمل کرده و در شرایط نوسانات هیدرولوژیکی، موجب آزادسازی مجدد آلاینده‌ها به فاز آبی شوند. این پویایی بین فاز جامد و مایع نقش مهمی در تعیین سرنوشت زیست‌محیطی و تداوم حضور این ترکیبات در اکوسیستم‌های آبی ایفا می‌کند. مکانیسم‌های ثانویه شامل فرسایش بادی و انتقال ذرات آلوده و نیز تخلیه پساب‌های مربوط به شستشوی ادوات سم‌پاشی یا محلول‌های باقیمانده می‌تواند به‌صورت غیرمستقیم به شبکه‌های جمع‌آوری آب سطحی نفوذ کند. این مسیرها منجر به توزیع آلاینده در ستون آب و تجمع قابل توجه آن در بستر رسوبی رودخانه می‌شود که به‌عنوان یک منبع ثانویه آلودگی برای اکوسیستم‌های آبی عمل می‌کند (Wang et al., 2025, Weston and Lydy, 2010).

¹ Cypermethrin



رودخانه‌گران رود، به عنوان یکی از مهم‌ترین سامانه‌های آب سطحی استان گلستان، به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه و قرارگیری در محل تلاقی چندین شاخه فرعی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تأمین منابع آبی، پایداری اکوسیستم‌های آبی و فعالیت‌های کشاورزی منطقه ایفا می‌کند. با این حال، این رودخانه به‌طور فزاینده‌ای تحت فشار منابع مختلف آلودگی، به‌ویژه آلاینده‌های شیمیایی ناشی از فعالیت‌های انسانی، قرار دارد. ورود فاضلاب‌های شهری، پساب‌های روستایی، زه‌آب‌های کشاورزی و در برخی مقاطع، فاضلاب‌های صنعتی، کیفیت آب این رودخانه را به‌طور جدی تحت تأثیر قرار داده است.

در این میان، استفاده گسترده از سموم کشاورزی در اراضی زراعی حاشیه‌گران رود، یکی از مهم‌ترین منابع بالقوه آلودگی شیمیایی آب‌های سطحی به شمار می‌رود. به‌طوری‌که آمار سازمان جهاد کشاورزی استان گلستان در سال ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که مجموع مصرف سموم کشاورزی در این استان بالغ بر ۲۰۰۹۳۵۳ کیلوگرم بوده است که از این مقدار، ۹۱۴۷۵۸ کیلوگرم به حشره‌کش‌ها، ۵۶۲۷۳۰ کیلوگرم به علف‌کش‌ها، ۴۵۶۵۰۲ کیلوگرم به قارچ‌کش‌ها و ۶۶۳۶۴ کیلوگرم به سایر انواع سموم اختصاص داشته است. چنین حجمی از مصرف سموم، احتمال انتقال ترکیبات فعال آنها به منابع آب سطحی را از طریق رواناب و زه‌آب به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افزایش می‌دهد. ویژگی‌های زمین‌شناسی و خاک‌شناسی استان گلستان نیز شرایط را برای تشدید آلودگی فراهم می‌کند. غالب خاک‌های منطقه از نوع دانه‌ریز (سیلتی و رسی) بوده و بیش از ۴۵۰ هزار هکتار از اراضی استان با نهشته‌های لسی پوشیده شده است. این نوع پوشش خاک، به دلیل نفوذپذیری پایین و حساسیت بالا به فرسایش آبی، مستعد تولید رواناب و انتقال آلاینده‌ها به شبکه آب‌های سطحی است.

از سوی دیگر، کاهش دبی رودخانه در فصول گرم سال که هم‌زمان با اوج مصرف آفت‌کش‌ها در دوره‌های زراعی است، می‌تواند منجر به افزایش غلظت و تجمع این ترکیبات در آب رودخانه و تسهیل انتقال آن‌ها در طول مسیر جریان شود. با وجود اهمیت بالقوه این تهدید زیست‌محیطی، تاکنون مطالعات محدودی در زمینه پایش هم‌زمان آفت‌کش‌ها، به‌ویژه حشره‌کش‌های پیرتروئیدی، در رودخانه‌های شمال کشور انجام شده است. از این رو، پژوهش حاضر برای نخستین بار در استان گلستان، به

همچنین در برخی موارد، پساب‌های تصفیه نشده واحدهای بسته‌بندی یا شستشو ممکن است به‌طور مستقیم به آب‌های سطحی راه یابند. این مسئله خصوصاً در رودخانه‌هایی که نقطه اتصال پساب شهری و منابع کشاورزی و صنعتی هستند، اهمیت بیشتری می‌یابد. اهمیت بررسی این موضوع به آن دلیل است که پیرتروئیدها اگرچه نسبت به سایر آفت‌کش‌ها مانند ارگانوفسفره کم‌خطرتر معرفی می‌شوند، اما اثرات تجمعی و زیست‌محیطی آن‌ها به‌ویژه در اکوسیستم‌های آبی قابل چشم‌پوشی نیست. این ترکیبات می‌توانند موجب اختلال در زنجیره غذایی آبیان شده، بر سلامت آب آشامیدنی تأثیر بگذارند و حتی پیامدهای غیرمستقیم بر سلامت انسان داشته باشند (Miller, 2000, Wang et al., 2025).

همچنین قرار گرفتن مزمن در معرض پیرتروئیدها، حتی در غلظت‌های کم، با سمیت عصبی رشدی، اختلال در سیستم غدد در انسان مرتبط بوده است. ماهیت لیپوفیلیک این ترکیبات منجر به تجمع زیستی در بافت چربی شده و مواجهه طولانی‌مدت ممکن است خطر بیماری پارکینسون و اختلالات باروری را افزایش دهد (WHO, 2022, USEPA, 2019). این نگرانی‌ها اهمیت پایش این ترکیبات در منابع آب و ارزیابی ریسک سلامت انسان را دوچندان می‌کند. سیستم‌های متداول تصفیه فاضلاب‌های شهری نیز حتی پس از تصفیه، قادر به حذف کامل این ترکیبات نیستند و مقداری از پیرتروئیدها از خروجی تصفیه‌خانه‌ها وارد اکوسیستم‌های آبی می‌شوند (Simarro-Gimeno et al., 2025).

علی‌رغم مطالعات گسترده در سطح جهانی درباره آلودگی منابع آبی با انواع آفت‌کش‌ها، در زمینه بررسی ویژه پیرتروئیدها در فاضلاب‌های شهری و رودخانه‌های مناطق شمالی ایران، پژوهش‌های کافی انجام نشده است. اکثر مطالعات داخلی (Baghbani-Arani and Adavi, 2021, Moharami, 2024, Fadaei Tehrani and Jamshidipoor, 2024, Samadi et al., 2010, Motie Tabar et al., 2022, Masoomi, 2021, Ghaziani et al., 2020, Heshmatpour et al., 2020) بیشتر بر روی آلودگی‌های ناشی از کودها و سموم فسفره یا کاربامات‌ها متمرکز بوده و کمتر به بررسی کمی و کیفی پیرتروئیدها پرداخته‌اند. این کمبود تحقیقاتی، به‌ویژه در مورد ارتباط بین پساب‌های شهری و بار آلودگی این ترکیبات در منابع آبی سطحی همچون گران رود، توجه انجام این پژوهش را برجسته می‌سازد.



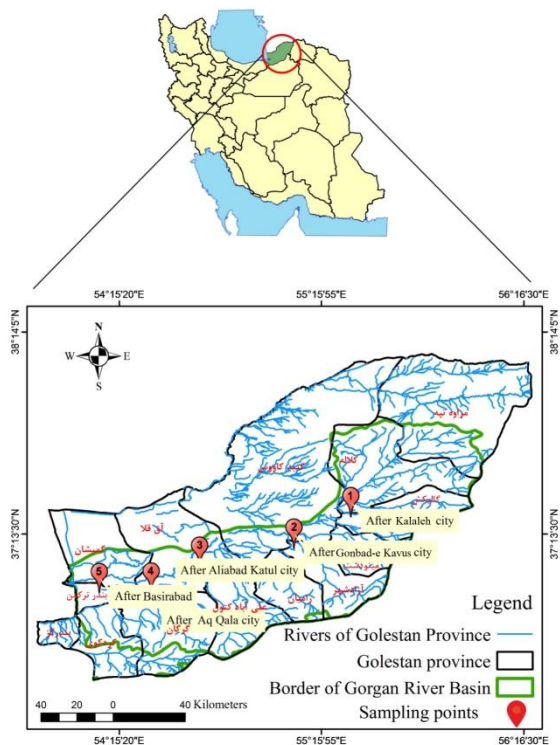


Fig. 1. Geographical location of the study area relative to Iran and sampling points

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نسبت به ایران و نقاط نمونه‌برداری

جریان رودخانه و امکان دسترسی برای نمونه‌برداری پنج ایستگاه، در نقاط پایین‌دست و مجاور مناطق شهری و تخلیه‌گاه‌های پساب انتخاب شدند. این رویکرد امکان بررسی الگوی انتشار آلاینده و تأثیر ترکیبی رواناب کشاورزی و پساب‌های شهری را بر کیفیت آب رودخانه فراهم می‌کند. این ایستگاه‌ها به ترتیب: ۱- پایین‌دست خروجی شهرهای کلالة، ۲- گنبدکاوس، ۳- علی‌آباد، ۴- آق‌قلا و ۵- بصیرآباد است (شکل ۱). انتخاب این ایستگاه‌ها با در نظر گرفتن اصول هیدرولوژیکی و به منظور پایش تدریجی بار آلودگی و ارزیابی سهم منابع مختلف آلاینده انجام شد.

نمونه‌برداری طبق استاندارد ISO 5667-6:2014 (کیفیت آب - نمونه‌برداری - بخش ۶: راهنمای نمونه‌برداری از رودخانه‌ها و نه‌رها) و راهنمای سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده برای نمونه‌برداری از آب‌های سطحی (سازمان حفاظت محیط‌زیست ایالات متحده، ۲۰۰۷) انجام شد. عملیات نمونه‌برداری در دو فصل بهار (فروردین و اردیبهشت) و تابستان (تیر و مرداد) (۱۴۰۳)،

اندازه‌گیری و تحلیل هم‌زمان غلظت حشره‌کش‌های پیرتروئیدی در رودخانه گرگان رود پرداخت. هدف اصلی این پژوهش، شناسایی و ارزیابی سطح آلودگی به پیرتروئیدها، بررسی الگوی مکانی انتشار آن‌ها، تحلیل تأثیر احتمالی پساب‌های شهری بر کیفیت آب رودخانه و در نهایت، ارزیابی جامع ریسک زیست‌محیطی و شاخص خطر سلامت انسان ناشی از این آلاینده‌ها بود. یافته‌های این پژوهش می‌تواند به عنوان پایه‌ای علمی برای تدوین اقدامات مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های بهداشتی و زیست‌محیطی در حوزه آبریز گرگان رود استفاده شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه گرگان رود از ارتفاعات گلی داغ و پارک ملی گلستان سرچشمه می‌گیرد و پس از گذاشتن از گنبدکاوس و آق‌قلا در غرب خواجه نفس به دریای خزر می‌ریزد. این رودخانه در قسمت جنوب شرقی دریای خزر واقع شده است. جهت جریان آب رودخانه یاد شده از شرق به غرب است و نزدیک به ۶۷ درصد آب سطحی استان گلستان (حدود ۸۲۸ میلیون مترمکعب) در این حوزه جریان دارد (Zare Garizi et al., 2024, Ghaziani et al., 2020).

از نظر موقعیت این حوزه بین عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه شمالی تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی و در طول ۵۴ درجه و ۳ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۱۳ دقیقه شرقی قرار دارد. در این حوزه حداکثر ارتفاع در حدود ۳۶۰۰ متر و حداقل آن ۲۶ متر از سطح دریا است. مساحت این حوزه در حدود ۱۰۵۷۰ کیلومترمربع است. آب‌های سطحی در این حوزه با رژیم برفی - بارانی همراه هستند، به‌طوری‌که رودخانه‌های آن از کوه‌هایی که بین ۲۵۰۰ تا ۳۰۰۰ متر ارتفاع دارند سرچشمه می‌گیرند (Heshmatpour and Sajjadi, 2025).

۲-۲- روش آماده‌سازی و تهیه نمونه‌های آب

پس از بررسی و شناسایی منابع بالقوه آلودگی شامل ورودی‌های نقطه‌ای (فاضلاب‌های شهری، روستایی) و ورودی‌های غیر نقطه‌ای (زه‌آب‌های کشاورزی)، محل‌های ورود آلاینده‌ها به رودخانه گرگان رود مشخص شد. با توجه به موقعیت منابع آلاینده، شرایط



حشره‌کش پرمترین و سایپرمتترین به‌عنوان نمونه‌های استاندارد انتخاب شدند. این ترکیبات از پرکاربردترین حشره‌کش‌ها در کشاورزی و کنترل آفات خانگی در منطقه به شمار می‌آیند و به دلیل پایداری نسبی، اثرگذاری بالا و دسترسی آسان، برای استفاده در آزمایش‌های اعتبارسنجی روش و مقایسه با نمونه‌های محیطی بسیار مناسب هستند. با توجه به تفاوت خواص فیزیکی و شیمیایی سایر پیرتروئیدها و محدودیت در اندازه‌گیری دقیق آن‌ها، تنها این دو ترکیب در این پژوهش ارزیابی شد. برای شناسایی و تعیین کمی غلظت پرمترین و سایپرمتترین از دستگاه کروماتوگرافی مایع با کارایی بالا (HPLC) استفاده شد. این روش یکی از پرکاربردترین و دقیق‌ترین روش‌های جداسازی، شناسایی و اندازه‌گیری ترکیبات آلی در نمونه‌های پیچیده است و قابلیت تشخیص مقدار بسیار کم (در حد نانوگرم در لیتر) از آلاینده‌ها را دارد. در این فرایند، اجزای موجود در نمونه پس از تزریق به ستون کروماتوگرافی، با توجه به تفاوت در برهم‌کنش با فاز ساکن و فاز متحرک، در زمان‌های متفاوت از ستون خارج شده و به آشکارساز می‌رسند. به‌منظور اعتبارسنجی روش، پارامترهایی شامل خطی بودن، دقت و حد تشخیص^۴ بررسی شد. حد تشخیص بر اساس نسبت سیگنال به نویز (S/N=3) و حد کمی سازی^۵ بر اساس S/N=10 و با استفاده از داده‌های دستگاه HPLC تعیین شد.

۲-۵- کنترل و تضمین کیفیت

به‌منظور اطمینان از صحت، دقت و تکرارپذیری داده‌های حاصل از اندازه‌گیری حشره‌کش‌های پیرتروئیدی در نمونه‌های آب، مجموعه‌ای از اقدامات کنترل و تضمین کیفیت مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد (ISO/IEC17025, 2017, USEPA, 2007) انجام شد. برای ارزیابی صحت نتایج، از نمونه‌های تکراری و نمونه‌های اسپایک شده استفاده شد. بازیافت ترکیبات هدف در نمونه‌های اسپایک شده در محدوده ۸۵ تا ۱۰۵ درصد و انحراف معیار نسبی کمتر از ۱۰ درصد بود که نشان‌دهنده دقت و صحت مناسب روش استفاده شده است. برای کالیبراسیون دستگاه HPLC از محلول‌های استاندارد سایپرمتترین و پرمترین در غلظت‌های

هم‌زمان با اوج استفاده از آفت‌کش‌ها و جریان کم رودخانه انجام شد. در هر ایستگاه، نمونه‌برداری سه بار در هفته در روزهای غیرمتوالی (دوشنبه، چهارشنبه، جمعه) تکرار شد تا تغییرات زمانی ثبت شود. در هر رویداد نمونه‌برداری، سه نمونه تکرار مستقل از عمق ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در همگن‌ترین قسمت جریان جمع‌آوری شد. این تکرارها باهم ترکیب نشدند و هرکدام به‌طور جداگانه پردازش شدند تا تغییرات ذاتی در نقطه نمونه‌برداری تخمین زده شود. تمام نمونه‌ها در بطری‌های شیشه‌ای قهوه‌ای با درپوش تفلونی جمع‌آوری شدند (این ظروف مطابق اصول روش‌های EPA/ISO با حلال متانول و آب مقطر دو بار شستشو و خشک شده بودند). پس از تهیه، نمونه‌ها بلافاصله در دمای حدود ۴ درجه سلسیوس در یخدان نگهداری و به آزمایشگاه مرکزی دانشگاه گنبدکاووس منتقل شدند. بر روی هر ظرف نمونه، تاریخ، نام ایستگاه و شرایط هوا و دبی ثبت شد.

۲-۳- مواد و معرف‌ها

در این پژوهش، استانداردهای خالص سایپرمتترین و پرمترین^۱ (با خلوص بالاتر از ۹۸ درصد) از شرکت خاتم (گرگان، ایران) تهیه شدند. حلال‌های مورد استفاده شامل متانول و استونیتریل با درجه (Merck, Germany) HPLC^۲ بودند. برای استخراج فاز جامد^۳، از کارتریج‌های Oasis HLB (6 mL, 200–500 mg, Waters, USA) به‌منظور حذف رطوبت از سدیم سولفات بی‌آب (Na₂SO₄, Merck) استفاده شد. فیلترهای غشایی با قطر منافذ ۰/۴۵ میکرومتر (Whatman) برای فیلتراسیون نمونه‌ها به کار رفتند. کلیه محلول‌های استاندارد با استفاده از آب دیونیزه تهیه شدند.

۲-۴- آماده‌سازی استانداردها و تحلیل دستگاه HPLC

از آنجایی‌که تمرکز این پژوهش بر اندازه‌گیری حشره‌کش‌های پیرتروئید در فاضلاب‌های شهری و رودخانه‌گرگان رود است، استفاده از ترکیباتی که معمولاً در این محیط‌ها حضور دارند و به‌طور گسترده در محصولات کشاورزی و خانگی کاربرد دارند، دو

^۴ Limit of Detection (LOD)

^۵ Limit of Quantification (LOQ)

^۱ Permethrin

^۲ High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

^۳ Solid Phase Extraction (SPE)

مدت زمان تماس (۳۰ سال برای بزرگسالان)، BW: وزن بدن (۷۰ کیلوگرم برای بزرگسالان)، AT: زمان میانگین برحسب روز (ED×۳۶۵)، RFD: پرمترین ۰/۰۵ و سایپرمتترین ۰/۰۲۵ میلی‌گرم بر کیلوگرم وزن بدن در روز است.

در صورتی که مقدار HQ کمتر از ۱ باشد، خطر غیر سرطان‌زایی قابل توجهی برای سلامت انسان وجود ندارد، درحالی‌که اگر HQ بیشتر یا مساوی ۱ باشد، احتمال بروز اثرات زیان‌بار بر سلامت انسان افزایش می‌یابد. این روش به‌طور گسترده در ارزیابی خطر آلاینده‌های آلی پایدار و حشره‌کش‌های سنتتیک در آب‌های سطحی استفاده شده است (Zhao et al., 2020, Qu et al., 2024).

برای مقدار کمتر از حد تشخیص^۴ با استفاده از روش جایگزینی داده و به‌صورت نیمی از حد تشخیص (LOD/2) در نظر گرفته شدند که این رویکرد مطابق با دستورالعمل‌های استاندارد بین‌المللی در تحلیل داده‌های محیطی است (WHO, 2011, USEPA, 1994).

به‌منظور بررسی پیامدهای زیست‌محیطی این ترکیبات در اکوسیستم‌های آبی، از شاخص ضریب ریسک^۵ استفاده شد. این شاخص از نسبت غلظت اثر پیش‌بینی شده در محیط^۶ به غلظت بدون اثر^۷ محاسبه می‌شود. معادله ۳ و مقدار آن برای تعیین سطح ریسک زیست‌محیطی استفاده می‌شود (Suter, 2008, Hansen et al., 2017).

$$RQ = \frac{PEC}{PNEC} \quad (۳)$$

$$RQ = \frac{PEC}{PNEC} \quad (۴)$$

که در آن

PEC: غلظت واقعی یا پیش‌بینی شده در محیط است و PNEC: غلظتی که انتظار می‌رود زیر آن، اثر منفی رخ ندهد. مقدار RQ کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده ریسک پایین، مقدار بین ۰/۱ تا ۱ بیانگر

مختلف (۵/۲، ۵ و ۱۰ ppb) استفاده شد و منحنی کالیبراسیون با ضرایب همبستگی (R² ۰/۹۹۵) بیش از ۰/۹۹۵ به دست آمد که بیانگر خطی بودن پاسخ دستگاه در محدوده غلظت‌های مورد بررسی است. حد تشخیص و حد سنجش به ترتیب با نسبت سیگنال به نویز ۳ و ۱۰ تعیین شدند. برای جلوگیری از انحرافات دستگاهی، کالیبراسیون روزانه سیستم HPLC قبل از هر سری آنالیز انجام شد. صحت شناسایی پیک‌ها نیز با مقایسه زمان بازداری نمونه‌ها با محلول‌های استاندارد معتبر تأیید شد. این رویکردهای کنترل و تضمین کیفیت موجب افزایش اطمینان از اعتبار داده‌ها و قابلیت تکرارپذیری نتایج شدند و با معیارهای معتبر بین‌المللی در زمینه تجزیه شیمیایی آلاینده‌های آلی سازگار هستند (Ambrus et al., 2023, ISO/IEC17025, 2017, USEPA, 2007).

۲-۶- ارزیابی ریسک بهداشتی و زیست‌محیطی

برای ارزیابی خطر بهداشتی ناشی از تماس انسان با باقیمانده حشره‌کش‌های پیرتروئیدی (پرمترین و سایپرمتترین) در نمونه‌های آب سطحی و فاضلاب شهری، از مدل‌های استاندارد سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا^۱ استفاده شد. این روش بر اساس محاسبه دوز روزانه دریافتی از بلع و مقایسه آن با مقدار مرجع^۲ طراحی شده است. شاخص خطر سلامت^۳ برای هر ترکیب از معادله ۱ به دست می‌آید

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} \quad (۱)$$

در این معادله، ADD با استفاده از معادله ۲ برآورد می‌شود

$$ADD = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad (۲)$$

که در آن

ADD: میانگین دوز روزانه، C: غلظت آلاینده (mg/L) در نمونه آب، IR: نرخ مصرف روزانه آب آشامیدنی (۲ لیتر در روز برای بزرگسالان)، EF: دفعات تماس در سال (۳۶۵ روز)، ED:

⁴ Not Detected (ND)

⁵ Risk Quotient (RQ)

⁶ Predicted Effect Concentration (PEC)

⁷ Predicted No Effect Concentration (PNEC)

¹ United States Environmental Protection Agency (USEPA)

² Reference Dose (RfD)

³ Hazard Quotient (HQ)



ریسک متوسط و مقدار بیشتر از ۱ نشان‌دهنده ریسک بالای زیست‌محیطی هستند.

۷-۲- کنترل کیفیت داده‌ها در تحلیل آماری

به‌منظور افزایش دقت و قابلیت اعتماد به داده‌های به‌دست‌آمده از اندازه‌گیری غلظت سموم پرمترین و سایپرمتترین و فاکتورهای کیفی آب، کلیه داده‌ها پیش از تحلیل آماری مورد ارزیابی کیفیت قرار گرفتند. داده‌های خام ابتدا از نظر وجود مقدار پرت با استفاده از آزمون Grubbs test بررسی شدند و داده‌های غیرمنطقی یا خارج از محدوده فنی حذف شدند. به‌منظور ارزیابی توزیع داده‌ها، آزمون Kolmogorov-Smirnov بر روی کلیه متغیرها اعمال شد تا نرمال بودن یا نبودن داده‌ها مشخص شود. در مواردی که توزیع داده‌ها نرمال نبود، از تبدیل‌های لگاریتمی و جذر استفاده شد تا شرایط لازم برای آزمون‌های پارامتریک فراهم شد. برای مقایسه میانگین غلظت‌ها در ایستگاه‌ها و فصول مختلف، از آزمون ANOVA یک‌طرفه و در صورت معنی‌دار بودن نتایج ($p < 0.05$)، از آزمون LSD برای بررسی اختلافات جفتی استفاده شد. این روش‌ها در نرم‌افزارهای آماری SPSS (Version 26) اجرا شدند.

ضریب تغییرات^۱ برای هر متغیر محاسبه شد تا پراکندگی داده‌ها ارزیابی شود. مقدار CV کمتر از ۱۵ درصد بیانگر یکنواختی و تکرارپذیری مناسب داده‌ها است. همچنین، هم‌بستگی بین فاکتورهای کیفی آب (مانند pH، EC، TDS و دما) و غلظت حشره‌کش‌ها با استفاده از ضریب هم‌بستگی Pearson بررسی شد. در نهایت، داده‌های معتبر که پس از کنترل‌های آماری و آزمایشگاهی باقی ماندند، مبنای تحلیل نهایی و ارزیابی خطر بهداشتی قرار گرفتند. این رویکرد موجب افزایش اعتبار علمی پژوهش و کاهش احتمال خطای سیستماتیک در تفسیر داده‌ها شد (Walorczyk, 2017, Subramanian, 2008).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آماری فاکتورهای کیفی آب

نتایج تحلیل آماری فاکتورهای کیفی آب در ایستگاه‌های مختلف رودخانه گرگان رود در جدول ۱ قابل مشاهده است. نتایج تحلیل

¹ Coefficient of Variation (CV)

آماري نشان داد که بین فصول بهار و تابستان از نظر برخی فاکتورهای کیفی آب و غلظت سایپرمتترین اختلاف معنی‌داری وجود دارد ($p < 0.05$). افزایش معنی‌دار غلظت سایپرمتترین در تابستان احتمالاً به دلیل افزایش مصرف آفت‌کش‌ها در دوره رشد محصولات کشاورزی (مانند گلزا و گندم و شالیزار) و همچنین کاهش دبی جریان رودخانه است که موجب تمرکز بالاتر آلاینده‌ها می‌شود (Zhao et al., 2020, Méjanelle et al., 2020).

در مقابل، پرمترین در هیچ‌یک از نمونه‌ها شناسایی نشد که می‌تواند ناشی از نیمه‌عمر کوتاه‌تر و جذب سریع‌تر آن توسط ذرات رسوبی باشد (USEPA, 2007). هم‌بستگی مثبت بین غلظت سایپرمتترین و مقدار TDS و EC نیز نشان داد که این ترکیب عمدتاً در مناطق با بار آلودگی بالاتر تجمع می‌یابد.

۳-۲- تغییرات مکانی و فصلی

همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، بقایای سایپرمتترین در تعدادی از ایستگاه‌های پایین‌دست شناسایی شد، در حالی که پرمترین در تمامی نمونه‌ها پایین‌تر از حد تشخیص قرار داشت. این موضوع می‌تواند ناشی از مصرف کمتر پرمترین در منطقه یا نرخ تجزیه بالاتر آن (به‌ویژه از طریق فتولیز و تجزیه زیستی) در مقایسه با سایپرمتترین باشد. در فصل بهار، میانگین غلظت سایپرمتترین در محدوده ۰/۰۳ تا ۰/۲۵ ppm قرار داشت و بیشترین مقدار آن در ایستگاه ۵ (بصیرآباد) ثبت شد. در دوره‌های بارش سالانه یا فصلی بالا، غلظت این ترکیبات در رودخانه‌ها و مخازن به‌طور قابل‌توجهی کاهش یافت، این کاهش عمدتاً ناشی از رقیق‌سازی ترکیبات در حجم آب بیشتر، افزایش جریان سطحی و تسهیل واکنش‌های تجزیه نوری (فتوکاتالیز) بود. مرور نظام‌مند (Li et al., 2025) نیز نشان می‌دهد که بارش‌های فراوان می‌توانند به‌عنوان یک فاکتور طبیعی موقت برای مهار خطر زیست‌محیطی حشره‌کش‌های پیرتروئیدی عمل کنند.

در مقابل، در فصل تابستان، غلظت سایپرمتترین به‌طور محسوسی افزایش یافت و در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۴۳ ppm قرار گرفت. این افزایش را می‌توان به کاهش دبی رودخانه، افزایش دمای آب (که موجب کاهش حلالیت و افزایش فراهمی زیستی ترکیب می‌شود)، مصرف بیشتر آفت‌کش‌ها در فعالیت‌های



جدول ۱- مقایسه فصلی پارامترهای فیزیکوشیمیایی (بهار و تابستان)

Table 1. Seasonal comparison of physicochemical parameters (Spring vs. Summer)

Variable	Mean $\pm$ SD (n=3) (Spring)	Mean $\pm$ SD (n=3) (Summer)	F-value (ANOVA)	p-value	Test result
pH	7.98 $\pm$ 0.12	8.05 $\pm$ 0.09	1.42	0.254	No significant difference
EC (mS/cm)	9.83 $\pm$ 0.85	11.52 $\pm$ 0.97	4.27	0.042	Significant increase in summer
TDS (g/L)	5.26 $\pm$ 0.62	6.87 $\pm$ 0.71	6.19	0.018	Significant increase in summer
DO (mg/L)	6.54 $\pm$ 0.48	5.21 $\pm$ 0.53	5.07	0.031	Significant decrease in summer
Water temperature (°C)	31.4 $\pm$ 0.9	33.2 $\pm$ 0.8	3.92	0.049	Significant increase in summer
Cypermethrin (ppb)	0.12 $\pm$ 0.03	0.43 $\pm$ 0.05	8.77	0.006	Significant increase in summer
Permethrin (ppb)	ND	ND	—	—	Not detected

جدول ۲- تغییرات فصلی غلظت سایپرمترین و پرمترین در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 2. Seasonal changes in cypermethrin and permethrin concentrations at sampling stations

Row	Sampling station	Cypermethrin spring season (ppm)	Permethrin spring season (ppm)	Cypermethrin summer season (ppm)	Permethrin summer season (ppm)
1	Kalaleh	ND	ND	ND	ND
2	Gonbade-Kavos	ND	ND	ND	ND
3	Aliabad Katul	0.03 $\pm$ 0.01	ND	0.05 $\pm$ 0.01	ND
4	Aq Qala	0.04 $\pm$ 0.01	ND	0.04 $\pm$ 0.01	ND
5	Basirabad	0.25 $\pm$ 0.03	ND	0.43 $\pm$ 0.05	ND

آفت‌کش‌ها را در نزدیکی اراضی زراعی و مناطق با فعالیت انسانی بالا مشاهده کردند که نشان‌دهنده نقش مستقیم رواناب‌های کشاورزی در انتقال این ترکیبات به منابع آب سطحی است. این یافته‌ها به‌طور مستقیم با نتایج پژوهش حاضر، مبنی بر افزایش غلظت سایپرمترین در ایستگاه‌های پایین‌دست، مطابقت دارد. (Habib et al., 2024) در بررسی تأثیر آفت‌کش‌ها بر رودخانه سند پاکستان، (Tarekegn et al., 2025) در ارزیابی باقیمانده آفت‌کش‌ها در دریاچه زیوی، اتیوپی و (Burande et al., 2026) در ارزیابی ارتباط بین آلودگی رودخانه و سلامت عمومی در رودخانه‌های هند نیز الگوی مشابهی گزارش کردند. در این مطالعات بیشترین غلظت آفت‌کش‌ها از جمله سایپرمترین در فصل خشک (تابستان) مشاهده شد و این افزایش به کاهش دبی و

کشاورزی و ورود فاضلاب‌های شهری نسبت داد. دمای بالاتر می‌تواند سمیت سایپرمترین را برای آبزیان افزایش دهد، به‌طوری‌که در بررسی اثر درجه حرارت در غلظت کشنده سم سایپرمترین بر روی ماهی سفید دریای خزر (Shahbazi et al., 2015) افزایش مرگ‌ومیر ماهیان را در دماهای بالاتر گزارش کرده‌اند. این الگوی فصلی با نتایج پژوهش‌های انجام شده در رودخانه زاینده‌رود (Mortazavi et al., 2023) و رودخانه زرد چین (Da et al., 2013) هم‌خوانی دارد و نقش تعیین‌کننده عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی را در رفتار و سرنوشت آفت‌کش‌ها در اکوسیستم‌های آبی تأیید می‌کند.

همچنین در بررسی انجام شده بر رودخانه‌های شمال ایران (Behrooz et al., 2021) بیشترین غلظت



دستورالعمل‌های آژانس مواد شیمیایی اروپا (ECHA, 2020)، مقدار PEC/PNEC بیش از ۱/۰ نیازمند پایش مستمر و اقدامات مدیریتی هستند، زیرا این محدوده می‌تواند با اثرات زیرکشنده و مزمن همراه باشد.

پژوهش‌های (Amweg et al., 2005, Weston and Lydy, 2010) نشان داده‌اند که پیرتروئیدها از جمله سایپرترین به دلیل سمیت بالا برای بی‌مهرگان آبی، حتی در غلظت‌های بسیار کم می‌تواند منجر به افزایش ریسک زیست‌محیطی شود. به‌طور خاص، حساسیت بالای گونه‌های شاخص مانند *Daphnia magna* باعث شده است که در بسیاری از ارزیابی‌ها، پیرتروئیدها در اولویت پایش قرار گیرند. این موضوع با نتایج این پژوهش که نشان‌دهنده نزدیک شدن نسبت ریسک به محدوده بحرانی در برخی ایستگاه‌ها بود، هم‌راستا است. همچنین، نتایج پژوهش‌های انجام شده در آمریکای شمالی (Weston and Lydy, 2010) و اروپا (Agency, 2025) نشان می‌دهد که مقدار PEC/PNEC بیش از ۱/۰ معمولاً با اثرات زیرکشنده مانند اختلال در رفتار، تغذیه و تولیدمثل آبیان همراه است. این یافته‌ها اهمیت نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش را تقویت می‌کند، زیرا مقدار مشاهده شده در فصل تابستان می‌تواند نشان‌دهنده شروع چنین اثراتی در اکوسیستم مورد مطالعه باشند.

۳-۴- ارزیابی ریسک برای سلامت انسان

در جدول ۴ و شکل ۲ میزان خطر سایپرترین برای سلامت انسان در فصل‌ها و ایستگاه‌های مختلف بررسی شده است. بر اساس شکل ۲ بیشترین غلظت شناسایی شده (۴۳ ppm/۰) و میانگین مصرف روزانه آب (۲ لیتر برای فردی با وزن ۶۰ کیلوگرم)، میزان جذب روزانه برآورد شده^۱ کمتر از حد مجاز جذب روزانه (ADI= 0.04 mg/kg/day) بود (WHO, 2022). با این حال، تمرکز صرف بر مسیر مصرف آب آشامیدنی می‌تواند منجر به کم‌برآوردی ریسک واقعی شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مواجهه انسانی با آفت‌کش‌ها اغلب از مسیرهای چندگانه شامل مصرف محصولات کشاورزی آلوده، تماس پوستی (در حین فعالیت‌های کشاورزی یا تفریحی) و مصرف آبیان انجام می‌شود (WHO, 2019b).

¹ Estimated Daily Intake (EDI)

افزایش ورود آلاینده‌های کشاورزی نسبت داده شده بود. این موضوع به‌خوبی تأیید می‌کند که تغییرات فصلی مشاهده شده در این پژوهش، یک الگوی جهانی در سیستم‌های رودخانه‌ای تحت تأثیر فعالیت‌های کشاورزی بود. همچنین مرور جهانی آلودگی رودخانه‌ها (López-Benítez et al., 2024) نشان می‌دهد که آفت‌کش‌ها در بخش قابل‌توجهی از سیستم‌های آبی جهان شناسایی شده‌اند و حضور آن‌ها به‌طور مستقیم با فعالیت‌های کشاورزی مرتبط است. از جنبه مکانی، کمترین غلظت‌ها در ایستگاه‌های بالادست (۱ و ۲) مشاهده شد که میزان فعالیت انسانی در آن‌ها اندک است. در حالی که ایستگاه‌های پایین‌دست (۳، ۴ و ۵) که در مجاورت اراضی کشاورزی و مراکز جمعیتی واقع شده‌اند دارای غلظت‌های قابل تشخیص سایپرترین بودند. این گرا دیان مکانی نشان‌دهنده تجمع تدریجی آلاینده‌ها در مسیر جریان و نقش رواناب‌های کشاورزی و تخلیه فاضلاب شهری در ورود سموم به رودخانه است (Cryder, 2020). همان‌گونه که توسط مراجع معتبری همچون (Subramanian, 2008, USEPA, 2007) نیز اشاره شده است، این مسیرهای انتقال، کانال‌های اصلی ورود آفت‌کش‌ها به اکوسیستم‌های آبی محسوب می‌شوند. این شرایط، به‌ویژه در فصل تابستان که هم بارش‌های مؤثر برای ایجاد رواناب رخ می‌دهد و هم آبیاری مزارع شدت می‌یابد، تشدید می‌شود و یک تهدید پیوسته برای کیفیت آب و سلامت اکوسیستم رودخانه گرگان رود ایجاد می‌کند.

۳-۳- ارزیابی ریسک زیست‌محیطی

نتایج حاصل از محاسبه نسبت PEC به PNEC برای ایستگاه‌های مختلف (جدول ۳) نشان‌دهنده تغییرات معنی‌دار در سطح ریسک زیست‌محیطی در مقیاس فصلی و مکانی است. در فصل بهار، مقدار PEC/PNEC در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بوده و در بازه ۰/۱۵ تا ۰/۱۲ قرار داشتند که بر اساس معیارهای ارزیابی ریسک، بیانگر ریسک کم تا متوسط برای آبیان است. در مقابل، در فصل تابستان مقدار این نسبت در ایستگاه بصیرآباد به ۰/۲۲ افزایش یافت که در محدوده ریسک متوسط رو به بالا قرار می‌گیرد و نشان‌دهنده افزایش احتمال بروز اثرات زیان‌بار بر موجودات حساس اکوسیستم، به‌ویژه بی‌مهرگان آبی و ماهیان است. بر اساس



غلظت‌های محیطی پیرتروئیدها اغلب کمتر از حدود مجاز هستند، اما به دلیل اثر تجمعی، ارزیابی ریسک باید به صورت چندمسیره و بلندمدت انجام شود. درواقع، رویکردهای جدید ارزیابی ریسک تأکید دارند که حتی در شرایطی که شاخص‌های کلاسیک مانند EDI/ADI ایمن به نظر می‌رسند، نمی‌توان احتمال بروز اثرات مزمن را نادیده گرفت. در نهایت یافته‌های این بخش به‌طور همگرا تأیید می‌کند که اگرچه غلظت سایپرمتترین در رودخانه گرگان رود

بر اساس گزارش‌های (USEPA, 2019) مواجهه تجمعی و طولانی‌مدت با پیرتروئیدها به دلیل ویژگی لیپوفیلیک بودن این ترکیبات و تمایل به تجمع در بافت‌های چربی، می‌تواند منجر به افزایش تدریجی بار سمی در بدن شود و در نهایت اثرات مزمنی نظیر اختلالات عصبی، هورمونی و ایمنی را به دنبال داشته باشد. این موضوع با نتایج مطالعات سازمان ایمنی مواد غذایی اروپا (EFSA, 2013) نیز هم‌خوانی دارد که نشان می‌دهند اگرچه

جدول ۳- تغییرات فصلی غلظت PEC/PNEC در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 3. Seasonal changes in PEC/PNEC concentrations at sampling stations

Row	Sampling station	PEC/PNEC cypermethrin spring season (ppm)	PEC/PNEC permethrin spring season (ppm)	PEC/PNEC cypermethrin summer season (ppm)	PEC/PNEC permethrin summer season (ppm)
1	Kalaleh	ND	ND	ND	ND
2	Gonbade-Kavos	ND	ND	ND	ND
3	Aliabad Katul	0.015	ND	0.02	ND
4	Aq Qala	0.018	ND	0.016	ND
5	Basirabad	0.12	ND	0.22	ND

جدول ۴- ارزیابی خطر ریسک انسانی در فصل‌ها و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

Table 4. Human risk assessment in seasons and sampling stations

Row	Sampling station	Human risk level (spring season)	Remarks (spring season)	Human risk level (summer season)	Remarks (summer season)
1	Kalaleh	Low	No detectable contamination	Low	No pesticide residues detected
2	Gonbade-Kavos	Low	Below detection limit	Low	Clean sample, no detectable pollutants
3	Aliabad Katul	Low	Minor cypermethrin input likely from agricultural runoff	Low	Slight increase due to reduced river discharge
4	Aq Qala	Low	Slight contamination, possibly nonpoint sources	Low	Minor contamination detected
5	Basirabad	Medium	Noticeable contamination from urban effluents	Medium-High	Highest concentration; potential ecological risk zone



خصوص راه‌های کاهش مواجهه باشد. تنها از طریق چنین اقدامات جامعی می‌توان از رودخانه‌گران رود به‌عنوان یک منبع حیاتی و سالم برای نسل‌های حاضر و آینده حفاظت کرد.

۳-۵- شاخص HQ سایپر مترین

نتایج محاسبه شاخص خطر سلامت بر اساس غلظت سایپر مترین جدول ۵ نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها و در هر دو فصل در محدوده بسیار کم ($0/004$ تا $0/032$ میکروگرم در لیتر) قرار دارد که در طبقه‌بندی USEPA، در گروه خطر ناچیز دسته‌بندی می‌شود. مقدار HQ نیز در تمامی ایستگاه‌ها کمتر از ۱ (در بازه $0/002$ تا $0/016$) به‌دست آمد که نشان‌دهنده عدم وجود خطر

ممکن است در نگاه اول و برای برخی اهداف (مانند تأمین آب شرب در تصفیه‌خانه‌های متعارف) کم‌خطر به نظر برسد، اما تلفیق سمیت بسیار بالا برای موجودات آبی، پتانسیل تجمع در رسوبات و زنجیره غذایی و ریسک مواجهه جمعی برای انسان، یک چالش زیست‌محیطی و بهداشتی جدی را نمایان می‌سازد. این نتایج، لزوم اتخاذ یک راهبرد مدیریتی پیشگیرانه و یکپارچه را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. این راهبرد باید شامل پایش مستمر کیفی آب و رسوبات (به‌ویژه در ایستگاه‌های پایین‌دست و در فصل تابستان)، اجرای برنامه‌های آموزشی برای کشاورزان برای کاهش مصرف سموم و مدیریت رواناب، تصفیه کارآمدتر پساب‌های شهری و صنعتی قبل از ورود به رودخانه و آگاه‌سازی جامعه محلی در

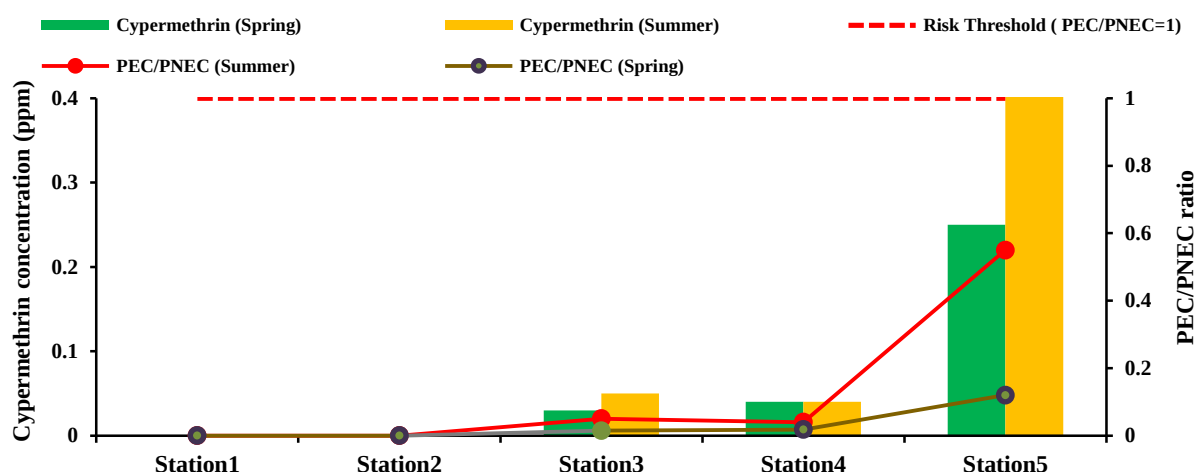


Fig. 2. Seasonal Variation of Cypermethrin Concentration and Risk Ratio (PEC/PNEC) and human risk level Gorgan Rood River

شکل ۲- تغییرات فصلی غلظت، نسبت ریسک (PEC/PNEC) و سطح خطر انسانی سایپر مترین در رودخانه‌گران رود

جدول ۵- شاخص HQ بر اساس غلظت سایپر مترین

Table 5. HQ based on cypermethrin concentration

Station	Season	Concentration ($\mu\text{g/L}$)	HQ (drinking water)	Risk category
Station 1	Spring	0.021	0.001	Negligible
Station 2	Spring	0.018	0.001	Negligible
Station 3	Spring	0.011	0.0005	Negligible
Station 4	Spring	0.007	0.0003	Negligible
Station 5	Spring	0.004	0.0002	Negligible
Station 1	Summer	0.032	0.0016	Negligible
Station 2	Summer	0.027	0.0013	Negligible
Station 3	Summer	0.019	0.001	Negligible
Station 4	Summer	0.012	0.0006	Negligible
Station 5	Summer	0.006	0.0003	Negligible



بیان می‌کنند که ترکیبات پیرتروئیدی مانند سایپرترین در محیط‌های قلیایی نرخ تجزیه هیدرولیتی بیشتری دارند (USEPA, 2019) بنابراین PH نسبتاً بالا در ایستگاه‌های فاقد آلودگی می‌تواند یکی از دلایل عدم شناسایی پرمترین و عدم تجمع سایپرترین در بخش‌های بالادست (ایستگاه ۱ و ۲) باشد.

از سوی دیگر، حضور آلاینده‌ها در ایستگاه‌های پایین دست به‌ویژه ایستگاه ۵، با غلظت ۰/۲۵ ppm در بهار و ۰/۴۳ ppm در تابستان نشان‌دهنده ورود منبع آلودگی جدید است، زیرا مقدار PH بالادست و پایین دست اختلاف اندکی با یکدیگر داشته و این اختلاف نمی‌تواند دلیل افزایش قابل توجه غلظت باشد؛ بنابراین، پارامتر PH نشان می‌دهد که منشأ آلاینده‌گی در فصل تابستان شرایط شیمیایی آب نیست، بلکه ناشی از ورود زه‌آب‌ها و فاضلاب‌های کشاورزی و خانگی است.

پارامترهای EC، TDS و شوری تمایل بالایی به پیوستگی با ذرات معلق و مواد آلی دارند، بنابراین افزایش مقدار TDS و شوری می‌تواند موجب انتقال بیشتر سموم از فاز محلول به فاز ذره‌ای و رسوبی شود (FAO, 2017). مقدار EC و TDS در ایستگاه‌های ۳ و ۴ و به‌ویژه ایستگاه ۵ نسبت به بالادست افزایش یافته‌اند که نشان‌دهنده افزایش املاح محلول و احتمال ورود پساب‌ها است. کاهش EC از ایستگاه ۳ (۱۲/۴۴ میلی‌ثانیه بر سانتی‌متر) به ایستگاه ۴ (۷/۷۲ میلی‌ثانیه بر سانتی‌متر) به رقیق‌سازی توسط یک شاخه فرعی با شوری کمتر است. باین حال، غلظت سایپرترین به‌طور قابل توجهی کاهش نیافت و به دلیل

غیر سرطانی قابل توجه برای انسان از طریق مصرف آب آشامیدنی است. باین حال، بررسی روند مکانی نشان می‌دهد که در ایستگاه‌های پایین دست (به‌ویژه ایستگاه ۳ تا ۵)، مقدار HQ نسبت به ایستگاه‌های بالادست افزایش یافته است. این افزایش هرچند از نظر عددی کوچک است، اما از نظر زیست محیطی حائز اهمیت بوده و نشان‌دهنده تأثیر تجمعی منابع آلاینده نظیر رواناب‌های کشاورزی و پساب‌های شهری در طول مسیر رودخانه است. از نظر فصلی نیز، مقدار HQ در تابستان نسبت به بهار افزایش نشان می‌دهد که این روند با افزایش غلظت سایپرترین، دمای آب و کاهش دبی رودخانه هم خوانی دارد. باوجود پایین بودن مقدار HQ، باید توجه داشت که این شاخص تنها مسیر مواجهه از طریق آب آشامیدنی را در نظر می‌گیرد. درحالی‌که براساس پژوهش‌های (WHO, 2022, USEPA, 1994)، مواجهه تجمعی از مسیرهای دیگر مانند مصرف محصولات کشاورزی آلوده، تماس پوستی و زنجیره غذایی می‌تواند در بلندمدت اهمیت بیشتری داشته باشد؛ بنابراین، حتی در شرایطی که HQ کمتر از ۱ است، نمی‌توان احتمال اثرات مزمن را به‌طور کامل نادیده گرفت.

۳-۶- بررسی فاکتورهای فیزیکی-شیمیایی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

در جدول ۶ نتایج فاکتورهای کیفی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری را می‌توان مشاهده کرد. دامنه PH ثبت شده (حدود ۸) نشان‌دهنده شرایط نسبتاً قلیایی رودخانه بود. گزارش‌های علمی

جدول ۶- نتایج فاکتورهای کیفی آب در ایستگاه‌های نمونه‌برداری رودخانه گرگان رود

Table 6. Results of water quality factors at Gorgan Rood River sampling stations

Parameter	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5
Do (mg/L)	9.56	6.53	2.3	0.59	0.41
Do saturation (%)	133.7	93.8	32.7	8.3	6.9
Air temp (°C)	35.5	36.2	37.1	39.6	40.2
Water temp (°C)	31.3	31.5	32.9	33.4	33.7
Air pressure (mb)	1008	1009	1008	1008	1007
EC (ms/cm)	8.48	10.64	12.44	7.72	6.85
TDS (g/L)	4.59	7.45	5.84	4.15	3.21
Salinity	4.74	7.75	6.05	4.25	3.34
pH	8.02	8.17	7.94	7.89	7.76



جدول ۷- ماتریس هم‌بستگی پیرسون بین غلظت سایپرمتترین و فاکتورهای کیفی آب

Table 7. Correlation matrix between cypermethrin concentration and water quality parameters

Variable	Correlation coefficient (r)	p-value
EC	0.78	<0.05
TDS	0.81	<0.01
Temperature	0.69	<0.05
DO	-0.74	<0.05

کاهش DO می‌تواند یکی از عوامل ماندگاری طولانی‌تر سایپرمتترین در ایستگاه‌های آلوده باشد. عدم شناسایی پرمترین نیز با توجه به پایداری کمتر آن در شرایط قلیایی و گرمای تابستان کاملاً منطقی و تأییدشده توسط مطالعات EPA است.

۷-۳- بررسی هم‌بستگی پیرسون سایپرمتترین با پارامترهای کیفی آب

نتایج آزمون هم‌بستگی جدول ۷ نشان داد که بین غلظت سایپرمتترین و EC ($r=0.78$, $p<0.05$) و TDS ($r=0.81$, $p<0.01$) هم‌بستگی مثبت و معنی‌داری وجود دارد، درحالی‌که با DO هم‌بستگی منفی معنی‌دار ($r=-0.74$, $p<0.05$) مشاهده شد. همچنین، دمای آب نیز هم‌بستگی مثبت با غلظت سایپرمتترین نشان داد ($r=0.69$, $p<0.05$). این نتایج بیانگر نقش عوامل فیزیکوشیمیایی در افزایش فراهمی و تجمع این ترکیب در شرایط خاص محیطی است.

۴- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که اگرچه پرمترین در هیچ‌یک از نمونه‌های فاضلاب شهری و آب رودخانه‌گران رود شناسایی نشد، ولی سایپرمتترین در چند ایستگاه پایین‌دست و به‌ویژه ایستگاه بصیرآباد حضور قابل توجهی داشت. الگوی تغییرات فصلی بیانگر آن بود که غلظت سایپرمتترین در تابستان به طور محسوسی افزایش می‌یابد، موضوعی که با افزایش مصرف آفت‌کش‌ها در دوره رشد محصولات کشاورزی و کاهش دبی رودخانه هم‌خوانی دارد. همچنین نتایج نشان داد که تغییرات فاکتورهای کیفی آب شامل افزایش EC، TDS و دما و کاهش DO، نقش مؤثری در افزایش غلظت و ماندگاری سایپرمتترین در ایستگاه‌های پایین‌دست داشته‌اند. این موضوع بیانگر تأثیر هم‌زمان شرایط فیزیکوشیمیایی

تخلیه فاضلاب محلی از بصیرآباد، در ایستگاه ۵ دوباره افزایش یافت که نشان می‌دهد ورودی آلاینده می‌تواند اثرات رقیق‌سازی را تحت‌الشعاع قرار دهد. از سوی دیگر، دمای آب در ماه‌های تابستان افزایش یافته است (حدود ۳۳ درجه)، بر اساس منابع معتبر، افزایش دما سبب افزایش سرعت واکنش‌های اکسیداسیون و تجزیه فتوشیمیایی پیرتروئیدها می‌شود، اما هم‌زمان مصرف این سموم در کشاورزی نیز در تابستان بیشتر است (WHO, 2019a). بنابراین، افزایش غلظت سایپرمتترین در تابستان از ۰/۲۵ به ۰/۴۳ ppm در ایستگاه ۵ و از ۰/۰۳ به ۰/۰۵ ppm در ایستگاه ۳ نشان‌دهنده این است که ورود منابع آلاینده جدید مهم‌تر از فریندهای تجزیه بوده است.

نتایج درصد اشباع اکسیژن نیز نشان داد که ایستگاه‌های پایین‌دست دارای مقدار کمتر اکسیژن محلول^۱ بودند، کاهش شدید اشباع اکسیژن از ۱۳۳/۷ درصد در ایستگاه ۱ به ۶/۹ درصد در ایستگاه ۵، با وجود افزایش تنها ۲/۴ درجه سلسیوس دمای آب، تأیید می‌کند که تقاضای بیولوژیکی اکسیژن از اثرات دما یا فشار نیست، بلکه عوامل زیستی و محیطی علت اصلی است. اختلاف مشاهده شده در درصد اشباع بین ایستگاه‌ها، علی‌رغم شرایط نسبتاً مشابه دما و فشار، می‌تواند ناشی از عوامل فتوسنتز جلبک‌ها و گیاهان آبی، شرایط هیدرولیکی جریان و تخلیه پساب‌های شهری یا کشاورزی باشد؛ بنابراین، تفاوت در درصد اشباع اکسیژن در ایستگاه‌های مختلف، حتی در شرایط دمایی و فشاری مشابه، پدیده‌ای طبیعی و متأثر از فرایندهای بیولوژیکی و آلودگی‌های محیطی است. از سوی دیگر کمبود DO باعث کاهش نرخ تجزیه بیولوژیک سایپرمتترین می‌شود، زیرا بسیاری از میکروارگانیسم‌های تجزیه‌کننده در شرایط هوازی فعالیت بیشتری دارند؛ بنابراین،

¹ Dissolved Oxygen (DO)



دهد. از محدودیت‌های این پژوهش، اندازه‌گیری تنها دو ترکیب پرمترین و سایپرمتترین و عدم بررسی بار آلودگی رسوبات بود که در پژوهش‌های آینده باید مورد توجه قرار گیرد. در نهایت، این پژوهش با ارائه شواهد تجربی از حضور فصلی و مکانی سایپرمتترین در گرگان رود، اهمیت مدیریت یکپارچه آلودگی ناشی از پساب‌های شهری و کشاورزی را برجسته کرد و نشان داد که حفاظت از کیفیت این رودخانه تنها با اعمال راهبردهای پیشگیرانه و مبتنی بر پایش مستمر امکان‌پذیر است.

۵-قردانی

به‌این‌وسیله از معاونت محترم پژوهش و فناوری دانشگاه گنبدکاووس، به دلیل حمایت‌های مؤثر و در اختیار گذاشتن امکانات آزمایشگاهی در طول اجرای این طرح پژوهشی با شماره ۶/۰۴/۹۰ صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

آب و منابع آلاینده (پساب‌های شهری و رواناب کشاورزی) بر تشدید آلودگی در رودخانه گرگان رود است. با ارزیابی ریسک زیست‌محیطی مشخص شد که در فصل بهار ریسک در محدوده پایین قرار دارد، اما در تابستان مقدار PEC/PNEC در ایستگاه آق‌قلا به آستانه هشدار نزدیک شد و احتمال اثرات زیست‌محیطی بر موجودات آبی را افزایش داد. از نظر سلامت انسان، شاخص HQ در همه ایستگاه‌ها کمتر از ۱ بود و نشان داد که مصرف آب آشامیدنی تحت شرایط فعلی با خطر جدی همراه نیست، با این حال، نتایج بر اهمیت توجه به‌مواجهه تجمعی از مسیرهای غیرمستقیم تأکید دارد.

با توجه به یافته‌ها، پیشنهاد می‌شود پایش فصلی رودخانه و فاضلاب شهری به ویژه در تابستان تقویت شود، کارایی فرایندهای تصفیه فاضلاب در حذف ترکیبات آلی پایدار بهبود یابد و برنامه‌های مدیریتی برای کاهش مصرف آفت‌کش‌ها و مدیریت رواناب‌های کشاورزی تدوین شود. همچنین پایش رسوبات می‌تواند تصویر کامل‌تری از انباشت بلندمدت پیرتروئیدها ارائه

References

- Agency, E. E., 2025. *Pesticides in Rivers, Lakes and Groundwater in Europe*. European Environment Agency. Copenhagen K, Denmark. [Link]
- Ambrus, Á., Doan, V. V. N., Szenczi-Cseh, J., Szemánné-Dobrik, H. and Vásárhelyi, A., 2023. Quality control of pesticide residue measurements and evaluation of their results. *Molecules*, 28, 954. <https://doi.org/10.3390/molecules28030954>.
- Amweg, E. L., Weston, D. P. and Ureda, N. M., 2005. Use and toxicity of pyrethroid pesticides in the Central Valley, California, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 24, 966-972. <https://doi.org/10.1897/04-146R1.1>.
- Aznar-Aleman, Ò. and Eljarrat, E., 2020. Introduction to Pyrethroid Insecticides: Chemical Structures, Properties, Mode of Action and Use. In: Eljarrat, E., eds. *Pyrethroid Insecticides*. The Handbook of Environmental Chemistry, Vol 92. Springer, Cham. pp. 1-16. https://doi.org/10.1007/698_2019_435.
- Baghbani-Arani, A. and Adavi, Z., 2021. Effect of levels and different types of nitrogen fertilizer on growth, biological and essential oil yields and its components in two populations of Dill. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 52, 83-95. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ijfcs.2020.291335.654651>.
- Burande, A. G., Agrawal, P. S. and Chandankhede, K. R., 2026. Evaluating the Link Between River Contamination and Public Health: Investigating Heavy Metals, Pesticides, and Their Socioeconomic Impacts. In: Ghosh, S., Eds. *Reimagining Indian Rivers for Sustainability*, Palgrave Studies in Environmental Sustainability. Palgrave Macmillan, Cham. pp. 201-278. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04754-0_5.
- Cryder, Z. M., 2020. *Urban Insecticides in Surface Water: Runoff Source Identification and Large-Scale Constructed Wetland Treatment*. University of California, Riverside. [Link]



- Da, C., Liu, G., Tang, Q. and Liu, J., 2013. Distribution, sources, and ecological risks of organochlorine pesticides in surface sediments from the Yellow River Estuary, China. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 15, 2288-2296. <https://doi.org/10.1039/C3EM00369H>.
- Dahmardeh Behrooz, R., Esmaili-Sari, A., Urbaniak, M. and Chakraborty, P., 2021. Assessing diazinon pollution in the three major rivers flowing into the Caspian Sea (Iran). *Water*, 13, 335. <https://doi.org/10.3390/w13030335>.
- Das, Sh., 2024. My right side was paralysed, I was so sick': the pesticide poisonings in Brazil that lead back to the UK. *The Guardian*. [Link]
- Duan, Y., Cao, Y., Li, H., Niu, R., Duan, S., Qu, L. et al., 2025. Assessment of the ecological risk posed by cypermethrin to surface waters based on a species sensitivity distribution model. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology*, 298, 110308. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2025.110308>.
- ECHA, 2020. *Guidance on Information Requirements and Chemical Safety Assessment Chapter R.10: Characterisation of Dose-Response for Environment*. European Chemicals Agency. Helsinki, Finland. [Link]
- EFSA, 2013. International frameworks dealing with human risk assessment of combined exposure to multiple chemicals. *Efsa Journal*, 11, 3313. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3313>.
- FAO, 2017. *Pesticide Residues in Food 2017*. Geneva, Switzerland. 710 Pages. [Link]
- Fadaei Tehrani, M. R. and Jamshidipoor, P., 2024. Optimization of phosphate removal in industrial wastewater treatment plant in SBR and MBBR units. *Journal of Water and Wastewater*, 35(2), 53-71. (In Persian). <https://doi.org/10.22093/wwj.2024.446732.3405>.
- Ghaziani, S., Heshmatpour, A., Ferasati, M. and Rostami, F., 2020. Quality assessment of Gorgan Rood River using NSFQI index in Gonbad Kavus Urban Area. *Journal of Ecohydrology*, 7, 373-382. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/ije.2020.296008.1276>.
- Habib, S. S., Fazio, F., Masud, S., Ujan, J. A., Saeed, M. Q., Ullah, M. et al., 2024. Analyzing the impact of pesticides on the Indus river: contamination levels in water, sediment, fish, and associated human health risks. *Environmental Geochemistry and Health*, 46, 191. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01975-8>.
- Hansen, S. F., Sørensen, S. N., Skjolding, L. M., Hartmann, N. B. and Baun, A., 2017. Revising REACH guidance on information requirements and chemical safety assessment for engineered nanomaterials for aquatic ecotoxicity endpoints: recommendations from the EnvNano project. *Environmental Sciences Europe*, 29, 14. <https://doi.org/10.1186/s12302-017-0111-3>.
- Heshmatpour, A., Jandaghi, N., Pasand, S. and Ghare Mahmoudlu, M., 2020. Drought effects on surface water quality in Golestan province for irrigation purposes, case study: Gorgan Rood River. *Physical Geography*, 12, 75-88. (In Persian). [Link]
- Heshmatpour, A. and Sajjadi, S. J., 2025. A survey on spatial and temporal variations of Agricultural water quality in Gorgan Rood River using fuzzy rules. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 3, 38-56. (In Persian). <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.460627.1086>.
- Hladik, M. L. and Kuivila, K. M., 2012. Pyrethroid insecticides in bed sediments from urban and agricultural streams across the United States. *Journal of Environmental Monitoring*, 14, 1838-1845. <https://doi.org/10.1039/C2EM10946H>.
- ISO/IEC17025, 2017. *General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories*. International Organization for Standardization. Edition 3. Geneva, Switzerland. [Link]
- Li, H., Fan, Y., Li, Y., Guo, G. and Zhang, R., 2025. Aquatic life water quality criteria and ecological risk of herbicides and insecticides in waters across China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 309, 119622. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2025.119622>.



- López-Benítez, A., Guevara-Lara, A., Domínguez-Crespo, M. A., Andraca-Adame, J. A. and Torres-Huerta, A. M., 2024. Concentrations of organochlorine, organophosphorus, and pyrethroid pesticides in rivers worldwide (2014-2024): a review. *Sustainability*, 16, 8066. <https://doi.org/10.3390/su16188066>.
- Masoomi, B., 2021. The study of pre-ozonation effects on physicochemical and biological properties of drinking water. *Journal of Environmental Health Engineering*, 8, 450-464. <https://doi.org/10.52547/jehe.8.4.450>.
- Méjanelle, L., Jara, B. and Dachs, J., 2020. Fate of pyrethroids in freshwater and marine environments. In: Eljarrat, E., eds. *Pyrethroid Insecticides. The Handbook of Environmental Chemistry*, Vol 92. Springer, Cham. PP. 81-107. https://doi.org/10.1007/698_2019_433.
- Miller, G. T., 2000. *Sustaining the Earth: an Integrated Approach*. 2nd Edition. Wadsworth, Belmont. [Link]
- Mortazavi, S., Makhfi, G., Karimi, A., Rezazadeh, S. and Parsi Mehr, M., 2023. Water ecosystem health assessment of Zayandeh Rood. *Journal of Environmental Health Engineering*, 10, 259-275. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.61186/jehe.10.3.259>.
- Moharami, S., 2024. Investigating the effect of long-term municipal waste and manure application on soil heavy metal availability in Soil. *Journal of Water and Wastewater*, 35(1), 21-39. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.22093/wwj.2023.424366.3383>.
- Motie Tabar, F., Forghani Tehrani, G. and Rostami, S., 2022. Contamination assessment and chemical speciation of potentially toxic elements in surface sediments of the Karoon River, Ahwaz City district. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 38(2), 13-34. (In Persian). <https://doi.org/10.22108/jssr.2022.132433.1224>.
- Qu, K., Xie, S., Shi, M., Chen, L., Liu, Y., Li, X. et al., 2024. Chronic dietary exposure to deltamethrin impaired shrimp growth and intestinal health while not inducing deltamethrin residues. *SSRN*, 36 Pages, <https://doi.org/10.2139/ssrn.4784798>.
- Shahbazi, S., Mirvaghefi, A., Abedi, M. and Taherian, M., 2015. Effect of temperature lethal concentration (LC50 96-h) of cypermethrin on the Caspian Kutum Fish *Rutilus Frisii* Kutum (Kamensky, 1901). *Journal of Fisheries*, 68, 421-435. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jfisheries.2015.56121>.
- Shattuck, A., Werner, M., Mempel, F., Dunivin, Z. and Galt, R., 2023. Global pesticide use and trade database (GloPUT): new estimates show pesticide use trends in low-income countries substantially underestimated. *Global Environmental Change*, 81, 102693. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2023.102693>.
- Simarro-Gimeno, C., Pitarch, E., Albarrán, F., Rico, A. and Hernandez, F., 2025. Ten years of monitoring pharmaceuticals and pesticides in the aquatic environment nearby a solid-waste treatment plant: historical data, trends and risk assessment. *Environmental Pollution*, 366, 125496. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125496>.
- Samadi, M. T. , Khodadadi, M. , Rahmani, A. R. , Allahresani, A. and Saghi, M. H., 2010. Comparison of the efficiency of simultaneous application of UV/O₃ for the removal of organophosphorus and carbamat pesticides in aqueous solutions. *Journal of Water and Wastewater*, 21(1), 69-75. (In Persian). [Link]
- Subramanian, G., 2008. *Quality Assurance in Environmental Monitoring: Instrumental Methods*. John Wiley & Sons, New York. [Link]
- Suter, G. W., 2008. Ecological risk assessment in the United States Environmental Protection Agency: a historical overview. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 4, 285-289. https://doi.org/10.1897/IEAM_2007-062.1.
- Tarekegn, M. M., Duga, D. L., Alemayehu, Y. A. and Worku, M. A., 2025. Assessment of pesticide residues in fish and associated human health risks in Lake Ziway, Ethiopia. *Discover Environment*, 3, 153. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00362-z>.
- UNEP, 2025. *Highly Hazardous Pesticides (HHPs.)* [Link]
- USEPA, 1994. *Guidance for the Data Quality Objectives Process*, DIANE Publishing. Washington, DC. [Link]



- USEPA, 2007. *Quality Assurance and Quality Control (QA/QC) Procedures for Environmental Sampling and Analysis*. Washington, DC. [Link]
- USEPA, 2019. *Human Health Risk Assessment for Cypermethrin. CompTox Chemicals Dashboard*. U. S. Environmental Protection Agency. [Link]
- Walorczyk, S., 2017. QA/QC for Pesticide Residue Analysis. *Multiresidue Methods for the Analysis of Pesticide Residues in Food*. CRC Press. 1st Edition. 411-430. [Link]
- Wang, S., Sharkey, M., Jin, J., Stubbings, W., Bagheri, H., Healy, M. G. et al., 2025. Pyrethroids in sediments and wastewater treatment plant-derived biosolids from Ireland. *Science of The Total Environment*, 995, 180108. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180108>.
- Weston, D. P. and Lydy, M. J., 2010. Urban and agricultural sources of pyrethroid insecticides to the Sacramento-San Joaquin Delta of California. *Environmental Science and Technology*, 44, 1833-1840. <https://doi.org/10.1021/es9035573>.
- WHO, 2011. *Evaluation of Certain Food Additive and Contaminants*. World Health Organization Technical Report Series, 1. WHO Pub. Geneva, Switzerland. [Link]
- WHO, 2019a. *Evaluation of Certain Food Additives and Contaminants: 67th Report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives*. (WHO Technical Report Series, No. 940). Geneva, Switzerland. [Link]
- WHO, 2019b. *Preventing Disease Through Healthy Environments: Exposure to Highly Hazardous Pesticides: a Major Public Health Concern*. Geneva, Switzerland. [Link]
- WHO, 2022. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. 4th Edition incorporating the first and second addenda. Geneva, Switzerland. [Link]
- WHO, 2023. *Climate Change, Pollution and Health Impact of Chemicals, Waste and Pollution on Human Health*. Report by the Director-General. EB154/24. 154th Session. Geneva, Switzerland. [Link]
- Zare Garizi, A., Shahedi, K. and Matboo, A., 2024. Evaluation of surface water quality of the Gorgan Rood River basin for different uses with canadian (CCME) water quality index approach. *Journal of Water and Soil Science*, 28, 127-143. (In Persian). <http://dx.doi.org/10.47176/jwss.28.1.56121>.
- Zhao, Y., Yang, J., Ren, J., Hou, Y., Han, Z., Xiao, J. et al., 2020. Exposure level of neonicotinoid insecticides in the food chain and the evaluation of their human health impact and environmental risk: an overview. *Sustainability*, 12, 7523. <https://doi.org/10.3390/su12187523>.

