



Assessment of water quality deterioration trends in Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model

Mohammad Reza Fadaei Tehrani^{1*}, Mozghan Mirzaei²

1 Assistant Professor and Faculty Member, Isfahan Higher Education and Research Complex, Niroo Research Institute, Iran.

2 Assistant Professor and Faculty Member, Department of Environmental Engineering and HSE, Daneshjooyan Pishro Non-profit Higher Education Institute, Isfahan, Iran

Corresponding Author email: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2025

Received: 06 Apr 2025

Revised: 02 Jun 2025

Accepted: 13 Jul 2025

Published: 16 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

This study investigates the deterioration trends of water quality in the Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model within a GIS environment. As one of the most vital water resources in Iran's central plateau, the Zayandeh Rud River has been severely impacted by human activities and the discharge of industrial and urban wastewater. The primary objective of this research is to evaluate the effectiveness of the SIAQUA-IPH model in simulating qualitative water changes, including parameters such as BOD, DO, nitrate, and phosphate, resulting from point-source pollutants like the Isfahan Steel Company, Mobarekeh Steel Company, and Polyacryl Iran Corporation. Given the critical importance of the Zayandeh Rud River for drinking water, agriculture, and industry, assessing its pollution levels and proposing management strategies is essential.

Materials and Methods

To conduct this research, the river's drainage network was divided into 411 sub-basins using GIS and the SIAQUA-IPH model, with hydrological characteristics extracted using SMADA software. Pollutant concentration data from seven sampling stations along the river were collected and used as model inputs. Simulations were performed for two different seasons, and the results were compared with measured data. Model accuracy was evaluated using statistical metrics, including the correlation coefficient (R^2), root mean square error (RMSE), and objective function (Fobj).

Results and Discussion

The simulation results demonstrated that the SIAQUA-IPH model exhibits high precision in predicting BOD and DO parameters, with correlation coefficients of 0.94 and 0.98, respectively. This high accuracy underscores the model's capability in simulating organic pollutants and dissolved oxygen. In contrast, the model showed moderate performance in simulating nitrate and phosphate, with correlation coefficients of 0.60 and 0.66, attributed to the complex biogeochemical cycles of these elements and their dependence on factors such as temperature, pH, and microbial activity. Further analysis revealed that the three industrial complexes significantly increase BOD levels (by approximately 58%) and reduce DO levels (by about 50%) along the river, severely degrading water quality. The discussion of results highlights the relatively good agreement between observed and simulated data, confirming the reliability of the SIAQUA-IPH model for point-source pollution assessment. These findings align with previous studies that employed water quality models to simulate oxygen-related parameters and organic pollutants. However, challenges in modeling nitrate and phosphate mirror those reported in other research, stemming from complex processes such as nitrification, denitrification, and phosphate adsorption-desorption by sediments and organisms. Additionally, the recent drying of the Zayandeh Rud River since 2015 has limited more precise modeling, emphasizing the urgent need for optimized water resource management and pollution control measures.



Conclusion

In conclusion, this study underscores the importance of integrating GIS tools and simulation models to understand and predict the impacts of point-source pollution on river water quality. The obtained results can serve as a foundation for management strategies aimed at reducing pollutant discharge and improving the Zayandeh Rud River's water quality. Future studies should combine qualitative and quantitative water models while considering the effects of climate change and recent droughts to develop more comprehensive conservation strategies for this vital river.

Keywords: Qualitative analysis, pollution, water resources, numerical model

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data availability statement

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mohammad Reza Fadaei Tehrani: Writing, Methodology, Investigation, Data Collection, Software, Supervision;
Mozhgan Mirzaei: Analysis, Writing – Review & Editing, Data Curation.

Citation: Fadaei Tehrani, MR., & Mirzaei, M. (2025). Assessment of water quality deterioration trends in Zayandeh Rud River using the SIAQUA-IPH model. *Technical Strategies in Water Systems*, 3(1), 72-86.
<https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1209996>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با مدل SIAQUA-IPH

محمدرضا فدائی‌تهرانی^{۱*}، مژگان میرزائی^۲

۱. استادیار و عضو هیات علمی، مجتمع عالی آموزشی و پژوهش صنعت آب و برق، پژوهشگاه نیرو، اصفهان، ایران.

۲. استادیار و عضو هیات علمی، گروه مهندسی محیط‌زیست و HSE، موسسه آموزش عالی غیرانتفاعی دانش‌پژوهان پیشرو، اصفهان، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: mfadaei@nri.ac.ir

© The Author(s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی و شبیه‌سازی انتشار آلاینده‌های نقطه‌ای در رودخانه زاینده‌رود، یکی از مهم‌ترین منابع آبی فلات مرکزی ایران که به شدت تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی و تخلیه پساب‌های صنعتی و شهری قرار گرفته، می‌پردازد. هدف این پژوهش، ارزیابی قابلیت مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS برای شبیه‌سازی تغییرات کیفی آب شامل پارامترهای DO، BOD، نیترات و فسفات ناشی از منابع آلاینده نقطه‌ای نظیر صنایع ذوب‌آهن، فولاد مبارکه و پلی‌اکریل واقع در حوضه آبریز زاینده‌رود است. در این راستا، با استفاده از نرم‌افزارهای GIS و مدل SIAQUA-IPH، شبکه زهکشی رودخانه زاینده‌رود به ۴۱۱ زیرشاخه تقسیم و خصوصیات هیدرولوژیکی آن با استفاده از نرم‌افزار SMADA استخراج شد. داده‌های مربوط به غلظت آلاینده‌ها از هفت ایستگاه نمونه‌برداری در طول رودخانه جمع‌آوری و در مدل به کار گرفته شد. بنابر نتایج شبیه‌سازی، ضریب همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مستخرج از مدل برای DO، BOD، نیترات و فسفات به ترتیب برابر ۰/۹۴، ۰/۹۸، ۰/۶۰ و ۰/۶۶ بدست آمد که نشانگر دقت بالای مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی مقادیر DO و BOD است، در حالی که عملکرد آن در شبیه‌سازی نیترات و فسفات در حد متوسط ارزیابی شد. با این وجود، تطابق نسبتاً خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، قابلیت اطمینان این مدل را برای ارزیابی آلودگی نقطه‌ای در زاینده‌رود تأیید کرد. تحلیل نتایج همچنین نشان داد که سه مجموعه صنعتی مورد مطالعه نقش مؤثری در افزایش BOD و کاهش DO در طول رودخانه دارند، به گونه‌ای که میزان BOD حدود ۵۸ درصد افزایش و DO حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. در نهایت، این پژوهش بر اهمیت استفاده از ابزارهای GIS و مدل‌های شبیه‌سازی در درک و پیش‌بینی اثرات آلودگی‌های نقطه‌ای بر کیفیت آب رودخانه‌ها تأکید کرده و ضرورت اتخاذ تدابیر مؤثر برای کنترل و کاهش تخلیه آلاینده‌ها به زاینده‌رود را مورد توجه قرار می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل کیفی، آلودگی نقطه‌ای، منابع آب سطحی، زاینده‌رود

استناد: فدائی‌تهرانی، م.، میرزائی، م. (۱۴۰۴). بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با مدل SIAQUA-IPH. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۱): ۷۲-۸۶. <https://doi.org/10.30486/TSWS.2025.1209996>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

آب مهم‌ترین بخش از یک زیست‌بوم و عدم آلودگی آن برای بقاء موجودات یک مسئله حیاتی است (Aznar-Sánchez et al., 2019). رودخانه آبی است که به صورت آزاد جریان دارد و ممکن است در مسیر حرکت خود، ورودی‌هایی از زباله‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی در مناطق مسکونی، کشاورزی و صنعتی را دریافت کند. تخلیه آلودگی به رودخانه‌ها منجر به تغییرات در عوامل فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آب آن‌ها می‌شود (Akbar & Rahayu, 2023). در بسیاری از مناطق، رودخانه‌ها منابع اصلی آب برای مصارف خانگی، صنعتی و کشاورزی هستند و اغلب پساب‌های بزرگ شهری، صنعتی و رواناب‌های فصلی از زمین‌های کشاورزی را به مناطق پایین‌دست منتقل می‌کنند. کیفیت آب به شرایط زمین‌شناسی و زیست‌بوم محلی بستگی دارد و فعالیت‌های انسانی می‌تواند تأثیر منفی بر کیفیت آب داشته باشد (Yaling & Zhang, 2014). کیفیت آب رودخانه تحت تأثیر زیادی از کاربری زمین و فعالیت‌های انسانی در حوضه آبخیز قرار دارد (Rachmansyah, 2021). تخلیه آلودگی‌های مختلف شهری، صنعتی و کشاورزی، بیش از ظرفیت خودپالایی رودخانه، منجر به تخریب زیست‌بوم رودخانه و افزایش هزینه‌های تصفیه آب در مناطق پایین‌دست می‌شود (Fadaei Tehrani & Mirzaei, 2024). کیفیت آب رودخانه نیز به شدت توسط متغیرهای شیمیایی، فیزیکی و بیولوژیکی تعیین می‌شود و با نیازهای انسانی، به ویژه برای اهداف کشاورزی و مصرف روزانه مرتبط است (Aznar-Sánchez et al., 2019). تقاضای بیولوژیکی اکسیژن (BOD^1) ارتباط قوی با اکسیژن محلول دارد و این نشان دهنده نیاز به اکسیژن برای تجزیه مواد آلی موجود در آب است به‌طوری‌که BOD به یک عامل مهم در ارزیابی میزان آلودگی مواد آلی در رودخانه تبدیل شده است (Siwec et al., 2011). نرخ اکسیژن‌زدایی فرآیندی است که در آن میزان اکسیژن کاهش می‌یابد و این کاهش به دلیل استفاده ریزموجودات از اکسیژن برای تجزیه آلاینده‌ها رخ می‌دهد (Kumarasamy, 2015). اکسیژن‌زدایی یک فرآیند مهم در تلاش رودخانه برای خودپالایی است که به معنای از بین بردن ترکیبات آلوده‌کننده است که از نظر بیولوژیکی تجزیه‌پذیر هستند تا آب را دوباره تصفیه کند (Fadaei Tehrani & mirzaei, 2024). در تخصیص بار آلودگی به منابع مختلف آلودگی، لازم است استانداردهای محیط‌زیستی و همچنین هزینه‌های تصفیه را در نظر گرفت (Sinulingga et al., 2023). تاکنون تعداد زیادی مطالعه و پژوهش علمی در مدل‌سازی انتشار آلاینده در رودخانه‌ها به انجام رسیده و مدل‌های نرم‌افزاری متعددی توسعه داده شده است (Alizadeh et al., 2017; Fadaei Tehrani & Mirzaei, 2024; Jamalianzadeh et al., 2022; Kannel et al., 2007; Kospa & Rahmadi, 2019; Niksokhan et al., 2009; Zare Farjoudi et al., 2020). بطور مثال، Afrous & Zallaghi (2020) از مدل کیفی QUAL2Kw برای شبیه‌سازی متغیرهای کیفی NO_3^- و PO_4^{3-} در هفت ایستگاه در رودخانه دز با طول ۱۵ کیلومتر استفاده کردند. مقادیر متغیرهای کیفیت رودخانه و سایر اطلاعات بدست آمده از مطالعات میدانی برای واسنجی و پیش‌بینی مدل استفاده شد. علاوه‌براین، MAE^2 (میانگین خطای مطلق) و CV^3 (ضریب تغییرات) برای تعیین اعتبار مدل و مقایسه داده‌های مشاهده‌ای استفاده شد. نتایج مدل نشان‌دهنده شرایط واقعی رودخانه نشان‌دهنده توانایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی متغیرهای کیفی است. آلودگی اصلی رودخانه دز ناشی از فاضلاب شهری است. با توجه به نتایج متغیر PO_4^{3-} در دوره مطالعه در منطقه ورود فاضلاب به رودخانه دز، این متغیر تهدیدی برای زندگی آبزیان محسوب می‌شود. نرخ پایین تخلیه در پایین‌دست رودخانه دز و بارگذاری بالای آلاینده‌ها باعث افزایش غلظت متغیرهای کیفیت آب شده است. در مطالعه دیگری، برای شبیه‌سازی رودخانه ارداک در خراسان رضوی، (Rahmati et al., 2020) از مدل دینامیکی QUAL2Kw استفاده کردند. برای واسنجی، از داده‌های آبان ماه ۱۳۹۳ در شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی استفاده شد و برای اعتبارسنجی، از متغیرهای مختلف کیفیت آب ماه مه ۲۰۱۶ استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل برای متغیرهای NO_3^-

¹ Biochemical Oxygen Demand² Mean Absolute Error³ Coefficient of Variation

COD^1 ، pH و DO^2 مناسب است و می‌تواند متغیرهای کیفیت آب را در هر دو شاخه رودخانه اردک شبیه‌سازی کند. همچنین، کیفیت آب در شاخه آبغد به دلیل ثبات جمعیت و منابع آلودگی کم، بالاتر است. کیفیت آب در هر دو شاخه تحت تأثیر آلودگی‌های کشاورزی و باغداری و همچنین دفع فاضلاب روستاها است. (Sinulingga et al., 2023) تحلیل کیفیت آب رودخانه آساهان در منطقه شهر تانجونگ‌بالای را بررسی کردند. هدف آن‌ها تحلیل کیفیت آب بر اساس روش شاخص آلودگی (IP^3) در رودخانه آساهان در شهر تانجونگ‌بالای بود. در این پژوهش شش ایستگاه نمونه‌برداری بر اساس فعالیت‌های جامعه محلی با سه تکرار نمونه‌گیری وجود داشت. روش‌های تجزیه و تحلیل داده‌ها از این مطالعه، تجزیه و تحلیل کیفیت آب با استفاده از روش شاخص آلودگی (IP) و تجزیه و تحلیل استراتژی کنترل آلودگی آب بود. نتایج تجزیه و تحلیل کیفیت آب بر اساس شاخص آلودگی آب رودخانه آساهان در شهر تانجونگ‌بالای نشان داد که میانگین شاخص آلودگی آب در رده با آلودگی متوسط قرار دارد. بنابر نتایج این مطالعه، آلودگی آب به دلیل متغیرهای فسفات، مواد شوینده، روغن و گریس و کلیفرم کل رخ داده است. همچنین تاکنون مطالعات متعددی در حوضه تحلیل کیفی آب زاینده‌رود به انجام رسیده است (Hazbavi & Kalehhouei, 2020; Mahabadi et al., 2023; Mansourmoghaddam et al., 2024). در این مطالعات، آلودگی زاینده‌رود در چهار منطقه تغییر کاربری اراضی بالادست، مراکز صنعتی قبل از اصفهان، ورود آلاینده‌ها و فاضلاب در محدوده شهری اصفهان و ورود حجم عظیم فاضلاب و پساب نیمه‌تصفیه‌شده یا تصفیه‌نشده بعد از شهر اصفهان تا باتلاق گاوخونی مورد مطالعه قرار گرفته است (Jamalianzadeh et al., 2022).

هدف از این مقاله، شبیه‌سازی پخش آلودگی زاینده‌رود ناشی از منابع نقطه‌ای با استفاده از مدل SIAQUA-IPH است. نتایج این مطالعه می‌تواند بطور خاص در برنامه‌ریزی و مدیریت کیفیت رودخانه زاینده‌رود و بطور عمومی در معرفی یک ابزار مناسب برای تحلیل کیفی آب رودخانه‌های ایران و توسعه برنامه کنترل بار آلودگی برای رودخانه به منظور تضمین سلامت کیفی آب، و کاربردهای مشابه در سازمان‌های مرتبط مورد استفاده قرار گیرد.

۲- روش کار

۲-۱- معرفی محدوده مورد مطالعه

زاینده‌رود به عنوان پر آب‌ترین و با اهمیت‌ترین رودخانه مرکزی ایران است که از دامنه‌های شرقی کوه بختیاری در زاگرس میانی سرچشمه می‌گیرد و با جهت عمومی شرق به غرب از چهل‌گرد تا باتلاق گاوخونی به طول ۳۵۰ کیلومتر امتداد می‌یابد. منطقه مورد مطالعه حوضه آبریز زاینده‌رود با مساحت حدود ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع، از ارتفاعات زاگرس و کوه‌های مرتفع زرد کوه بختیاری در غرب اصفهان شروع و در تالاب گاوخونی در شرق استان به پایان می‌رسد. قسمت عمده حوضه دارای اقلیم خشک و نیمه خشک می‌باشد. حداکثر بارش حوضه در منطقه کوه‌رنگ به میزان ۱۴۱۰ میلی‌متر و حداقل آن در ورزنه برابر ۸۸ میلی‌متر ثبت شده است (Mahabadi et al., 2023). در شکل (۱) حوضه آبریز زاینده‌رود به همراه رودخانه‌های اصلی و فرعی به همراه منابع نقطه‌ای اصلی آلاینده رودخانه قبل از شهر اصفهان، نشان داده شده است. سرچشمه اصلی زاینده‌رود را دو رودخانه مهم پلاسجان و شاخه‌های اصلی زاینده‌رود تشکیل می‌دهد (Mahabadi et al., 2023). شاخه اصلی زاینده‌رود که پس از مشروب کردن استان چهارمحال و بختیاری با پیمودن ۷۵ کیلومتر به سد مخزنی زاینده‌رود می‌رسد. در حد فاصل سد تا اصفهان، دو شاخه فرعی مهم دیگر به نام‌های مرغاب و شور دهقان به ترتیب از شمال و جنوب به رودخانه متصل می‌شود. در این

¹ Chemical Oxygen Demand

² Dissolved Oxygen

³ Index of Pollution

پژوهش از نرم‌افزارهای ArcView، ARCGIS، Idrisi، MapWindow GIS و SMADA استفاده شد. همچنین، مدل L_THIA جهت مدل‌سازی آلودگی غیرنقطه‌ای و مدل SIAQUA_IPH برای مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای به کار گرفته شد. پس از مدل‌سازی آلودگی آب‌های سطحی ناشی از منابع نقطه‌ای توسط مدل SIAQUA-IPH، مدل‌سازی آلودگی آب‌های سطحی ناشی از منابع غیرنقطه‌ای با استفاده از مدل L-THIA انجام شد.

شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز زاینده‌رود به همراه شبکه آبراهه و ایستگاه‌های اندازه‌گیری

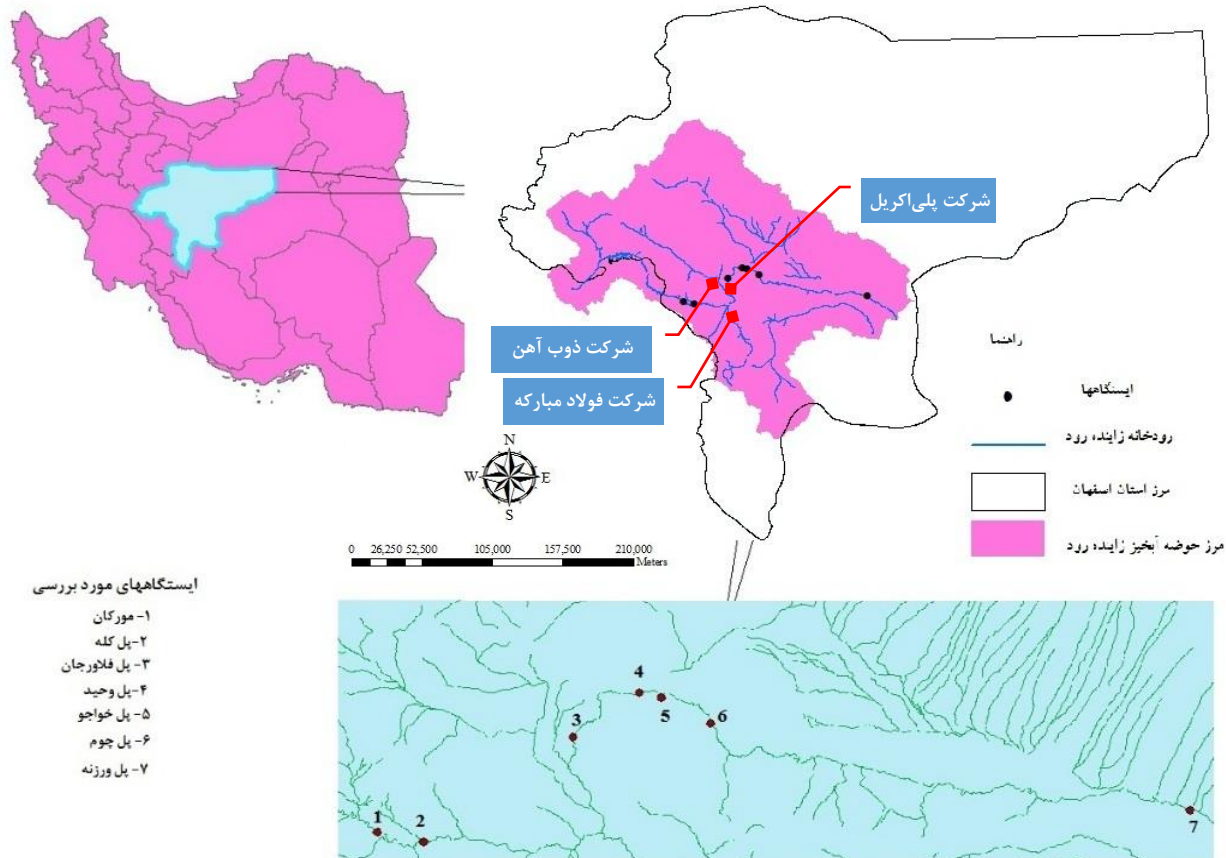


Fig 1. Location of the Zayandeh Rud watershed, the river network, and the monitoring stations

۲-۲- مدل SIAQUA-IPH

مدل‌ها جهت اندازه‌گیری گستره‌ای از خصوصیات و ارائه رفتار سیستم‌های طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌سازی کیفیت آب شامل استفاده از معادلات ریاضی برای شبیه‌سازی سرنوشت و انتقال آلاینده‌های انتشار یافته در آب است. به تازگی مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی کیفیت آب توسعه یافته است که بطور معمول برای ارزیابی اثرات رهاسازی آلاینده‌ها در رودخانه‌های به نسبت کوچک، استفاده می‌شوند. ترکیب مدل کیفیت آب با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، می‌تواند در بررسی مسائل در مقیاس بزرگ مورد استفاده قرار گیرد، زیرا اجازه می‌دهد یک ارزیابی راحت از همه اثرات ممکن در منطقه با هزینه کم و دید جامع از منطقه بر حسب ابعاد فیزیکی صورت گیرد. مدل SIAQUA-IPH، حالت‌های مختلف انتشار پساب در رودخانه‌های با حوضه‌های بزرگ (بزرگتر از ۳۰۰۰ کیلومترمربع) را بررسی می‌کند. هرچند، این مدل می‌تواند در حوضه‌های کوچک‌تر هم مورد استفاده قرار بگیرد. مدل SIAQUA-IPH سازگار با شرایط کشورهای مختلف است و امکان شبیه‌سازی انواع انتشار پیوسته، لحظه‌ای و انتشار با مدت محدود را دارد. این مدل از یک روش شبیه‌سازی بر اساس راه‌حل‌های سلسله مراتبی و معادلات

ضرایب پراکندگی طولی بهره می‌برد. این مدل از طریق معادلات برنامه‌نویسی شده در محیط GIS به دست آمده است و با جفت‌شدگی کامل با نرم‌افزار GIS، اثرات رهاسازی آلاینده‌ها از منابع نقطه‌ای را شبیه‌سازی می‌کند. مدل SIAQUA-IPH مخفف "شبیه‌سازی سلسله مراتبی کیفیت آب" به زبان پرتغالی است و توسط موسسه تحقیقات هیدرولوژی کشور برزیل در سال ۲۰۱۳ توسعه داده شده است (Fan et al., 2015). مدل SIAQUA-IPH، همچنین سرنوشت و انتقال آلاینده‌ها را نیز مورد بررسی قرار می‌دهد. محاسبات انتقال آلاینده‌ها در طول شبکه زهکشی با استفاده از راه‌حل‌های سلسله مراتبی از معادلات انجام می‌شود. با فرض رهاسازی آبی یک آلاینده با حجم M در نقطه $x=0$ در یک رودخانه، غلظت در هر نقطه از پائین‌دست رودخانه، قرار گرفته در نقطه x (فاصله از نقطه تخلیه یا رهاسازی بر حسب متر) و در لحظه t می‌تواند توسط رابطه (۱) محاسبه شود (Chapra, 1997; Ennet et al., 2008):

$$c(x, t) = \frac{M}{A \cdot \sqrt{4 \cdot \pi \cdot EL \cdot t}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - u \cdot t)^2}{4 \cdot EL \cdot t} \right] - k \cdot t \quad (1)$$

در این معادله، $c(x, t)$ ، غلظت در مکان x و در زمان t (بر حسب میلی‌گرم در لیتر) است. EL ، ضریب پراکندگی طولی بر حسب ms^{-1} ، M ، حجم مواد وارد شده به سیستم بر حسب گرم، A ، مساحت بخشی که انتشار در آن اتفاق می‌افتد بر حسب مترمربع و k ضریب اولین تجزیه بر حسب s^{-1} است.

در این پژوهش، کاربرد مدل SIAQUA-IPH در پنج گام انجام شد:

گام اول: پیش پردازش داده‌ها که خود شامل داده‌های هندسی حوضه (طول و شیب رودخانه)، داده‌های هیدرولیک، نقشه زهکشی و اطلاعات مربوط به آلودگی (BOD ، DO ، نیترات، فسفات) است.

گام دوم: تعریف ویژگی‌های هیدرولیکی.

گام سوم: بررسی رهاسازی آلاینده‌ها.

گام چهارم: واسنجی متغیرها (حسب نیاز).

گام پنجم: پردازش نهایی و نمایش نتایج.

برای پردازش توسط مدل، shapefile شبکه زهکشی به همراه ستون‌های توصیفی متعلق به هر زیرشاخه رودخانه زاینده‌رود در افزونه Taudem در محیط GIS بدست آمد. در رابطه با رودخانه زاینده‌رود، ۴۱۱ زیرشاخه ایجاد شد. در مدل برای هر زیرشاخه خصوصیات ژئومتری از جمله طول هر بخش رودخانه، شیب، مساحت زیرحوضه متعلق به هر زیرشاخه، زیرحوضه‌هایی که بلافاصله در پائین‌دست هر شاخه رودخانه قرار می‌گیرند، و طول و عرض جغرافیایی هر شاخه، وارد شد. سپس خصوصیات هیدرولوژیکی یعنی دبی جریان با دوره‌های بازگشت ۱۰، ۳۰، ۵۰، ۷۰ و ۹۰ ساله به همراه سرعت آب و سطح مقطع هر بخش از رودخانه، نیز در یک فایل جداگانه با پسوند txt ذخیره شد. این داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SMADA و بررسی‌های آماری بدست آمدند. سپس در مدل، با معرفی داده‌های تهیه شده اقدام به شبیه‌سازی شد. در شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای اطلاعاتی راجع به غلظت آلاینده، BOD ، COD ، نیترات، فسفر و کلی فرم مورد نیاز است که از طریق اطلاعات ثبتی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری، حاصل شد. برای این منظور، مطابق شکل (۱)، تعداد هفت ایستگاه در طول رودخانه زاینده‌رود انتخاب و متغیرهای کیفی آب اندازه‌گیری شده در این ایستگاه‌ها استفاده شد. همچنین، برای شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای از ایستگاه‌های پل کله تا فلاورجان، ایستگاه لنج به دلیل قرارگیری بین نقاط آلاینده ذوب‌آهن، فولاد و پلی‌اکریل انتخاب شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی داده‌های کیفی ایستگاه‌های هیدرومتری

بررسی داده‌های کیفی اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری نشان داد، کیفیت آب زاینده‌رود تا قبل از زرین‌شهر تغییر شکل خاصی ندارد، اما در حد فاصل زرین‌شهر تا شهر اصفهان که تخلیه آلاینده‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به داخل رودخانه انجام می‌شود، کیفیت آب تنزل می‌یابد. بنابراین، تغییرات کاربری بالادست سهم بزرگی در تغییرات کیفی آب زاینده‌رود نداشته است هرچند، نمی‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. از شرق اصفهان تا باتلاق گاوخونی نیز به علت تخلیه فاضلاب تصفیه‌خانه جنوب اصفهان و شور بودن اراضی منطقه، کیفیت آب رودخانه بسیار پایین آمده و بعد از محل پل فارغان استفاده از آب رودخانه حتی جهت مصارف کشاورزی نیز غیرممکن شده است.

۳-۲- تحلیل مدل SIAQUA-IPH

در این پژوهش چهار متغیر BOD، DO، فسفات و نیترات توسط مدل SIAQUA-IPH شبیه‌سازی شد. واسنجی مدل SIAQUA-IPH می‌تواند به طوردستی یا اتوماتیک انجام شود. در این پژوهش، جهت مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای، حد فاصل ایستگاه‌های پل کله و ایستگاه لنج انتخاب شد، زیرا مابین این دو ایستگاه، دو کارخانه بزرگ ذوب آهن و صنایع فولاد، در حال فعالیت هستند. لذا مدل‌سازی در سرشاخه‌های ما بین این دو ایستگاه صورت گرفت. در مدل شبیه‌سازی SIAQUA-IPH، می‌توان هر بخش از رودخانه را انتخاب و مورد شبیه‌سازی قرار داد. مدل‌سازی BOD، DO، نیترات و فسفات در طی دو فصل صورت گرفت. نتایج در شکل (۲) و (۳) نمایش داده شده است. در مدل SIAQUA-IPH، برای ارزیابی دقت مدل مطابق رابطه (۲) از ضریب F_{obj} استفاده می‌شود که در فرمول زیر محاسبه می‌شود (UFRGS, 2015):

$$F_{obj} = \sum_{i=0}^N \left(\frac{C_{obs} - C_{calc}}{C_{obs}} \right) \quad (2)$$

در این معادله، F_{obj} تابع هدف بهینه شده، N تعداد مشاهدات، C_{obs} غلظت مشاهده شده و C_{calc} غلظت محاسبه شده است. هر چقدر میزان این ضریب پایین‌تر باشد، مدل از اعتبار بالاتری برخوردار است. همچنین برای تعیین اعتبار مدل از رابطه (۳) با عنوان مربع ضریب همبستگی (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^1$) نیز استفاده شد.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(Ni(o) - Ni(p))^2}{n}} \quad (3)$$

$Ni(o)$ و $Ni(p)$ به ترتیب نمایانگر مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده و n تعداد داده‌ها است. مطابق رابطه (۴) هر چقدر این ضریب کوچک‌تر باشد، عملکرد مدل قابل قبول‌تر خواهد بود.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Qsim - \bar{Qsim})(Qobs - \bar{Qobs})]^2}{\sum_{i=1}^n (Qsim - \bar{Qsim})^2 \sum_{i=1}^n (Qobs - \bar{Qobs})^2} \quad (4)$$

¹ Root-Mean-Square Deviation Error

که در آن Q_{sim} , $\bar{Q}_{sim}$, Q_{obs} , $\bar{Q}_{obs}$ میانگین مقادیر مشاهده شده، مقادیر مشاهده شده، میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده و مقادیر شبیه‌سازی شده و n تعداد مشاهدات است. ضریب تبیین بین صفر تا یک تغییر می‌کند و مقدار بهینه آن یک است و این حالت مربوط به زمانی است که در آن مقادیر شبیه‌سازی شده دقیقاً مشابه مقادیر مشاهداتی باشد.

شکل ۲- شبیه‌سازی انواع آلاینده در سرشاخه مابین ایستگاه پل کله و لنج در زمستان (۵ اسفند ۱۳۹۳)

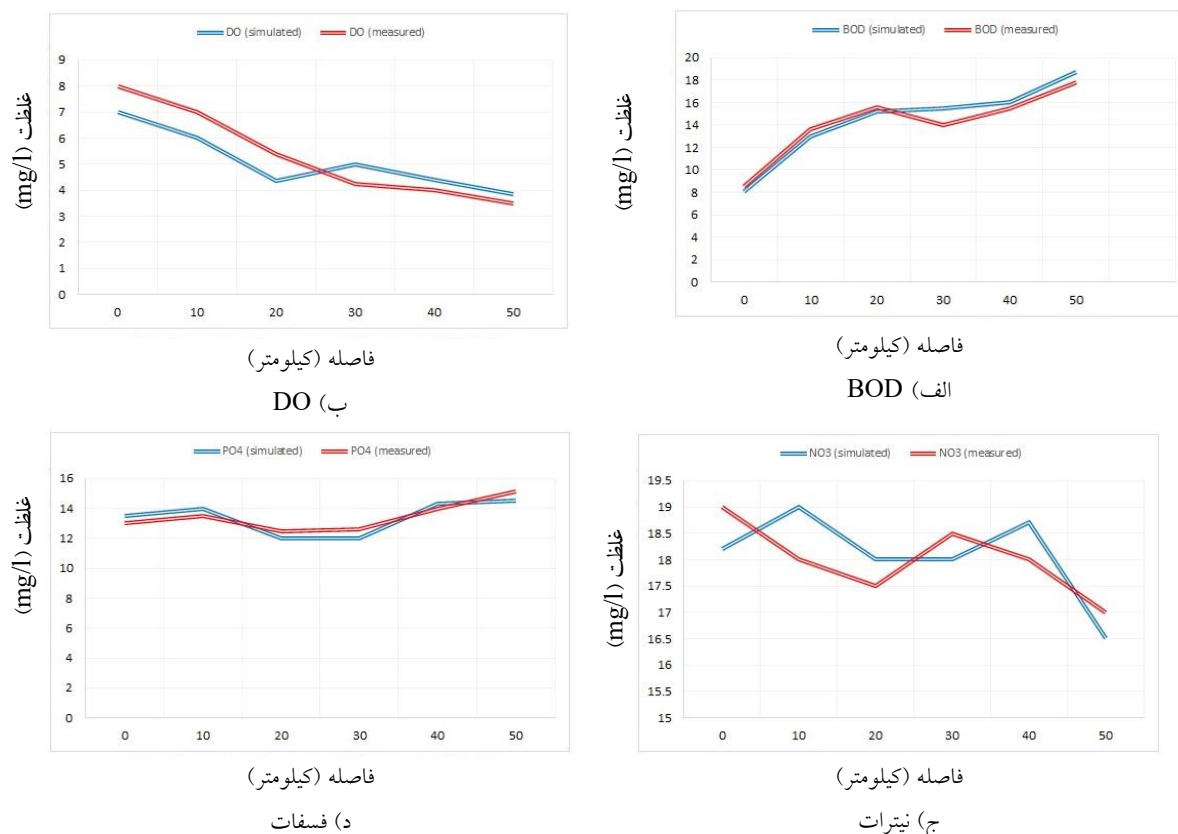


Fig 2. Simulation results for different pollutants at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during winter (March 5, 2015)

همانگونه که در شکل (۲-الف) دیده می‌شود، بیشترین غلظت مشاهده شده و محاسبه شده BOD در مسافت ۲۰ و ۵۰ کیلومتری از ایستگاه پل کله است که در مسافت ۱۰ کیلومتری کارخانه ذوب‌آهن اصفهان واقع شده است. روند رو به افزایش BOD در مسافت ۳۰ کیلومتری، دوباره مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است، در مسافت ۳۰ کیلومتری نیز صنایع فولاد مبارکه واقع شده است. ضرایب آماری محاسبه شده حاکی از آن است که مدل SIAQUA-IPH دقت بالایی در محاسبه BOD دارد. نتایج داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده حاکی از آن است که میزان اکسیژن محلول از پل کله تا لنج روند نزولی را طی می‌کند و در مسافت سی و پنجاه کیلومتری، به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۲-ب). نتایج آماری نیز دقت خوب مدل برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول را تأیید می‌کند.

بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، در محل پل کله و همچنین فاصله ۳۰ کیلومتری آن، بیشترین میزان نیترات دیده می‌شود، اما مدل، بیشترین میزان را در فاصله ۱۰ و ۴۰ کیلومتری نشان می‌دهد (شکل ۲-ج). ضرایب آماری نیز حاکی از آن است که مدل در شبیه‌سازی نیترات، دقت بالایی ندارد. بر اساس نتایج به دست آمده، آب رودخانه پس از عبور از صنایع فولاد مبارکه، در رابطه با متغیر فسفات، روند صعودی دارد (شکل ۲-د). دقت مدل برای شبیه‌سازی این متغیر تا حدودی خوب است.

شبیه‌سازی متغیرهای DO ، BOD ، فسفات و نیترات در فصل بهار نیز انجام شد (شکل ۳) و نتایج نشان داد مدل، در شبیه‌سازی DO و BOD با دقت بسیار بالایی عمل می‌کند. به‌طورکلی، شبیه‌سازی متغیرهای در نظر گرفته شده نشان می‌دهد که علاوه بر آلودگی‌های غیرنقطه‌ای ناشی از کشاورزی، دو کارخانه ذوب‌آهن و صنایع فولاد نیز در افزایش آلودگی نقش بسزایی دارند. حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی توسط ضرایب آماری در جدول (۱) ارائه شده است. اعتبارسنجی نتایج مدل برای افزایش سطح اعتماد کاربر در قابلیت پیش‌گویانه مدل ضروری است. جهت اعتبارسنجی مدل از داده‌های مربوط به پاییز ۱۳۹۴ استفاده شد که نتایج در شکل (۴) نمایش داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی توسط ضرایب آماری در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج حاصل از اعتبارسنجی نیز نشان داد که مدل، دقت بسیار خوبی برای پیش‌گویی وضعیت DO و BOD و فسفات در آب‌های سطحی را داراست. این دقت برای نیترات نیز تا حدی قابل قبول است.

شکل ۳- شبیه‌سازی انواع آلاینده در سرشاخه مابین ایستگاه پل کله و لنج در بهار (۱۷ فروردین ۱۳۹۴)

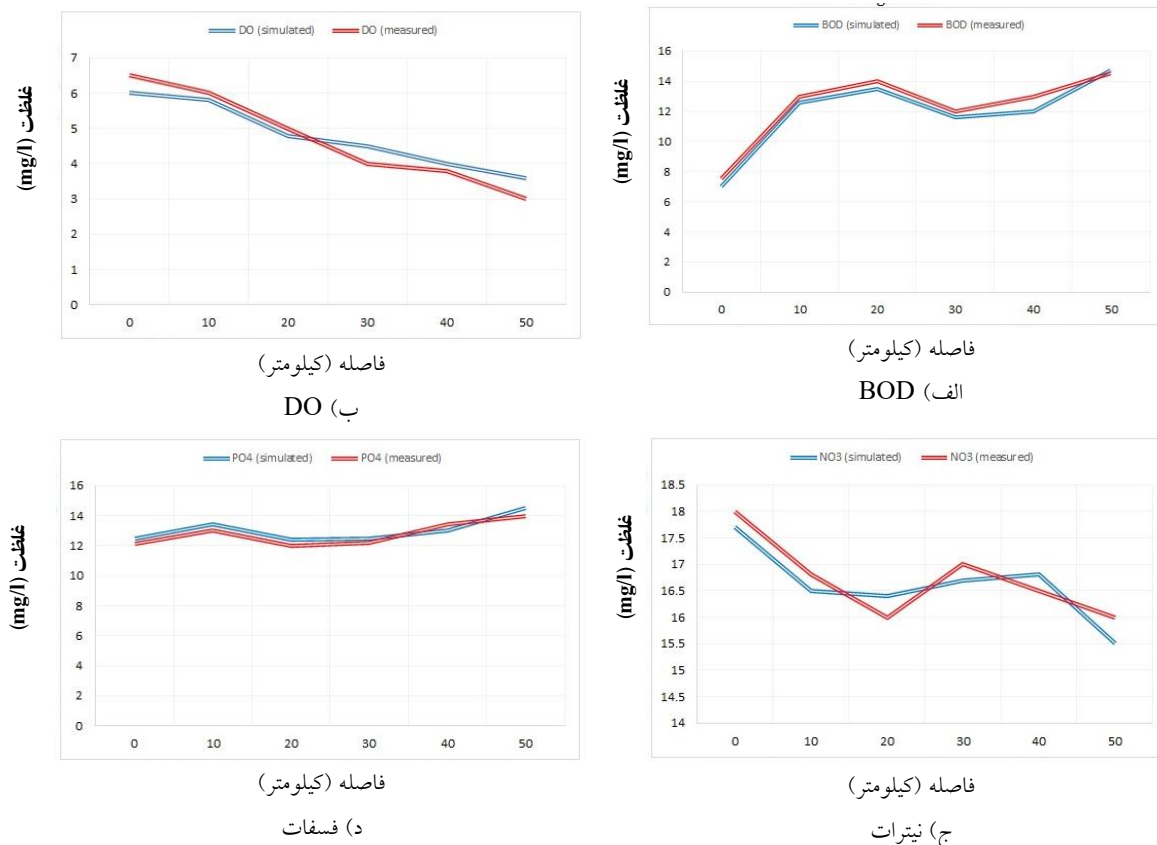


Fig 3. Simulation results for different pollutants at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during spring (April 7, 2015)

جدول ۱- ضرایب آماری به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره واسنجی

Table 1. Statistical coefficients for evaluating model performance during the calibration period.

متغیر	فصل و سال	R ²	RMSE	Fobj
BOD	زمستان ۱۳۹۳	۰/۹۱	۰/۹	۰/۰۰۶
DO	زمستان ۱۳۹۳	۰/۸۵	۰/۵	۰/۰۲۰
نیترات	زمستان ۱۳۹۳	۰/۳۰	۰/۶۸	۰/۰۱
فسفات	زمستان ۱۳۹۳	۰/۷۵	۰/۴۲	۰/۰۰۱
BOD	بهار ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۰۰۱
DO	بهار ۱۳۹۴	۰/۹۷	۰/۳۵	۰/۰۱
نیترات	بهار ۱۳۹۴	۰/۷۶	۰/۳۱	۰/۰۰۴
فسفات	بهار ۱۳۹۴	۰/۸۳	۰/۳۴	۰/۰۰۰۹

شکل ۴- شبیه‌سازی متغیرهای کیفی در سرشاخه محدوده ایستگاه پل کله تا لنج در پاییز (۱۵ آبان ۱۳۹۴)

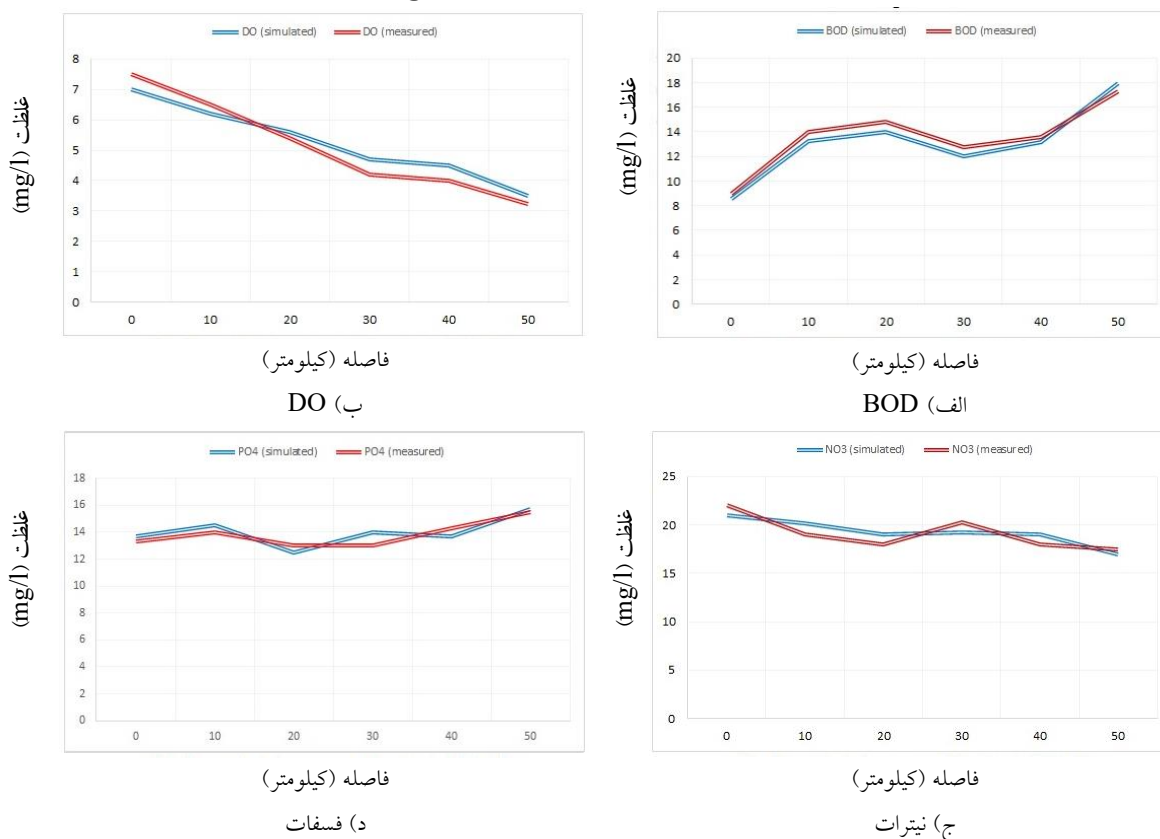


Fig 4. Simulation results for qualitative variables at the upstream section between Pol-e-Kaleh and Lenj stations during autumn (November 5, 2015)

جدول ۲- ضرایب آماری به منظور ارزیابی عملکرد مدل در دوره اعتبارسنجی

Table 2. Statistical coefficients for evaluating model performance during the validation period

متغیر	فصل و سال	R ²	RMSE	Fobj
BOD	پاییز ۱۳۹۴	۰/۹۴	۰/۵۶	۰/۰۰۲
DO	پاییز ۱۳۹۴	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۰۰۷
نیترات	پاییز ۱۳۹۴	۰/۶۰	۰/۷۵	۰/۰۰۲
فسفات	پاییز ۱۳۹۴	۰/۶۶	۰/۴۵	۰/۰۰۲

رودخانه زاینده‌رود و نقش آن با توجه به موقعیت و مشخصات آن، بر هیچ کسی پوشیده نیست. بنابراین، لزوم برنامه‌ریزی و اصلاح عوامل تشدیدکننده آلودگی زاینده‌رود کاملاً حیاتی است. در این پژوهش سعی شد تا با معرفی مدل SIAQUA_IPH به عنوان یک برنامه کاربردی ساده، در دسترس و دقیق جهت شبیه‌سازی انتشار آلودگی‌های نقطه‌ای و بررسی میزان و عوامل ایجادکننده این آلودگی‌ها، بتوان اقدامات مدیریتی جهت بهبود وضعیت این رودخانه را به‌عمل آورد.

نتایج حاصل از این پژوهش، حاکی از افزایش آلاینده‌ها از سال ۱۳۷۶ تا ۱۳۹۴ است. با توجه به خشکی رودخانه از سال ۱۳۹۵، مدل‌سازی انتشار آلاینده‌ها در دهه اخیر ناممکن است. از آنجایی که در این بازه زمانی، کاربری اراضی به سمت کاهش اراضی مرتعی، جنگلی، و افزایش اراضی بایر و اراضی شهری و کشاورزی در سطح کل حوضه پیش رفته است، لذا وضعیت نامناسب کیفیت آب را می‌توان به افزایش اراضی شهری و بایر و اراضی زراعی نسبت داد. بنابراین، مدل ارزیابی بلندمدت هیدرولوژیکی قادر است با داده‌های نسبتاً کم، وضعیت اثر تغییر کاربری اراضی بر کیفیت آب را بررسی کند و بدین ترتیب می‌توان مناطق بحرانی را شناسایی و مدیریت کرد. در این تحقیق، مدل SIAQUA_IPH توانست با دقت و صحت قابل قبول به مدل‌سازی متغیرهای کیفیت آب بپردازد. درنهایت، وجود دو صنعت ذوب‌آهن اصفهان و صنایع فولاد مبارکه در افزایش آلودگی نقطه‌ای آب تأثیر بسزایی دارند. بنابراین لازم است تدابیر مدیریتی جهت جلوگیری از ورود پساب‌های حاوی آلاینده‌های این صنایع به منابع آب سطحی، به‌عمل آید.

نتایج حاصل از کاربرد مدل SIAQUA_IPH نشان داد که این مدل قابلیت بالایی برای پیش‌بینی BOD، DO و فسفات دارا است، اما در رابطه با نیترات چندان موفق عمل نمی‌کند، هر چند نتایج در مورد این شبیه‌سازی هم، قابل قبول است. دلیل این امر پیچیدگی چرخه این عناصر است. نیترات تحت تأثیر فرآیندهای پیچیده نیتریفیکاسیون و دنیتریفیکاسیون قرار دارد که به شدت به دما، pH و اکسیژن وابسته بوده و نوسانات مکانی و زمانی بالایی دارند. منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای نیتروژن نیز بر پیچیدگی می‌افزایند. فسفات نیز از طریق جذب و دفع توسط رسوبات، جلبک‌ها و تجزیه مواد آلی دچار تغییر می‌شود. رهاسازی از رسوبات در شرایط بی‌هوایی و منابع ورودی متنوع، مدل‌سازی دقیق آن را دشوار می‌سازد. عدم دقت مدل در وارد کردن این فرآیندها و نبود داده‌های دقیق، دقت پیش‌بینی را کاهش می‌دهد.

نزدیکی داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد، مدل SIAQUA_IPH جهت مدل‌سازی آلودگی نقطه‌ای، تا حد زیادی قابل اطمینان است و می‌توان از این مدل برای پیش‌بینی وضعیت آینده استفاده کرد. همانگونه که (Fan et al., 2015) کارایی این مدل را جهت شبیه‌سازی آلودگی نقطه‌ای تأیید کرد.

نتایج این مطالعه مبنی بر دقت بالای مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی BOD و DO با یافته‌های بسیاری از پژوهش‌های پیشین که کارایی مدل‌های کیفیت آب را در شبیه‌سازی پارامترهای اکسیژنی و آلاینده‌های آلی نشان داده‌اند، همخوانی دارد (Jamalianzadeh et al., 2022; Kannel et al., 2007; Rahmati et al., 2020). با این حال، عملکرد متوسط مدل در شبیه‌سازی نیترات و فسفات، با چالش‌های مشابهی که در کاربرد مدل‌های کیفیت آب برای عناصر مغذی مشاهده شده است، مطابقت دارد. بسیاری از مطالعات نیز به دلیل پیچیدگی‌های چرخه نیتروژن و فسفر و تعامل آن‌ها با محیط و موجودات زنده، دقت پایین‌تری را در مدل‌سازی این پارامترها گزارش کرده‌اند (Afrous & Zallaghi, 2020). تأیید قابلیت اطمینان مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS برای ارزیابی آلودگی نقطه‌ای در زاینده‌رود، یافته‌های مطالعاتی را که بر اهمیت ابزارهای تلفیقی GIS و مدل‌های شبیه‌سازی در مدیریت منابع آب تأکید دارند، تقویت می‌کند. همچنین، یافته‌های مربوط به نقش صنایع در افزایش BOD و کاهش DO، مشابه نتایج تحقیقاتی است که اثرات مخرب پساب‌های صنعتی بر کیفیت آب رودخانه‌ها را برجسته کرده‌اند، و بر اهمیت کنترل منابع آلاینده نقطه‌ای در رودخانه‌های مشابه زاینده‌رود صحنه می‌گذارد (Jamalianzadeh et al., 2022; Sinulingga et al., 2023). وجود کارخانه ذوب‌آهن در ۱۰ کیلومتری و صنایع فولاد در ۳۰ کیلومتری پل کله و

بررسی میزان تغییر آلاینده‌ها با گذشتن از مسافت‌های مختلف توسط مدل، حاکی از این است که وجود کارخانه ذوب‌آهن در افزایش BOD و کاهش DO و وجود صنایع فولاد در افزایش BOD، کاهش DO و افزایش فسفات نقش بسزایی دارند. اما این دو منبع نقطه‌ای در افزایش میزان نترات در حوضه آبریز زاینده‌رود نقشی ندارند. همچنین مدل در دوره واسنجی نسبت به اعتبارسنجی از دقت بیشتری برخوردار است که این وضعیت در همه مدل‌ها دیده می‌شود. چنان‌که نتایج آماری پژوهش‌هایی مانند مطالعات (Jamalianzadeh et al., 2022; Sinulingga et al., 2023; Wang et al., 2007) نشان داد که شبیه‌سازی در طی دوره واسنجی نسبت به دوره اعتبارسنجی، دقت بیشتری دارد.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با بررسی روند تخریب کیفیت آب در رودخانه زاینده‌رود با استفاده از مدل SIAQUA-IPH در محیط GIS، نتایج ارزشمندی را در مورد عوامل موثر بر آلودگی این رودخانه حیاتی فلات مرکزی ایران ارائه می‌کند. نتایج به وضوح نشان داد که فعالیت‌های انسانی، به ویژه تخلیه پساب‌های صنعتی از منابع نقطه‌ای مانند صنایع ذوب‌آهن، فولاد مبارکه و پلی‌اکریل، نقش مؤثری در افزایش آلاینده‌های آلی (BOD) و کاهش اکسیژن محلول (DO) در طول رودخانه دارند. مدل SIAQUA-IPH در پیش‌بینی دقیق BOD و DO موفق عمل کرده و ضرایب همبستگی بالای آن، قابلیت اطمینان مدل را در این زمینه تأیید می‌کند. با وجود عملکرد متوسط‌تر مدل در شبیه‌سازی نترات و فسفات، که ناشی از پیچیدگی چرخه‌های بیوژئوشیمیایی این عناصر است، قابلیت مدل در ارزیابی آلودگی نقطه‌ای قابل قبول ارزیابی شد. تطابق نسبتاً خوب بین داده‌های اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده، مؤید کارایی این ابزار در شناسایی مناطق بحرانی و تدوین برنامه‌های مدیریتی است. افزایش حدود ۵۸ درصدی BOD و کاهش حدود ۵۰ درصدی DO در نتیجه فعالیت صنایع مورد مطالعه، زنگ خطری جدی برای سلامت اکوسیستم رودخانه و منابع آبی پایین‌دست به شمار می‌رود. از آنجایی که خشکی رودخانه زاینده‌رود در سال‌های اخیر مدل‌سازی را دشوار ساخته است، لزوم برنامه‌ریزی جامع و اقدامات فوری برای کنترل منابع آلاینده بیش از پیش آشکار می‌شود. نتایج این مطالعه بر اهمیت استفاده از ابزارهای تلفیقی GIS و مدل‌های شبیه‌سازی نظیر SIAQUA-IPH در درک دینامیک آلودگی آب و پیش‌بینی اثرات بلندمدت آن تأکید دارد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منفعی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

محمدرضا فدایی تهرانی: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها، نرم افزار، راهنمایی و نظارت. مژگان میزایی: تحلیل، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Afrous, A., & Zallaghi, M. (2020). Qualitative simulation of nitrate and phosphate along the Dez river using QUAL2KW model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 50(9), 2099-2111. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2019.280173.668182>
- Akbar, S., & Rahayu, H. (2023). Tinjauan Literature: Bioakumulasi Logam Berat Pada Ikan Di Perairan Indonesia. *Lantanida Journal*, 11, 51-66. <https://doi.org/10.22373/lj.v11i1.17834>

- Alizadeh, M. J., Shahheydari, H., Kavianpour, M., Shamloo, H., & Barati, R. (2017). Prediction of longitudinal dispersion coefficient in natural rivers using a Cluster based Bayesian network. *Environmental Earth Sciences*, 76. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6379-6>
- Aznar-Sánchez, J. A., Velasco Muñoz, J., Belmonte, L., & Manzano-Agugliaro, F. (2019). The worldwide research trends on water ecosystem services. *Ecological Indicators*, 99, 310-323. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.12.045>
- Chapra, S. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. 1
- Ennet, P., Pachel, K., Viies, V., Jurimagi, L. & Elken, R. (2008). Estimating water quality in river basins using linked models and databases/andmebaasidel rajanev veekvaliteedi modelleerimine [Report]. *Estonian Journal of Ecology*, 57, 83.
- Fadaei Tehrani, M. R., & Mirzaei, M. (2024). Spatial-temporal qualitative analysis of Zayandehrud River based on upstream land use. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, <https://doi.org/10.30492/ijcce.2024.2022035,6430>
- Fan, F., Fleischmann, A., Collischonn, W., Ames, D., & Rigo, D. (2015). Large-scale analytical water quality model coupled with GIS for simulation of point sourced pollutant discharges. *Environmental Modelling & Software*, 64, 58-71. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.11.012>
- Hazbavi, Z., & Kolehrouei, M. (2020). Watershed Management Sciences and Engineering Conference in Iran: History and Highlights. *mdrsjns*, 8(4), 231-245. <http://ecopersia.modares.ac.ir/article-24-38221-en.html>
- Jamalianzadeh, S. F., Rabieifar, H., Afrous, A., Hosseini, A., & Ebrahimi, H. (2022). Modeling DO and BOD₅ changes in the Dez river by using QUAL2Kw. *Pollution*, 8(1), 15-35. <https://doi.org/10.22059/poll.2021.322725.1070>
- Kannel, P., Lee, S., Kanel, S., Lee, Y.-S., & Ahn, K.-H. (2007). Application of QUAL2Kw for water quality modeling and dissolved oxygen control in the river Bagmati. *Environmental Monitoring and Assessment*, 125, 201-217. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9255-0>
- Kospa, D., & Rahmadi. (2019). Influence of community behaviour on water quality in Sekanak river, Palembang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 306, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/306/1/012008>
- Kumarasamy, M. V. (2015). Deoxygenation and reaeration coupled hybridmixing cells based pollutant transport model to assess water quality status of a river. *International Journal of Environmental Research*, 9(1), 341-350. <https://doi.org/10.22059/ijer.2015.906>
- Mahabadi, E., Yazdani Zazerani, M., & Kangarani, H. (2023). Analyzing networks of influence and information exchange in water governance system; case study of Zayandeh-Rud river basin in Isfahan province
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rezaei, M., & Rousta, I. (2024). Quantifying the Zayandeh Rud river drying effects on land surface temperature and adjacent vegetation cover changes over the past 33 years using satellite images. *Climate Change Research*, 5(18), 1-30. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.425449.1175>
- Niksokhan, M. H., Kerachian, R., & Karamouz, M. (2009). A game theoretic approach for trading discharge permits in rivers. *Water Science and Technology : A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 60, 793-804. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.394>
- Rachmansyah, A. (2021). Assessment of water quality index and pollution load capacity in the Sukowidi river and Bendo river, Banyuwangi region. *Journal Pembangunan Dan Alam Lestari*, 12. <https://doi.org/10.21776/ub.jp.al.2021.012.01.01>
- Rahmati, S. H., Bavani, A. R., & Nikakhtar, M. (2020). Simulating water quality of ARDAK river (Khorasan Razavi) using QUAL2KW
- Sinulingga, V., Barus, T., & Wahyuningsih, H. (2023). Analysis of water quality pollution index Asahan river in Tanjungbalai city. *Depik*, 12, 381-388. <https://doi.org/10.13170/depik.12.3.33274>
- Siwicz, T., Reczek, L., Abramowicz, K., Rewicka, A., & Nowak, P. (2011). BOD measuring and modelling methods - review. *Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Land Reclamation*, 43. <https://doi.org/10.2478/v10068-0100-008-0>
- UFRGS, R. G. I. (2015). SIAQUA-IPH – Analytical water quality model fully coupled with GIS. SIAQUA-IPH model and provides downloads of the program and application examples manuals

- Wang, G., Zhang, J. y., & He, R. (2007). Comparison of hydrological models in the middle reach of the Yellow River. *IAHS-AISH Publication*, 158-163
- Yaling, H., & Zhang, Z. (2014). Coupled effects of natural and anthropogenic controls on seasonal and spatial variations of river water quality during baseflow in a coastal watershed of Southeast China. *PloS one*, 9, e91528. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0091528>
- Zare Farjoudi, S., Moridi, A., & Sarang, A. (2020). Multi-objective waste load allocation in river system under inflow uncertainty. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02897-5>