



Hydraulic and Water Quality Simulation in Steep-Slope Rivers (Case Study: Dohezar river, Tonekabon)

Mahdi Nesari¹ | Mohammad Reza Majdzadeh Tabatabai^{2✉}

1. Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_nesari@sbu.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, Faculty of Civil Engineering and Environment, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_majdzadeh@sbu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received 27 October 2024
Received in revised form
12 November 2024
Accepted 5 January 2025
Published online 17 May 2025

Keywords:

HEC-RAS model
Pollutant Transport
Step-Pool
Water Quality Simulation

ABSTRACT

The growth of pollutants in surface water resources has significantly increased, causing adverse effects on the environment and human communities. As a result, the use of mathematical models to simulate river water quality and evaluate various scenarios has become essential. This study utilizes the HEC-RAS model to assess the spatial and temporal distribution of pollutants in mountainous rivers with steep slopes and a step-pool structure, as well as to examine changes in pollutants at sections above and below the step. Four main sections on the Dohezar River in Tonekabon, located upstream, downstream, upstream of the step, and downstream of the step, were studied. Qualitative samples for dissolved oxygen, nitrate, inorganic phosphorus, and water temperature were collected and tested over an eight-month period. The simulation results during calibration and validation periods showed that the mean minimum and maximum total relative errors were 1.05 percent for temperature and 10.18 percent for inorganic phosphorus, respectively, indicating acceptable accuracy of the HEC-RAS model in simulating water quality parameters. Overall, due to stable flow and reduced turbulence, errors were lower in upstream and downstream sections, while error increased in areas downstream of the step due to enhanced turbulence and movement of settled quality parameters. Another reason for increased error in these areas is the model's use of hydrostatic pressure instead of hydrodynamic pressure, which reduces accuracy in turbulent flows. The results indicate that the HEC-RAS model performs well in simulating water quality in mountainous rivers, and improving the simulation of settled quality parameters and nitrate and phosphorus processes can further enhance the model's accuracy.

Cite this article: Nesari, M., & Majdzadeh Tabatabai, M. (2025). Hydraulic and Water Quality Simulation in Steep-Slope Rivers (Case Study: Dohezar river, Tonekabon). *Journal of Water and Irrigation Management*, 15 (1), 19-36. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384294.1186>



© The Author(s).

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384294.1186>

Publisher: University of Tehran Press.



شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت آب رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند (مطالعه موردی: رودخانه دوهزار، تنکابن)

مهدی نساری^۱ | محمدرضا مجدزاده طباطبائی^۲

۱. دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_nesari@sbu.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m_majdzadeh@sbu.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
رشد آلاینده‌ها در منابع آب سطحی به‌طور چشمگیری افزایش یافته و اثرات نامطلوبی بر محیط‌زیست و جوامع بشری داشته است. از این‌رو، استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها و بررسی سناریوهای مختلف ضروری می‌باشد. این پژوهش با استفاده از مدل HEC-RAS با هدف ارزیابی مکانی و زمانی توزیع آلاینده‌ها در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و ساختار پله-گوداب، همچنین بررسی تغییرات آلاینده‌ها در مقاطع بالای پله و پایین پله انجام شده است. چهار مقطع اصلی بر روی رودخانه دوهزار تنکابن واقع در بالادست، پایین‌دست، روی پله و پایین پله مورد مطالعه قرار گرفتند و نمونه‌برداری‌های کیفی اکسیژن محلول، نیترات، فسفر غیرآلی و دمای آب طی یک دوره هشت‌ماهه جمع‌آوری و آزمایش شدند. نتایج شبیه‌سازی در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که میانگین حداقل و حداکثر خطای نسبی کل به‌ترتیب ۱/۰۵ درصد برای دما و ۱۰/۱۸ درصد برای فسفر غیرآلی بوده است که حاکی از دقت قابل‌قبول مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب است. به‌طورکلی، در مقاطع بالادست و پایین‌دست به‌دلیل پایداری جریان و کاهش تلاطم، خطاها کم‌تر و در نواحی پایین پله به‌دلیل افزایش تلاطم و حرکت پارامترهای کیفی ته‌نشین‌شده، خطا افزایش یافته است. از دیگر دلایل افزایش خطا در این نواحی، در نظر گرفتن فشار هیدرواستاتیکی به‌جای فشار هیدرودینامیکی در مدل است که سبب کاهش دقت در جریان‌های آشفته می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های کوهستانی عملکرد مناسبی دارد و بهبود شبیه‌سازی پارامترهای کیفی ته‌نشین‌شده و فرایندهای نیترات و فسفر می‌تواند دقت مدل را ارتقا دهد.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۶ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ کلیدواژه‌ها: انتقال آلاینده پله-گوداب شبیه‌سازی کیفیت آب HEC-RAS

استناد: نساری، مهدی و مجدزاده طباطبائی، محمدرضا (۱۴۰۴). شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت آب رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند (مطالعه موردی: رودخانه دوهزار، تنکابن). نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۵ (۱)، ۱۹-۳۶. DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2025.384294.1186>



۱. مقدمه

رودخانه‌ها به عنوان یکی از منابع اصلی آب شیرین برای انسان و اکوسیستم‌های طبیعی، نقشی حیاتی در تأمین نیازهای آبی دارند (Mat Saad et al., 2022). لذا کیفیت آب در رودخانه‌ها یکی از مسائل حیاتی و اساسی در مدیریت منابع آبی و حفاظت از محیط‌زیست است (Jung & Kim, 2019). با این حال، رشد جمعیت و توسعه صنعتی باعث افزایش آلودگی آب رودخانه‌ها شده است (Mafinge et al., 2022). آلودگی آب‌های سطحی به دلیل ورود آلاینده‌های شیمیایی، میکروبی و مواد مغذی اضافی منجر به کاهش کیفیت آب و ایجاد تهدیدی جدی برای سلامت عمومی و حیات آبریان شده است، به طوری که طبق گزارش سازمان بهداشت جهانی، آب آلوده سالانه بیش از یک میلیون و پانصد هزار نفر را به کام مرگ می‌کشد که بسیاری از این قربانیان کودکان هستند (WHO, 2022). در ایران براساس گزارش سازمان حفاظت محیط‌زیست، بیش از ۷۰ درصد از منابع آب سطحی کشور به دلیل ورود فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی دچار آلودگی شده‌اند که این مسئله تهدید جدی برای سلامت عمومی و محیط‌زیست کشور محسوب می‌شود (EPO, 2019).

از مهم‌ترین آلاینده‌های شیمیایی می‌توان به چهار عامل نیتрат، اکسیژن محلول، فسفر غیرآلی و دمای آب اشاره نمود. نیترات و فسفر غیرآلی به طور عمده از طریق فعالیت‌های کشاورزی و استفاده از کودهای شیمیایی وارد آب‌های سطحی می‌شوند و تجمع آن‌ها در آب می‌تواند به بروز پدیده تغذیه‌گرایی^۱ منجر شود که در آن افزایش رشد گیاهان آبی و جلبک‌ها^۲ منجر به کاهش اکسیژن محلول در آب و در نهایت مرگ و میر گسترده آبریان می‌شود (EPA, 2021). علاوه بر این، مصرف بیش از حد نیترات و فسفر غیرآلی می‌تواند باعث بروز برخی سرطان‌ها و تأثیرات منفی بر تولیدمثل انسان شود (Ward et al., 2005; Ramlau-Hansen et al., 2020; Ward et al., 2018). از طرفی، اکسیژن محلول که یکی دیگر از شاخص‌های کلیدی کیفیت آب است، به طور مستقیم بر سلامت و بقای آبریان تأثیر می‌گذارد و کاهش آن که ناشی از آلودگی‌های آلی و افزایش مصرف اکسیژن برای تجزیه این مواد بوده، می‌تواند به ایجاد شرایط بی‌هوازی و مرگ آبریان منجر شود، همچنین این معیار اغلب برای ارزیابی سلامت اکوسیستم‌های طبیعی مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و اقیانوس‌ها استفاده می‌شود (Roshangar & Davoudi, 2023). فعالیت‌های انسانی مانند تخلیه فاضلاب‌های صنعتی و شهری بدون تصفیه کافی، از عوامل مهم کاهش اکسیژن محلول در آب‌های رودخانه‌ای هستند (Prabu et al., 2016). افزایش دما نیز به دلیل تغییرات اقلیمی یا فعالیت‌های انسانی مانند تخلیه آب‌های گرم از نیروگاه‌ها، می‌تواند به کاهش اکسیژن محلول و تغییر ترکیب گونه‌های زیستی در آب منجر شود (Kraemer et al., 2022).

مطالعات متعددی در زمینه شبیه‌سازی و ارزیابی کیفیت آب در رودخانه‌ها انجام شده است. Karimi & Salaridaragi (2014) در مطالعه خود، پارامترهایی از جمله دما، مواد جامد معلق، pH، کدورت، BOD، DO، NO₃ و PO₄ در رودخانه‌های کارون، کرخه و دز را اندازه‌گیری کردند. تحلیل داده‌های به دست آمده با استفاده از شاخص کیفیت آب سازمان ملی بهداشت^۳، نشان داد که در شش ماهه اول، شاخص کیفیت آب کمتر از ۵۰ بوده و کیفیت آب ضعیف ارزیابی شد، اما در شش ماهه دوم این شاخص به بالای ۵۰ رسید و بهبود کیفیت آب تا حد معمول مشاهده شد. در پژوهش Moghiminezhad et al. (2018) بررسی تغییرات فصلی پدیده خودپالایی رودخانه کارون مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه، کیفیت آب در طول ۱۱۳ کیلومتر از رودخانه با استفاده از مدل Qual2kw برای متغیرهای BOD، DO، نیترات و کلیرم^۴ شبیه‌سازی شد و نتایج نشان داد که کاهش ۳۰ درصدی غلظت آلاینده‌های ورودی، بیش‌ترین تأثیر را در بهبود میزان نیترات در ماه‌های دی و بهمن و همچنین BOD در تمام ماه‌ها به جز مهرماه داشت.

علاوه بر موارد ذکر شده، Xiao et al. (2020) به مطالعه بر روی تالاب توسط دو مدل HEC-RAS و QUAL2K و ارزیابی نتایج با برداشت‌های میدانی پرداختند. نرخ زوال نیتروژن کل در تالاب‌ها معادل ۲۵/۶۴ درصد در نرم‌افزار HEC-RAS و معادل

۱۳/۵۹ درصد توسط نرم افزار QUAL2K ارزیابی گردید. برای مقادیر فسفر کل نیز این درصدها به ترتیب ۵۰ و ۵۰/۹۱ ارزیابی گردید. در نهایت، دقت مدل HEC-RAS نسبت به مدل QUAL2K، بیش تر ارزیابی شد. همچنین Radfar & Alipour Nasirmahale (2024) با استفاده از مدل های Qual2kw و HEC-RAS، روند آلودگی نیترات در رودخانه تجن را بین ایستگاه های ریگ چشمه و کردخیل بررسی کردند. نتایج نشان داد که در فصل کشت، به دلیل مصرف بی رویه کود و منابع آلاینده غیرنقطه ای، غلظت نیترات تا ۲/۸ برابر افزایش یافته و به حدود ۵۰ درصد میزان اولیه می رسد که این افزایش می تواند منجر به تغذیه گرای و کاهش جمعیت آبزیان در پایین دست رودخانه شود.

در راستای ارزیابی کارایی مدل HEC-RAS در زمینه کیفیت آب، Soleimani (2021) در مطالعه ای تحت عنوان مدل سازی کیفیت آب رودخانه دویرج، به شبیه سازی پارامترهایی از قبیل منیزیم، سدیم و سولفات پرداخته و نتایج نهایی واسنجی و صحت سنجی نشان از قابلیت مناسب مدل HEC-RAS در زمینه شبیه سازی کیفیت آب داشته است، به طوری که ضریب تعیین برای همگی پارامترها بالاتر از ۰/۹ محاسبه گردید. در پژوهشی دیگر، Taralgatti et al. (2020)، به بررسی کیفیت آب رودخانه باهیما در هند با استفاده از مدل HEC-RAS پرداخت. در این مطالعه، مدل هیدرولیک حالت دائمی همراه با مدل کیفیت آب برای رودخانه استفاده گردید. نتایج شبیه سازی این مدل با داده های مشاهداتی مربوط به مؤلفه های نیترات، جلبک و دما مورد ارزیابی قرار گرفت و در نهایت مدل مورد استفاده کارآمد و مؤثر توصیف گردید. همچنین نتایج پژوهش Abed et al. (2020) با انجام مطالعه ای روی رودخانه الغرف که از آبراهه های فرعی رود دجله می باشد، با شبیه سازی مقادیر اکسیژن محلول در آب، فسفات و نیترات با استفاده از نرم افزار HEC-RAS، نشان داد که مقادیر پیش بینی این سه پارامتر، در طول این آبراهه، مجاز بوده است. در مطالعه ای دیگر، Golabini et al. (2022) به ارزیابی کیفیت آب رودخانه دز در شرایط خشکسالی در مسیر رودخانه از محل سد انحرافی تا پایین دست زهکش لوره با مدل HEC-RAS پرداختند و در نهایت روند شاخص NSFQI نزولی برآورد شد که با روند متغیرهای کیفی شبیه سازی شده با مدل HEC-RAS همخوانی داشته و حاکی از عدم خودپالایی نسبی رودخانه در بازه مورد مطالعه بوده است. در همین زمینه، Pourfallah Koushali et al. (2023) به بررسی اثرات سیلاب بر پارامترهای کیفی CBOD، DO و نیتريت در رودخانه زرجوب پرداختند. نتایج این مطالعه نشان می دهد که در شرایط سیلاب، برخلاف شرایط خشک، میزان اکسیژن محلول افزایش ناچیزی در طول رودخانه دارد. همچنین، نتایج شبیه سازی ها همخوانی مطلوبی با داده های اندازه گیری شده نشان می دهد که بر دقت مدل سازی در این زمینه تأکید دارد.

با توجه به مطالعات پیشین، بیش تر پژوهش ها بر روی بازه های سیلاب دشتی متمرکز بوده اند و به سرشاخه های رودخانه ها کم تر توجه شده است. در ایران، سرشاخه های رودخانه ها به طور عمده در مناطق ییلاقی قرار دارند و به دلیل توسعه شهری قابل توجه در این مناطق، آلاینده های زیادی به این بخش ها وارد می شود. در این بازه ها، بستر رودخانه به صورت پله-گوداب ۵ پدیدار می شود لذا جریان سیال دارای دینامیکی خاص می باشد. این رودخانه ها به دلیل جریان سریع و تلاطم خود، به طور طبیعی توانایی خودپالایی بالایی دارند (Paixao & Kobiyama, 2019). مطالعه Kalathil & Chandra (2021) نشان می دهد که در این رودخانه ها، پله ها با ایجاد آشفتگی بالا و تغییر در تنش برشی و انرژی جنبشی، منجر به توزیع ناهمگون سرعت و شدت آشفتگی در بخش های مختلف جریان می شوند که سبب افزایش تلاطم و گرداب های بازگشتی، در بخش پایین پله ها خواهد گردید. با این حال، ورود آلاینده ها به این رودخانه ها می تواند اثرات پیچیده ای داشته باشد. پله-گوداب ها می توانند در راستای تله اندازی و ته نشینی پارامترهای کیفی و آلاینده ها مؤثر باشند و به عنوان مخازن موقت برای آلاینده ها عمل کرده و انتشار آن ها را به تأخیر اندازند. بنابراین، مدیریت و حفاظت از کیفیت آب در بازه های پله-گوداب، نیازمند رویکردهای خاص و دقیق تری است تا بتوان اثرات منفی آلودگی را کاهش داده و اکوسیستم های حساس این مناطق را حفظ کرد.

باوجود پژوهش‌های گسترده‌ای که تاکنون در زمینه کیفیت آب رودخانه‌های سیلاب‌دستی انجام شده است، همچنان نیاز مبرم به مطالعات کیفی در بازه‌های پله-گوداب محسوس می‌باشد. این مطالعه با هدف شبیه‌سازی تغییرات آلاینده‌های اکسیژن محلول، نیتрат، فسفر غیرآلی و دمای آب توسط مدل HEC-RAS در طول بازه پله-گوداب انجام شده است تا بدین ترتیب توانمندی مدل فوق در شبیه‌سازی هیدرولیکی و کیفیت آب در این بازه‌ها به‌ویژه بر روی پله و پای پله موردبررسی قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه رودخانه دوهزار با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۸۸ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸۲ دقیقه در استان مازندران و در نزدیکی شهر تنکابن واقع شده است. شکل (۱-a, b)، نشان‌دهنده موقعیت منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

دریاسر رود و نوشارود از سرچشمه‌های اصلی رودخانه دوهزار هستند. دریاسر رود از ذوب برف‌های قله سیاه‌لان و نوشارود از برف‌چال‌های قله نوشا و نیار دره جریان می‌یابند. رودخانه دوهزار پس از گذر از کوه سیاه‌لان، در روستای هلو کله (یا آلو کله) جریان می‌یابد. شکل (۱-c, d)، موقعیت قرارگیری بازه مورد مطالعه در استان را به دو صورت شماتیک و تصویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد.

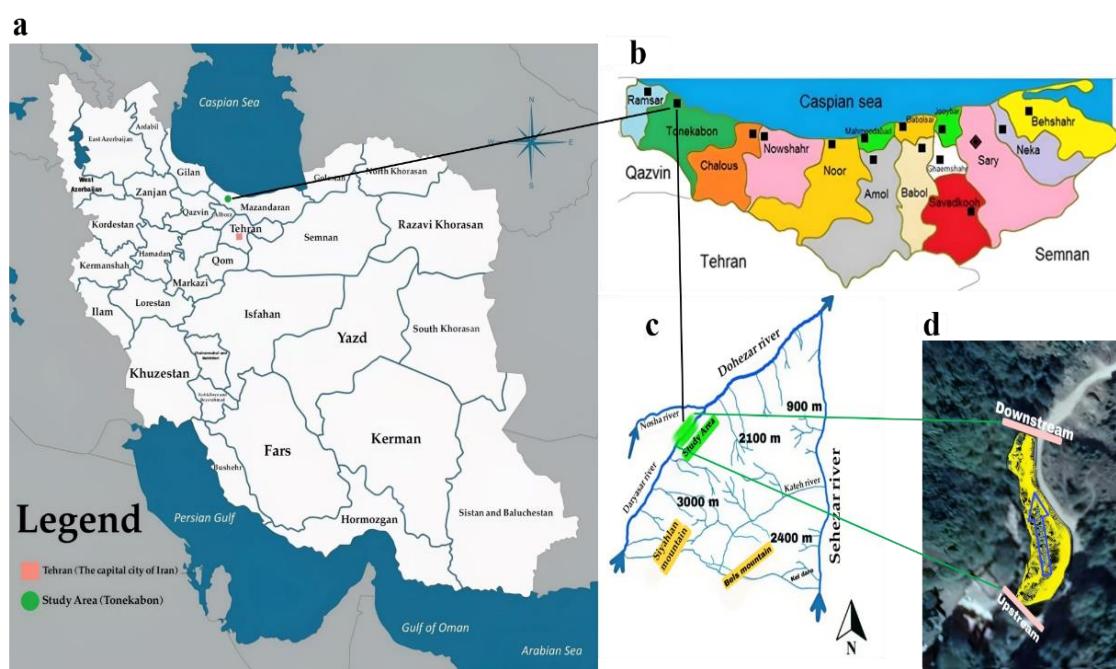


Figure 1. The location of the study reach of Dohezar stream. a) In the map of Iran , b) In Mazandaran province , c) Schematically and d) Satellite photo

این رودخانه از ارتفاعات کوهستانی با شیب تند سرچشمه می‌گیرد و ساختار پلکانی آن، یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد هیدرولیکی این بازه است که در شکل (۲) این ویژگی به‌خوبی نشان داده شده است.



Figure 2. Dohezar stream in the vicinity of Holu Kale village (4-Nov-2022)

۲.۲. جمع‌آوری داده و اندازه‌گیری شاخص‌های کمی و کیفی جریان

به‌منظور شناسایی بازه مورد مطالعه، از رودخانه دوهزار بازدید به‌عمل آمد. عملیات میدانی طی هشت ماه، از دی‌ماه ۱۴۰۱ تا مردادماه ۱۴۰۲ انجام گرفت. بازدید اولیه شامل عکس‌برداری و فیلم‌برداری از وضعیت کلی رودخانه بود. پس از این بازدید، عملیات نقشه‌برداری برای استخراج توپوگرافی و مورفولوژی رودخانه انجام گرفت. در بازدیدهای بعدی، عمق و دبی جریان و داده‌های کیفی برداشت شد. به‌منظور اندازه‌گیری دبی جریان توسط دستگاه میکرو مولینه، ابتدا مقاطع عرضی موردنظر در ابتدا و انتهای بازه انتخاب شدند. سپس با به‌کارگیری روش زیرمقطع، عمق و سرعت جریان اندازه‌گیری شدند و با استفاده از معادله پیوستگی، دبی جریان محاسبه گردید (Chow *et al.*, 1988). برای برداشت داده‌های کیفی، در هر بازدید صحرایی نمونه‌های آب از مقاطع مختلف رودخانه برداشت شد. این نمونه‌ها شامل آب از نقاط بالادست، پایین‌دست، روی پله و پایین پله در محل بزرگ‌ترین پلکان بازه مورد مطالعه که در شکل (۳) نشان داده شده است (بین مقاطع عرضی شماره ۴۲ (روی پله) و ۳۶ (پایین پله)) بودند.

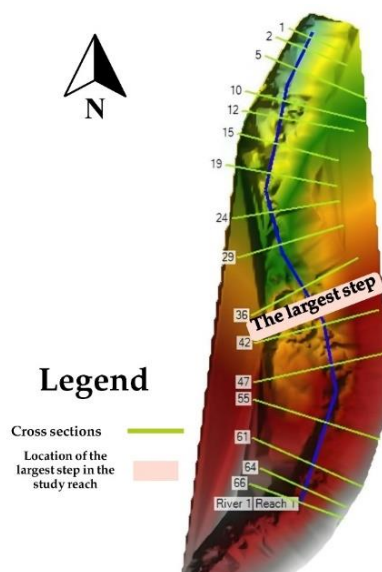


Figure 3. Location of the largest step in the study reach

سپس، این نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و شاخص‌های کیفی شامل اکسیژن محلول، نیترات و فسفر غیرآلی مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند. دمای آب نیز در محل نمونه‌برداری برداشت و ثبت گردید. به منظور اطمینان از دقت و صحت داده‌های آزمایشگاهی، تمامی مراحل نمونه‌برداری و اندازه‌گیری با رعایت استانداردهای مربوط به روش‌های آزمایشگاهی انجام شدند.

جدول (۱) تاریخ‌های مربوط به بازدیدهای نقشه‌برداری و عملیات صحرایی به همراه نوع نمونه‌برداری را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده روند پایش و جمع‌آوری داده‌ها در بازه‌های مختلف زمانی است.

Table 1. Field surveys and type of sampling

Date	Title and type of visit	Type of sampling
5 November 2022	Mapping	Extraction of topography and stream morphology
7 November 2022		Processing and preparation
31 December 2022	Field surveys	Flow parameters (Velocity and Water depth)
31 January 2023		
3 March 2023		
3 April 2023		
4 May 2023		
4 June 2023		
5 July 2023	Field surveys	Water quality parameters (Dissolved oxygen, Nitrate, Total inorganic phosphorous and Water temperature)
5 August 2023		

این داده‌ها به عنوان اطلاعات پایه جهت شبیه‌سازی تغییرات کمی و کیفی جریان در بازه‌های مختلف رودخانه دوهزار مورد استفاده قرار گرفتند.

۳.۲. نقشه‌برداری و تهیه نقشه‌های DEM و TIN بازه مورد مطالعه

نقشه‌برداری جهت استخراج توپوگرافی و مورفولوژی رودخانه با استفاده از دوربین توتال در تاریخ ۱۴۰۱/۰۸/۱۴ طی دو روز انجام شد. در روز اول نقاط خشک حاشیه رودخانه و در روز دوم نقاط سطح آب و محیط خیس رودخانه نقشه‌برداری شد. این بازه به گونه‌ای انتخاب گردید که دارای پله-گوداب‌های مشخص به منظور ارزیابی غلظت آلاینده‌ها در محل بالا و پایین پلکان باشد. در نهایت بازه نقشه‌برداری شده به طول ۶۶ متر به صورت شبکه‌های ۵/۵×۵/۵ متر به اتمام رسیده و توپوگرافی رودخانه با مختصات UTM ارائه گردید. صحت نقشه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Google و Global Mapper و Earth تأیید و در شکل (۴) نمایش داده شده است.



Figure 4. Verification of the position of study area with satellite image (5-Nov-2022)

پس از نقشه‌برداری، نقشه‌های DEM (Digital Elevation Model) و TIN (Triangular Irregular Networks) آماده

شدند. به این صورت که نقاط برداشتی و مختصات جغرافیایی وارد نرم افزار ArcMap شدند. برای ساخت DEM، ابتدا دقت و صحت مختصات نقاط ورودی بررسی و تأیید شد (شکل ۴). سپس از طریق پردازش داده‌های توپوگرافی، نقاط نقشه‌برداری و ابزارهای تحلیل توپوگرافی موجود در ArcMap، یک مدل ارتفاعی رقومی (DEM) برای محدوده مطالعه ایجاد شد که در شکل (۵-a) نشان داده شده است. علاوه بر DEM، نقشه TIN (شبکه مثلثی نامنظم) نیز برای نمایش و تحلیل دقیق‌تر توپوگرافی منطقه تولید و استفاده شد که در شکل (۵-b) نشان داده شده است. پس از تهیه نقشه‌های DEM و TIN، این داده‌ها برای تحلیل‌های هیدرولوژیکی و مدل‌سازی جریان سطحی رودخانه مورداستفاده قرار گرفتند.

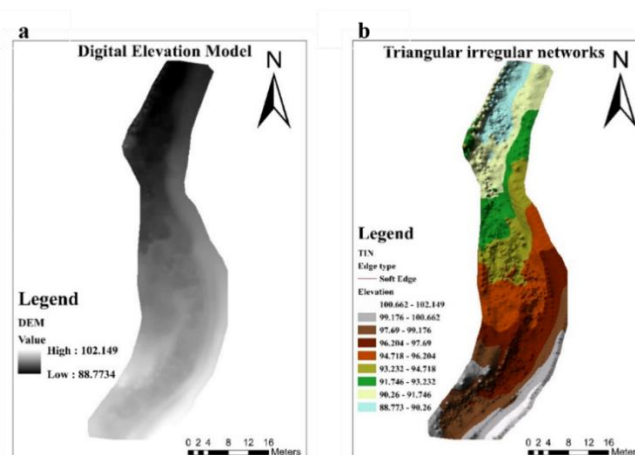


Figure 5. Maps of study area. a) DEM and b) TIN

۴.۲. شبیه‌سازی کمی و کیفی در مدل HEC-RAS

برای شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولیکی و کیفی آب، از مدل HEC-RAS استفاده شد. از آنجایی که پیش از شبیه‌سازی کیفیت آب، نیاز به یک مدل هیدرولیکی کالیبره شده می‌باشد، لذا ابتدا فرایند شبیه‌سازی هیدرولیکی آغاز گردید. به منظور کالیبراسیون مدل هیدرولیکی، پس از نقشه‌برداری منطقه مورد مطالعه و پردازش‌هایی در جهت آماده‌سازی نقشه گرافیکی، نقشه ارتفاعی منطقه موردنظر به نرم‌افزار HEC-RAS وارد گردید.

با توجه به آن که منطقه موردنظر، کوهستانی و با شیب تند می‌باشد، شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه در دو حالت دائمی و غیردائمی انجام شد و نتایج آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در حالت دائمی شرایط مرزی بالادست عمق مشخص جریان و پایین‌دست عمق نرمال در نظر گرفته شد.

برای شبیه‌سازی غیردائمی نیز از هیدروگراف و عمق نرمال به ترتیب به عنوان شرط‌های مرزی بالادست و پایین‌دست استفاده گردید. روند کالیبراسیون با استفاده از ضریب مانینگ، به گونه‌ای که تفاوت بین مقادیر عمق شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به حداقل کاهش یابد صورت گرفت. برای تعیین مقدار تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی و محاسباتی از رابطه (۱) که بیانگر مقدار خطای نسبی می‌باشد استفاده شد.

$$\text{رابطه (۱)} \quad 100 * \frac{\text{Observation depth} - \text{Simulation depth}}{\text{Observation depth}}$$

به منظور دقت بالاتر در شبیه‌سازی تغییرات زمانی و انتقال آلاینده‌ها، پیش‌بینی دقیق‌تر از مدل و همچنین کالیبراسیون مناسب، جریان غیردائمی کالیبره شده برای مدل‌سازی کیفیت آب استفاده گردید.

پس از کالیبراسیون مدل هیدرولیکی می‌توان به شبیه‌سازی کیفیت آب پرداخت. غلظت‌های برداشتی در مقاطع

ذکرشده و همچنین پارامترهایی نظیر ضریب انتشار، داده‌های فشار اتمسفر، دمای هوا، رطوبت، تابش موج کوتاه، تراکم ابری^۶ و سرعت باد به‌عنوان ورودی به مدل معرفی گردید. منابع و مصارف به‌طور مجزا و غلظت‌های محاسباتی نیز خروجی مدل می‌باشند و تغییرات مکانی و زمانی انتقال اکسیژن محلول، نیترات، فسفر غیرآلی و دمای آب توسط مدل شبیه‌سازی می‌شود. این مدل با استفاده از هندسه رودخانه و بررسی تأثیر تغییرات وضعیت بستر و مسیر رودخانه براساس پروفیل‌های طولی و عرضی، فرایندهای شبیه‌سازی هیدرولیکی را انجام می‌دهد و پس از آن در بخش تحلیل کیفی امکان انجام تحلیل کیفیت آب میسر می‌باشد. مدل کیفیت آب از حل عددی صریح^۷ برای معادله یک‌بعدی انتقال-انتشار^۸ استفاده می‌کند (Hydrologic Engineering Center, 2016). جهت پایداری محاسبات مدل، در حالت غیردائمی، برای شبیه‌سازی جریان از عدد کورانت و کیفیت از عدد پکلت استفاده می‌شود.

به‌منظور پایداری مدل هیدرولیکی، مقدار عدد کورانت باید از ۰/۹ کمتر بوده و مقدار عدد پکلت نباید از ۰/۳ تجاوز نماید (Hydrologic Engineering Center, 2016). لذا برای ارضای هر دو شرط در حالت بهینه، مقدار طول اندازه سلول کیفیت آب پنج متر و گام زمانی محاسبات یک ثانیه در نظر گرفته شد.

مدل HEC-RAS به حل عددی معادله (۲) که معادله یک‌بعدی انتقال-انتشار در هر یک از سلول‌هاست، می‌پردازد.

$$\frac{\partial}{\partial t}(A\phi) = -\frac{\partial}{\partial x}(Q\phi) + \frac{\partial}{\partial x}\left(DA\frac{\partial \phi}{\partial x}\right) \pm \frac{S}{\Delta x} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه فوق، A سطح مقطع عرضی برحسب مترمربع، ϕ درجه حرارت برحسب سانتی‌گراد یا غلظت برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، Q دبی جریان برحسب مترمکعب بر ثانیه، D ضریب انتشار برحسب مترمربع بر ثانیه و S تغییرات ذخیره برحسب کیلوگرم بر ثانیه می‌باشد.

همچنین محاسبات کیفیت آب برحسب بازه حد بالا و پایین ضریب انتشار برای مقطع عرضی بالادست محاسبه و انتخاب گردید. معادله (۳) نشان‌دهنده محاسبه ضریب انتشار براساس فرمول فیشر می‌باشد که توسط نرم‌افزار نیز استفاده می‌گردد (Hydrologic Engineering Center, 2016):

$$D = 0.011 \lambda \frac{u^2 w^2}{y u^*} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، λ ضریب تخصیصی (پیش‌فرض مقدار یک است (بدون واحد))، u سرعت برحسب متر بر ثانیه، W عرض سطح آب برحسب متر، y عمق آب برحسب متر و u^* سرعت برشی^۹ برحسب متر بر ثانیه می‌باشد که از معادله (۴) قابل محاسبه است:

$$u^* = \sqrt{g y S_f} \quad \text{رابطه (۴)}$$

در این رابطه، g ثابت گرانش برحسب متر بر مجذور ثانیه و S_f شیب اصطکاک می‌باشد.

برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل کیفیت آب، ابتدا اطلاعات جمع‌آوری‌شده برای بازه چهار ماهه دی‌ماه ۱۴۰۱ تا فروردین‌ماه ۱۴۰۲ وارد مدل شد و مقادیر شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. هدف واسنجی، کاهش اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و نتایج شبیه‌سازی بود. سپس مدل برای بازه چهار ماهه دوم (اردیبهشت‌ماه تا مردادماه ۱۴۰۲) صحت‌سنجی شد. در این مرحله، ضرایب قبلی ثابت مانده و مدل با داده‌های جدید اجرا شد تا میزان تطابق بررسی و خطای مدل ارزیابی گردد.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. نتایج هیدرولیکی

در بازه مطالعاتی، متوسط شیب برای پایین‌دست ۵ درصد برآورد گردید. شکل (۶) پروفیل طولی این رودخانه را نشان

می‌دهد که کل طول بازه تحت متوسط شیب تقریبی ۱۱ درصد قرار دارد. این مقدار نشان‌دهنده شیب بسیار زیاد رودخانه در بازه مورد مطالعه است.

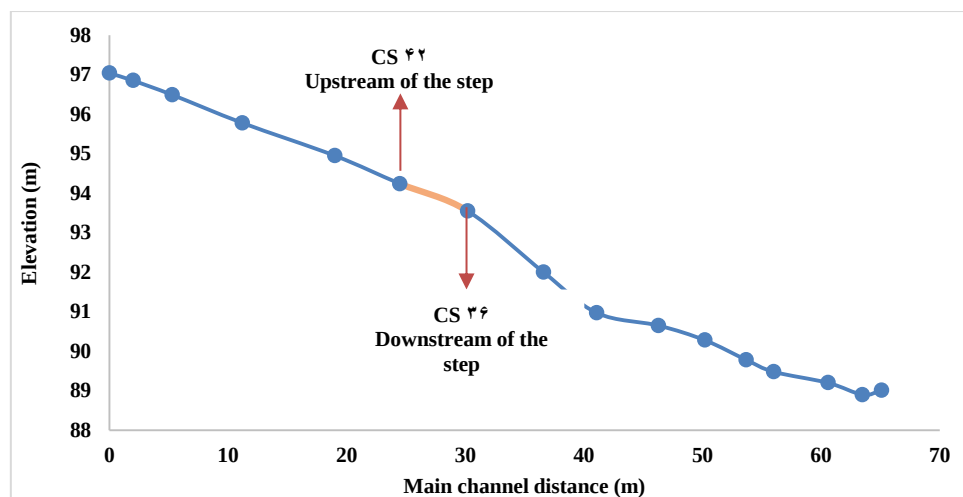


Figure 6. Longitudinal profile of the thalweg along the study reach

این موضوع نشان می‌دهد که جریان رودخانه از شرایط هیدرولیکی خاصی پیروی می‌کند که در مدل‌سازی‌های کمی و کیفی بایستی به دقت لحاظ شود.

برای کالیبراسیون، دوره چهار ماهه (دی‌ماه ۱۴۰۱ تا فروردین‌ماه ۱۴۰۲) داده‌های صحرایی مورد استفاده قرار گرفتند. پس از کالیبراسیون در حالت دائمی با استفاده از ضریب مانینگ، به گونه‌ای که تغییرات این ضریب به حدی انجام شد که تفاوت بین مقادیر عمق شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به میزان قابل قبولی کاهش یابد، مقدار نهایی ضریب مانینگ معادل ۰/۱۹ با متوسط خطای نسبی ۷/۴۸ درصد تعیین گردید. همچنین برای صحت‌سنجی نیز دوره چهار ماهه دوم (از اردیبهشت‌ماه ۱۴۰۱ تا مردادماه ۱۴۰۲) داده‌های صحرایی استفاده شد که با توجه به متوسط خطای نسبی ۹/۳۱ درصد، حاکی از تخمین مناسب مقدار ضریب زبری مانینگ برای این بازه می‌باشد. شکل (۷) نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی و محاسباتی در طول دوره واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد. مقدار خطای نسبی از رابطه (۱) محاسبه شده است.

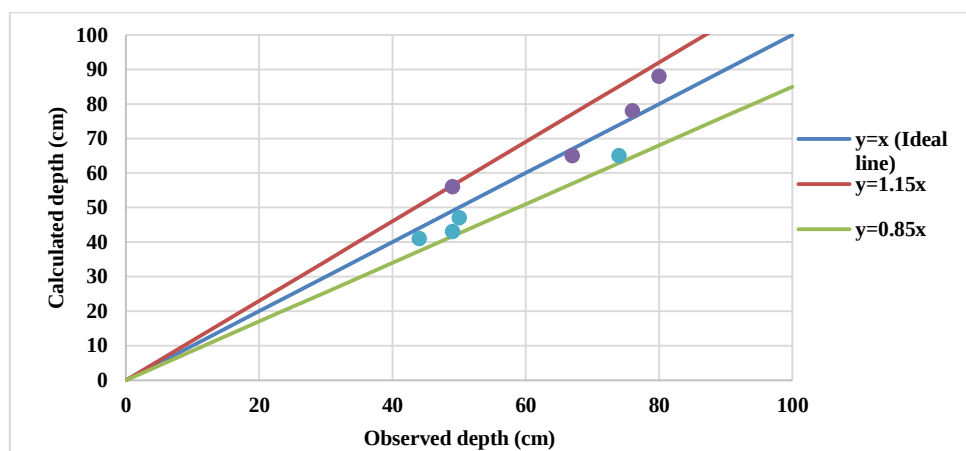


Figure 7. Steady state model calibration and verification

مقادیر عمق مشاهداتی، محاسباتی و درصد خطای نسبی برای هر بازدید ماهانه در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی به شرح جدول (۲) می‌باشد.

Table 2. Estimated error of observed and calculated depths in steady state flow

Period	Observed depth (cm)	Calculated depth (cm)	Error (%)	Averaged error (%)
Calibration period	67	65	2.99	7.48
	49	56	14.29	
	80	88	10	
	76	78	2.63	
Verification period	74	65	12.16	9.31
	49	43	12.24	
	50	47	6	
	44	41	6.82	

در طول دوره نمونه‌برداری مقدار دبی ماهانه رودخانه در بازه ۰/۵۸۷ تا ۳/۰۱ مترمکعب بر ثانیه تغییر کرده است. با اعمال تغییرات دبی ماهانه، شرط مرزی بالادست، هیدروگراف و شرط مرزی پایین‌دست عمق نرمال تعریف شد. برای کالیبراسیون مدل، با توجه به تغییر مشخصات جریان نظیر سرعت، فشار، دانسیته و دما در حالت غیردائمی و به‌منظور دقت بیشتر، مقادیر عمق مشاهداتی و محاسباتی در تاریخ‌هایی که بازدید صحرایی انجام گرفت، بررسی شدند. مقادیر به‌صورت مجزا برای دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی برآورد و در شکل (۸) آورده شده‌اند.

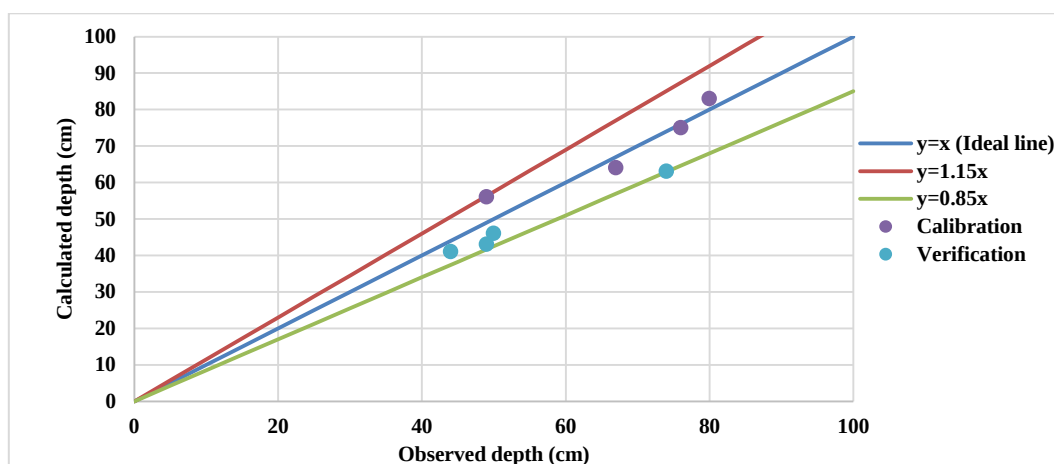


Figure 8. Unsteady state model calibration and verification

جدول (۳) نیز نشان‌دهنده مقادیر عمق مشاهداتی، محاسباتی و درصد خطای نسبی در شرایط جریان غیردائمی می‌باشد.

Table 3. Estimated error of observed and calculated depths in unsteady state flow

Period	Observed depth (cm)	Calculated depth (cm)	Error (%)	Averaged error (%)
Calibration period	67	64	4.48	5.96
	49	56	14.29	
	80	83	3.75	
	76	75	1.32	
Verification period	74	63	13.51	10.48
	49	43	14.86	
	50	46	8	
	44	41	6.82	

برای دوره واسنجی با توجه به متوسط خطای نسبی ۵/۹۶ درصد، مقدار ضریب مانینگ ۰/۱۶۵ برآورد گردید. در دوره صحت‌سنجی نیز مقدار متوسط خطای نسبی ۱۰/۴۸ محاسبه گردید که نشان‌دهنده تعیین مناسب ضریب مانینگ می‌باشد. با توجه به شکل (۲)، ملاحظه می‌گردد رودخانه دارای سنگ‌هایی بزرگ در طول مسیر جریان بوده که در برابر حرکت جریان مقاومت ایجاد می‌نمایند، لذا این مقدار مانینگ کالیبره شده منطقی به نظر می‌رسد (Torabizadeh et al., 2018). پس از کالیبراسیون مدل هیدرولیکی، مدل کیفیت آب شبیه‌سازی و موردارزیابی قرار گرفت و در اولین گام دامنه تغییرات مقادیر ضریب انتشار در طول بازه و مقاطع مرزی بالادست و پایین‌دست، محاسبه و در جدول (۴) ثبت گردید.

Table 4. Calculation values of diffusion coefficient

Parameters	Values										
	Total			Upstream				Downstream			
	Max	D_{max} (m^2/s)	Min	D_{min} (m^2/s)	CS66	D_{max} (m^2/s)	CS66	D_{min} (m^2/s)	CS1	D_{max} (m^2/s)	D_{min} (m^2/s)
U (m/s)	1.22		0.44		1.22		0.82		1.1		0.7
W (m)	8.91		1.32		4.6		2.8		4.09		2.77
Y (m)	1	1.457	0.23	0.004	0.88	0.297	0.42	0.067	1	0.118	0.45
R (m)	0.62		0.14		0.47		0.23		0.416		0.57
S	0.206		0.047		0.123		0.103		0.068		0.075
u'(m/s)	1.21		0.255		0.753		0.483		0.528		0.646

پس از کالیبراسیون مدل هیدرولیکی، بازه مقادیر ضریب انتشار برای مقطع ورودی رودخانه مورد مطالعه بین ۰/۰۶۷ تا ۰/۲۹۷ مترمربع بر ثانیه و برای کل بازه مورد مطالعه ۰/۰۰۴ تا ۱/۴۵۷ مترمربع بر ثانیه بوده است. این بازه با توجه به مقادیر حداقل و حداکثر پارامترهای حاصل از شبیه‌سازی هیدرولیکی کالیبره شده محاسبه شده است و لذا دارای دقت بالایی می‌باشد.

۲.۳. بررسی میزان تغییرات زمانی اکسیژن محلول، نترات، فسفر غیر آلی و دمای آب

جدول (۵) نتایج شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب رودخانه دوهزار با استفاده از مدل HEC-RAS در چهار مقطع ورودی (CS66)، روی پله (CS42)، پای پله (CS36) و خروجی (CS1) را به همراه خطاهای نسبی برای هر پارامتر ارائه می‌دهد. براساس نتایج، میانگین حداقل و حداکثر خطای نسبی کل به ترتیب برابر با ۱/۰۵ درصد برای دما و ۱۰/۱۸ درصد برای فسفر غیر آلی بوده است.

نتایج شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول (DO) نشان می‌دهد که مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی این پارامتر عملکرد نسبتاً مطلوبی داشته است. میانگین خطای کلی برای تمامی مقاطع برابر با ۴/۸۵ درصد است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی مقادیر DO می‌باشد. در مقطع CS66، مقادیر ورودی به عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است. برای مقاطع دیگر، خطاها بین ۵/۶۵ درصد تا ۷/۹۱ درصد متغیر است که به طور عمده به پیچیدگی‌های جریان آب و عوامل محیطی در مقاطع پایین‌دست، به ویژه در محل پله و شیب‌های تند رودخانه بازمی‌گردد. بیش‌ترین خطا در مقطع CS36 با مقدار ۷/۹۱ درصد مشاهده می‌گردد که به دلیل تغییرات ناگهانی در جریان آب و نوسانات سطح آب پس از عبور از پله است. درواقع کاهش سرعت جریان و ایجاد نواحی با شرایط آشفته موجب افزایش خطای نسبی در شبیه‌سازی این پارامتر شده است. با توجه به معادله (۲)، افزایش تلاطم و اختلاط جریان ناشی از پله‌ها، باعث افزایش ضریب D و انتقال بیش‌تر اکسیژن از هوا به آب خواهد شد. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در مناطقی با جریان تلاطمی کم‌تر (بالای پله)، مدل HEC-RAS عملکرد بهتری در شبیه‌سازی مقادیر DO دارد، اما با افزایش تلاطم و تغییرات ناگهانی جریان (در محل پایین پله)، دقت مدل کاهش می‌یابد.

شبیه‌سازی مقادیر نیترات (NO_3)، میانگین خطای کلی را برابر با $5/33$ درصد نشان می‌دهد که بیانگر عملکرد قابل قبول مدل در شبیه‌سازی مقادیر نیترات در رودخانه می‌باشد. بیش‌ترین خطا در مقطع CS36 با مقدار $9/60$ درصد مشاهده می‌گردد. رابطه (۵) معرف مدل سینتیکی مرتبه اول نیتریفیکاسیون می‌باشد:

$$\frac{d\text{CNO}_3}{dt} = \text{C}_{\text{NH}_4} \cdot k_{\text{NO}_3} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن، C_{NO_3} غلظت نیترات بر حسب میلی‌گرم بر لیتر، C_{NH_4} غلظت آمونیوم بر حسب میلی‌گرم بر لیتر و k_{NO_3} ثابت نرخ واکنش نیتریفیکاسیون می‌باشد. طبق این رابطه و اثر پله بر هیدرولیک جریان که سبب افزایش آشفستگی و تلاطم جریان می‌گردد، نرخ واکنش‌های بیوشیمیایی مانند نیتریفیکاسیون در محل پایین پله افزایش می‌یابد. از این‌رو، در مناطقی مانند مقطع CS36 که وجود پله موجب تلاطم بالای جریان شده است، مدل‌سازی این فرایند را پیچیده‌تر و خطای شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. در مقاطع CS42 و CS1، خطاها به ترتیب $5/25$ و $6/42$ درصد است که نشان‌دهنده شبیه‌سازی مناسب این پارامتر در طول بازه مطالعاتی می‌باشد.

شبیه‌سازی پارامتر فسفر غیرآلی نیز نشان‌دهنده عملکرد معقول مدل در شرایط پیچیده رودخانه کوهستانی است. میانگین خطای کلی برای این پارامتر $10/18$ درصد بوده است که قابل قبول به نظر می‌رسد. بیش‌ترین خطا در مقطع CS36 با مقدار $16/76$ درصد مشاهده شده است. در محل پایین پله، به دلیل افزایش آشفستگی و تلاطم جریان، مقدار ضریب انتشار افزایش می‌یابد. این موضوع باعث افزایش پارامتر S در معادله انتقال-انتشار می‌گردد و در نتیجه، نرخ آزادسازی فسفر غیرآلی از بستر که ناشی از تغییرات شدید جریان آب و تأثیر مواد ته‌نشین شده در نزدیکی پله است، افزایش می‌یابد. در مقاطع CS42 و CS1، خطاها به ترتیب $10/98$ و $12/99$ درصد هستند که بیانگر مقادیر خطای نسبی بیش‌تر در شبیه‌سازی این پارامتر در نواحی پایین دست رودخانه است.

هم‌چنین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده شده دمای آب در تمامی مقاطع بسیار نزدیک به یکدیگر هستند. میانگین خطای کلی برای پارامتر دما $1/05$ درصد است که نشان‌دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی دمای آب می‌باشد. این مقدار خطا به‌ویژه در رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند که جریان‌های تند و نوسانات دما می‌تواند قابل توجه باشد، به‌خوبی عملکرد مدل را نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی این پارامتر، بیش‌ترین خطا در مقطع CS1 با مقدار $1/63$ درصد مشاهده می‌شود. این خطا نیز در مقایسه با دیگر پارامترها و شبیه‌سازی‌های کیفی، کم و قابل قبول است. مقادیر خطا در مقاطع میانی (بالای پله و پایین پله) به ترتیب $1/24$ و $1/35$ درصد است که نشان می‌دهد شبیه‌سازی دما در این مقاطع نیز با دقت بالایی انجام شده است. به‌طور کلی، مقادیر خطا در تمامی مقاطع به حدی پایین است که نشان‌دهنده همگرایی مناسب مدل با داده‌های واقعی می‌باشد.

با بررسی نتایج مشخص شد که در مقاطع بالادست و خروجی رودخانه، شبیه‌سازی به‌دلیل پایداری جریان و عدم پیچیدگی‌های هیدرولیکی مانند آشفستگی و تلاطم جریان، دقت بالاتری دارد و خطاها کم‌تر است. در این مقاطع، تبادل مواد محلول با هوا و ته‌نشینی مواد مغذی به‌صورت یکنواخت‌تری انجام می‌گیرد. مدل HEC-RAS این شرایط را به‌طور مناسبی شبیه‌سازی کرده است. در مقابل، مقدار خطا در پایین پله نسبت به مقطع بالای پله در تمامی حالات افزایشی بوده است، زیرا پله‌ها به‌عنوان موانع هیدرولیکی موجب تغییرات در پارامترهای کیفی آب می‌شوند و این مسأله در پایین پله، به‌ویژه با افزایش اختلاط و جذب اکسیژن از هوا، مشهود است.

در مورد فسفر غیرآلی، تلاطم شدید جریان در پایین پله باعث بازگشت فسفر ته‌نشین شده از بستر رودخانه به جریان آب می‌شود. این پدیده منجر به افزایش انتقال فسفر از رسوبات ته‌نشین شده به جریان آب در پایین پله می‌گردد، درحالی‌که در نواحی بالاتر پله، فسفر بیش‌تر به ته‌نشینی تمایل دارد. این دینامیک پیچیده جریان و هم‌چنین رسوب‌گذاری و آزادسازی مواد، باعث افزایش خطاهای شبیه‌سازی فسفر در این مقاطع می‌شود.

Table 5. Water quality results

Parameter	Observed				Simulated				Error				Total average error
DO	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	
31 December 2022	7	7.3	7.1	7	7	7	7	7					
31 January 2023	7.1	8.5	6.7	8.6	7.1	7.098	7.097	7.096					
3 March 2023	8	7.9	7.8	7.6	8	7.9989	7.9987	7.9980					
3 April 2023	11.7	10.5	10.3	12.1	11.7	11.698	11.664	11.697	0	5.84	7.91	5.65	4.85
4 May 2023	10.65	9.85	9.4	10.45	10.65	10.682	10.647	10.646					
4 Juan 2023	9.6	9.5	8.6	8.8	9.6	9.597	9.596	9.593					
5 July 2023	7.9	7.6	7.3	7.8	7.9	7.897	7.896	7.894					
5 Agust 2023	7.5	7.5	7	7	7.5	7.497	7.496	7.493					
NO ₃	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	Total average error
31 December 2022	2.05	2.08	1.84	1.92	2.05	2.051	2.051	2.051					
31 January 2023	1.56	1.52	1.88	1.51	1.56	1.56	1.5	1.56					
3 March 2023	1.36	1.41	1.42	1.33	1.36	1.36	1.36	1.36					
3 April 2023	1.22	1.23	1.067	1.12	1.22	1.22	1.22	1.22	0	5.28	9.60	6.42	5.33
4 May 2023	2.17	2.19	2.20	2.19	2.17	2.17	2.17	2.17					
4 Juan 2023	2.42	2.94	2.17	2.43	2.42	2.4224	2.4223	2.4223					
5 July 2023	2.33	2.3	2.37	2.2	2.33	2.334	2.334	2.334					
5 Agust 2023	1.25	1.45	1.48	1.64	1.25	1.25	1.25	1.25					
Total Inorganic Phosphorous	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	Total average error
31 December 2022	0.0245	0.0341	0.0245	0.034	0.0245	0.0245	0.0245	0.0245					
31 January 2023	0.0461	0.0652	0.065	0.055	0.0461	0.0461	0.0461	0.0461					
3 March 2023	0.056	0.055	0.057	0.0555	0.056	0.056	0.056	0.056					
3 April 2023	0.0164	0.0158	0.014	0.0171	0.0164	0.0164	0.0164	0.0164	0	10.98	16.76	12.99	10.18
4 May 2023	0.0151	0.0152	0.0129	0.0135	0.0151	0.0151	0.0151	0.0151					
4 Juan 2023	0.0121	0.0127	0.0166	0.0143	0.0121	0.0121	0.0121	0.0121					
5 July 2023	0.0218	0.0187	0.0254	0.0219	0.0218	0.0218	0.0218	0.0218					
5 Agust 2023	0.0253	0.0198	0.0198	0.0199	0.0253	0.0253	0.0253	0.0253					
T	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	CS66	CS42	CS36	CS1	Total average error
31 December 2022	21.1	21	21	21.2	21.1	21.10	21.10	21.10					
31 January 2023	19.8	19.1	19.5	19.5	19.8	19.8	19.80	19.8					
3 March 2023	17	17	17.7	17.8	17	17	17	17					
3 April 2023	21	22	21.6	21.4	21	21	21	21	0	1.24	1.35	1.63	1.05
4 May 2023	22.4	22.4	22.5	22.35	22.4	22.4	22.4	22.4					
4 Juan 2023	17.3	17.3	17.5	17.8	17.3	17.3	17.3	17.3					
5 July 2023	26	26	26	26.2	26	26	2	26					
5 Agust 2023	23.6	23.9	23.5	23.8	23.6	23.6	23.6	23.6					

درنهایت، دما که پارامتر حساسی به تغییرات جریان است، نیز تحت تأثیر پله قرار می‌گیرد. در بالای پله، کاهش سرعت جریان به آب اجازه می‌دهد زمان بیشتری برای تبادل حرارت با محیط داشته باشد، درحالی‌که در پایین پله افزایش تلاطم باعث سرعت بیشتر تبادل حرارت می‌شود. مدل HEC-RAS به‌طور کلی تغییرات دما را به‌خوبی شبیه‌سازی کرده است.

هم‌چنین از مهم‌ترین عوامل افزایش خطا در پایین پله این است که مدل HEC-RAS از معادلات سنت و نانت استفاده می‌کند که فشار را به صورت هیدرواستاتیک در نظر می‌گیرد. در بالای پله که جریان آب هنوز به سرعت بالای ناشی از سقوط از پله نرسیده و معمولاً آرام‌تر است، فشار بیشتر تحت تأثیر عمق آب قرار دارد و هیدرواستاتیکی است اما به محض شروع سقوط آب از روی پله، فشار هیدرودینامیکی بر اثر افزایش سرعت جریان و کاهش عمق آب، غالب می‌شود.

۳.۳. بررسی میزان تغییرات مکانی اکسیژن محلول، نیترات، فسفر غیر آلی و دمای آب

شکل (۹) تغییرات مکانی چهار پارامتر کیفی آب شامل اکسیژن محلول، نیترات، فسفر غیر آلی و دما را در انتهای دوره

شبیه‌سازی نشان می‌دهد. هر پارامتر در نمودارهای a تا d به صورت رنگ‌بندی مشخص شده و مقاطع مورد مطالعه شامل مقطع ورودی (CS66)، روی پله (CS42)، پای پله (CS36) و خروجی (CS1) است.

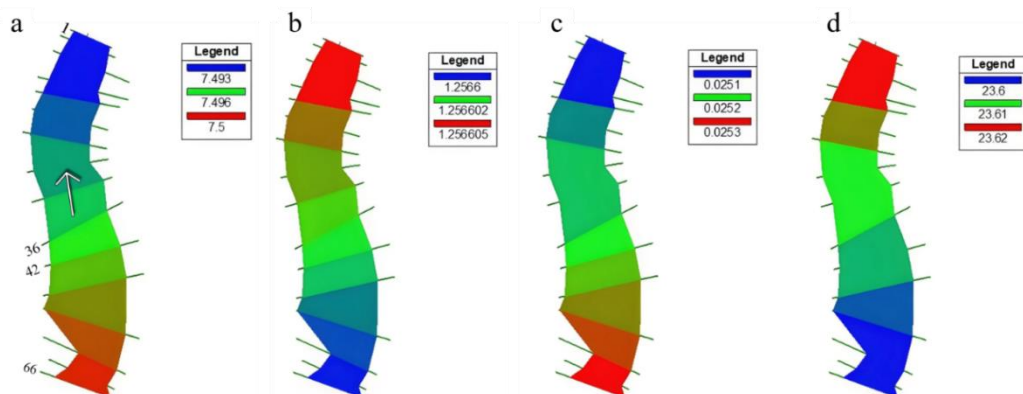


Figure 9. Spatial plot at the end of the simulation period. a) DO (mg/l), b) NO3 (mg/l), c) Total Inorganic Phosphorous (mg/l) and d) Temperature (°C)

در نمودار (a)، مقادیر اکسیژن محلول بین $7/493$ تا $7/496$ میلی گرم بر لیتر در نوسان است. مشاهده می‌شود که در مقاطع بالادست (CS66)، DO در بالاترین حد قرار دارد و با حرکت به سمت پایین دست، به ویژه در پایین پله (CS36)، مقدار DO کاهش می‌یابد. تلاطم در جریان آب می‌تواند باعث ورود بیش تر اکسیژن از هوا به آب شود. این اتفاق در سطوحی رخ می‌دهد که آب در تماس مستقیم با هوا قرار دارد، مانند مناطق روی پله یا نقاطی که آب به سرعت حرکت می‌کند. اما در نواحی پای پله، مواد آلی و رسوبات که در پایین پله تجمع می‌کنند، می‌توانند باعث افزایش مصرف اکسیژن توسط میکروارگانیسم‌ها شوند که این فرایند باعث کاهش سطح اکسیژن محلول می‌شود. علاوه بر این، تغییرات دما تأثیر مستقیمی بر DO دارد، به طوری که با افزایش دما، حلالیت اکسیژن در آب کاهش یافته و در نتیجه DO کاهش می‌یابد. در مقاطع بالادست که دما پایین تر است، مقدار اکسیژن محلول بالاتر است، اما با حرکت به سمت پایین و افزایش دما، DO کاهش پیدا می‌کند.

نمودار (b) نشان می‌دهد که برخلاف اکسیژن محلول، با حرکت به سمت پایین دست، غلظت نیترات افزایش می‌یابد. مقطع بالادست، نیترات در کمترین میزان خود قرار دارد، اما با حرکت به سمت پایین پله و خروجی رودخانه، این مقادیر به تدریج افزایش می‌یابد. این افزایش ناشی از تجمع نیترات از منابع آلاینده یا آزاد شدن آن از رسوبات در نتیجه تلاطم جریان است. تلاطم شدید در پایین پله باعث آزادسازی نیترات از بستر رودخانه و افزایش غلظت آن در آب می‌شود. دمای بالاتر نیز به طور غیرمستقیم بر غلظت نیترات تأثیر می‌گذارد، زیرا با افزایش دما، فعالیت میکروارگانیسم‌ها و فرایندهای بیوشیمیایی مرتبط با چرخه نیتروژن افزایش می‌یابد. این شرایط می‌تواند فرایند نیتریفیکاسیون (تبدیل آمونیوم به نیترات) را تسریع کند.

نمودار (c) غلظت فسفر غیرآلی را در محدوده $0/0252$ تا $0/0253$ میلی گرم بر لیتر نشان می‌دهد و برخلاف نیترات، با حرکت به سمت پایین دست، این غلظت کاهش می‌یابد. در مقطع بالادست، غلظت فسفر غیرآلی در بالاترین مقدار خود قرار دارد، اما با حرکت به سمت پایین دست، به ویژه در پایین پله و خروجی رودخانه، به تدریج کاهش می‌یابد. این کاهش را می‌توان به ته نشینی فسفر در بستر رودخانه نسبت داد. همچنین، این تغییرات با افزایش دما مرتبط است، به طوری که دمای بالاتر منجر به آزادسازی فسفر از رسوبات در شرایط بی‌هوازی می‌شود.

نتایج این پژوهش حاکی از دقت قابل قبول مدل HEC-RAS در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در رودخانه‌های با

شیب تند است. درحالی که مدل HEC-RAS در پژوهش‌های مختلفی به عنوان یک ابزار مناسب برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب استفاده شده است، اکثر مطالعات قبلی در رودخانه‌های سیلاب‌دستی انجام شده‌اند. برای مثال، در مطالعه *Golabini et al.* (2022)، مدل HEC-RAS برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه دز در جنوب غربی ایران، در بازه محل سد انحرافی تا پایین دست زهکش لوره که دارای شیب کمی می‌باشد، استفاده گردید و در نهایت مشخص گردید روند کاهشی شاخص NSFQI، با روند متغیرهای کیفی شبیه‌سازی شده با مدل همخوانی داشته است. از طرفی، در مطالعه *Xiao et al.* (2020) مدل HEC-RAS برای بازه‌ای کوتاه از یک تالاب موردآرزیابی قرار گرفت و با مقایسه نتایج شبیه‌سازی پارامترهای نیتروژن و فسفر کل با داده‌های صحرایی، عملکرد مدل مناسب عنوان گردید.

در پژوهش‌های پیشین، به دلیل نبود شیب تند و ساختار پلکانی در رودخانه‌های مورد مطالعه، چالش‌های هیدرولیکی در بازه‌های پله-گوداب کمتر مورد مطالعه واقع شده است. در مطالعه حاضر، مدل HEC-RAS در یک رودخانه کوهستانی با شیب تند و ساختار پله-گوداب موردآرزیابی قرار گرفت. هندسه مخصوص این بازه سبب آن شد که تأثیر تلاطم جریان و حرکت مواد ته‌نشین بر شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب مانند فسفر غیرآلی و نیترات برجسته‌تر شود. به‌ویژه، این مطالعه نشان داده است که افزایش تلاطم در نواحی پایین پله منجر به افزایش خطاهای شبیه‌سازی در پارامترهای مرتبط با رسوبات شده است، نکته‌ای که در مطالعات قبلی کمتر به آن پرداخته شده بود.

۴. نتیجه‌گیری

مدل HEC-RAS، به عنوان یک ابزار شناخته شده برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت آب، می‌تواند در شرایط پیچیده رودخانه‌های کوهستانی با شیب تند و ساختار پله-گوداب عملکرد مناسبی داشته باشد. شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب از جمله دما و اکسیژن محلول در مطالعه فوق با دقت قابل قبولی انجام شد، درحالی که چالش‌هایی در شبیه‌سازی نیترات و فسفر غیرآلی به‌ویژه در نواحی با تلاطم بالا و حرکت مواد ته‌نشین شده مشاهده گردید. این نتایج می‌تواند به عنوان مبنایی برای بهبود مدل‌سازی در رودخانه‌های کوهستانی با شرایط هیدرولیکی پیچیده مورد استفاده قرار گیرد، مشروط بر این که هدف مطالعاتی تنها مقطع پای پله نباشد و یا به دلیل محدودیت‌های اقتصادی، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی توصیه‌پذیر نباشد. لذا این مدل می‌تواند در فاز اولیه مطالعات در چنین بازه‌هایی مناسب باشد. در ادامه براساس نتایج شبیه‌سازی شده، در مواقعی که مقادیر غلظت در پای پله اهمیت محسوسی دارد، بهتر است از مدل‌های هیدرودینامیکی که تغییرات فشار را هیدرودینامیکی در نظر می‌گیرند استفاده شود و پیشنهاد می‌شود از یک مدل دوبعدی در عمق و یا مدل سه‌بعدی برای شبیه‌سازی جریان و کیفیت استفاده گردد و فقط نتیجه تحلیل یک‌بعدی آن با مدل HEC-RAS مقایسه شود زیرا مدل سه‌بعدی شبیه‌سازی جریان را به کمک معادله ناویر-استوکس (با در نظر گرفتن فشار هیدرودینامیکی) حل می‌کند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Eutrophication
2. Algae
3. National Sanitation Foundation Water Quality
4. Coliform
5. Step-pool
6. Cloudiness
7. QUICKEST-ULTIMATE
8. Advection-Dispersion
9. Shear Velocity

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abed, B. S., Daham, M. H., & Al-Thamiry, H. A. (2020). Assessment and modelling of water quality along Al-Gharraf River (Iraq). *Journal of Green Engineering*, 10, 13565-13579.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Environmental Protection Agency. (2021). *Nutrient Pollution*.
- Environmental Protection Organization of the Islamic Republic of Iran. (2019). *Report on the status of surface water in Iran*. In Persian.
- Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS user manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Jung, W. S., & Kim, Y. D. (2019). Effect of abrupt topographical characteristic change on water quality in a river. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(5), 1981-1990.
- Kalathil, R., & Chandra, S. (2021). The influence of different morphological units on the turbulent flow characteristics in step-pool mountain streams. *Scientific Reports*, 11, 199564. doi:10.1038/s41598-021-99564-7.
- Karimi Gashnei, A., & Salaridaragi, M. (2014). Qualitative classification of river water (Case study: Karun, Dez and Karkheh rivers). *Journal of Environment and Development*, 5(10), 29-38. (In Persian).
- Kraemer, B. M., Pilla, R. M., Woolway, R. I., et al. (2022). Lakes in hot water: The impacts of a changing climate on aquatic ecosystems. *BioScience*, 72(11), 1050-1066.
- Mafinge, K., Hai-Long, Y., & Kongolo, K. (2022). Development and application of integrated catchment and surface water quality model in river network area: A review. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 12(4), 93-102.
- Mat Saad, A., Abu Hassan Asari, F. F., Affandi, S., & Zid, A. (2022). River pollution: A mini review of causes and effects. *Journal of Tourism, Hospitality and Environment Management*, 7(29), 139-151.
- Moghiminezhad, S., Ebrahimi, K., & Kerachian, R. (2018). Investigation of seasonal self-purification variations of Karun River, Iran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), 621-634. (In Persian).
- Paixao, M. A., & Kobiyama, M. (2019). Relevant parameters for characterizing mountain rivers: A review. *Journal of Mountain Science*, 16(7), 1500-1515.
- Pourfallah Koushali, H., Mastuori, R., & Khaledian, M. (2023). A modelling approach for flooding effects on water quality of Zarjoob River using HEC-RAS. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 52(4), 403-422. (In Persian).
- Prabu, S., Suriyaprakash, T. N. K., Kandasamy, R., & Rathinasabapathy, T. (2016). Effective waste water treatment and its management. In *Handbook of Research on Waste Management Techniques for Sustainability* (pp. 321-347). IGI Global.
- Radfar, M., & Alipour Nasirmahale, F. (2024). Modeling and investigation of annual nitrate pollution trend of Tajan River with QUAL2Kw and HEC-RAS. *Irrigation Sciences and Engineering*, 47(2), 87-104. (In Persian).
- Ramlau-Hansen, C. H., Bay, B., & Knudsen, U. B. (2020). Association between drinking water nitrate and adverse reproductive outcomes: A systematic PRISMA review. *Water*, 12(8), 2287.
- Roshangar, K., & Davodi, S. (2023). Modeling dissolved oxygen using deep learning and advanced prediction methods. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13(1), 157-170. (In Persian).
- Soleimani, P. (2021). Modeling the water quality of Doiraj River using HEC-RAS. *Master's thesis*, Water Science and Engineering - Water Structures. (In Persian).
- Taralgatti, P. D., Pawar, R. S., Pawar, G. S., Nomaan, M. H., & Limkar, C. R. (2020). Water quality modeling of Bhima River using HEC-RAS software. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, ISSN: 2249-8958.
- Torabizadeh, A., Tahershamsi, A., & Tabatabai, M. R. M. (2018). Measurement of dimensionless Chezy coefficient in step-pool reach (Case study of Dizin River in Iran). *Flow Measurement and Instrumentation*, 64, 190-193.

- Ward, M. H., deKok, T. M., Levallois, P., Brender, J., Gulis, G., Nolan, B. T., & VanDerslice, J. (2005). Workgroup report: Drinking-water nitrate and health—Recent findings and research needs. *Environmental Health Perspectives*, 113(11), 1607-1614.
- Ward, M. H., Jones, R. R., Brender, J. D., de Kok, T. M., Weyer, P. J., Nolan, B. T., Villanueva, C. M., & van Breda, S. G. (2018). Drinking water nitrate and human health: An updated review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(7), 1557.
- World Health Organization (WHO). (2022). Guidelines for Drinking-Water Quality: *Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda* (4th ed.). Geneva, Switzerland: World Health Organization.
- Xiao, L., Chen, Z., Zhou, F., Ben Hammouda, S., & Zhu, Y. (2020). Modeling of a surface flow constructed wetland using the HEC-RAS and QUAL2K models: A comparative analysis. *Wetlands*, 40(6), 2235-2245.