Research Paper

# Investigating Trends of Qualitative Changes of Neka River Using the QUAL2Kw in the Downstream of Gelevard Dam

**Faezeh Emami Ghara** [1], **Ramin Fazluola** [2*], **Mojtaba Khoshravesh** [3]

[1] M.Sc. Graduated, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
[2] Associate professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
[3] Associate professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

10.22125/IWE.2023.369028.1686

Received:
**November 8, 2022**
Accepted:
**February 15, 2023**
Available online:
**October 3, 2023**

Keywords:
**Neka river, Water quality, QUAL2Kw model, Quality sampling**

## Abstract

Rivers, as one of the available surface water resources that are exposed to pollutant discharge have extra importance. In this study, while monitoring and simulating the process of qualitative changes in the 8 km reach of Neka River by using the QUAL2Kw, the effects of dams, natural flow waterfalls and bed stabilization structures were evaluated. For this purpose, twice qualitative sampling and local visits were performed. Then, the initial model was prepared and the estimation of data defects, the model was calibrated and validated. evaluation of trend changes in parameters showed that all parameters are within the standard reach and the river has a high self-purification capacity. trending of dissolved oxygen changes showed that the concentration of these parameters was close to saturation, which was due to the favorable hydraulic conditions of the river for aeration rate and the presence of numerous natural and artificial waterfalls in the river. Although the pH value was within an acceptable range, some sections were close to the saturation range because of the release of carbon dioxide due to waterfalls in the flowing water, which the model simulated these effects well. Also, the existence of small dams and creation of a wetland behind these dam Cause to bacteria have been given more time to decompose organic matter, which has increased the alkalinity and pH reach. The results analysis and error indicators show that the QUAL2Kw model has a good accuracy in simulating the quality of Neka river.

## 1. Introduction

Increasing of the population and development of agriculture and industry cause an increase the concern due to the lack of attention to environmental problems, especially the quality of water resources, economic

* **Corresponding Author:** Ramin Fazloula
**Address:** Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
**Email:** r.fazloula@sanru.ac.ir
**Tel:** 09112549150

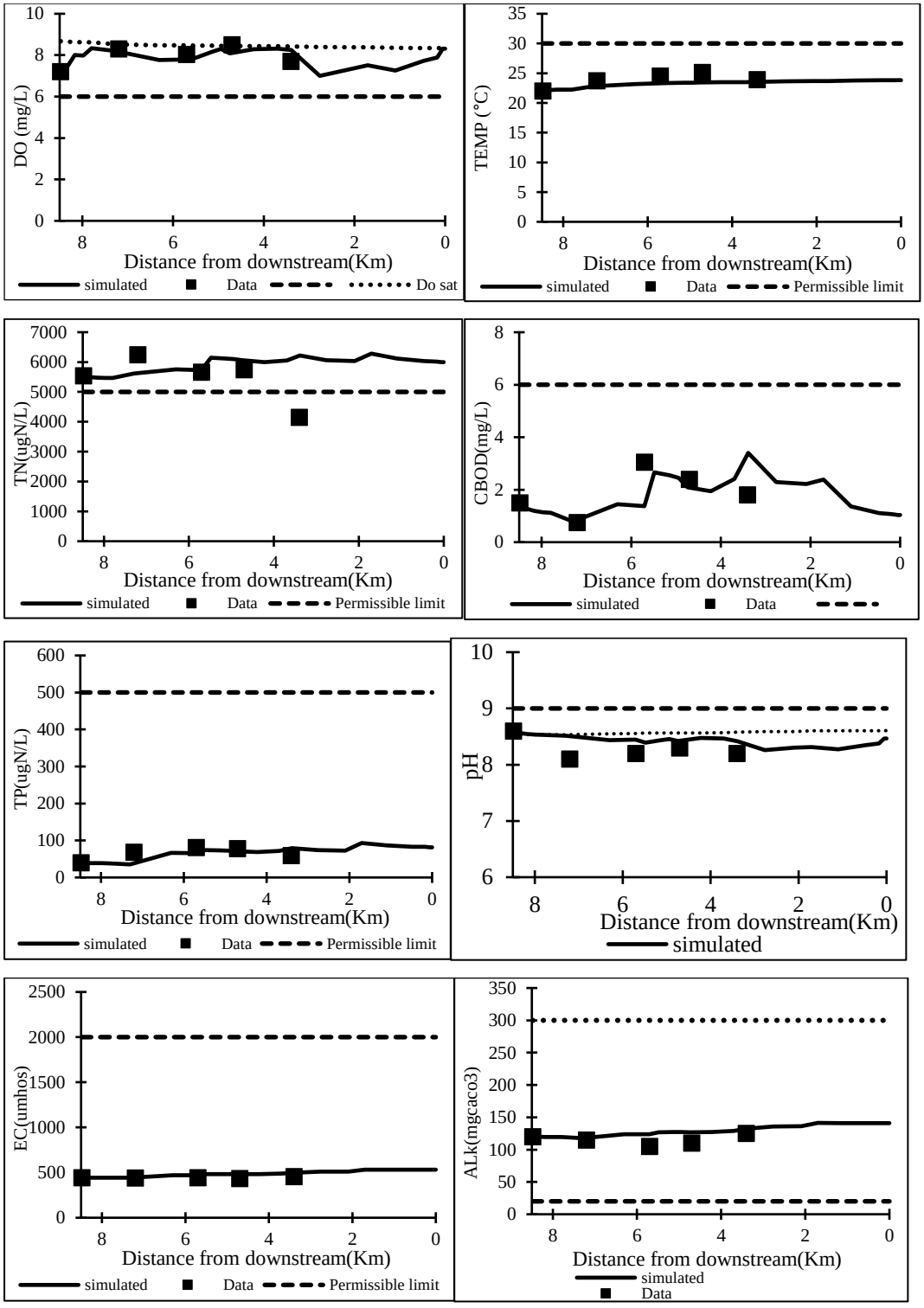
development, irreparable social and ecosystem consequences. In the river, hydrological, biological, geomorphological conditions, habitat and water quality are simultaneously effective on the health of the ecosystem. One of the best tools is the QUAL2Kw model because is freely available and Available. The simulation of the water quality of Zarineh River to the health of aquatic life was carried out by using QUAL2Kw. The analysis of pollutant sources shows that diffuse sources such as wastewater and accumulated garbage on the river beach are more effective. point sources contribute more pollution in summer and autumn and agricultural pollutants contribute more in spring (Biglari et al., 2017). Also, qualitative studies on the Bagmati river in Nepal showed that the local oxygenation is effective to maintain minimum DO concentrations in the river. The combination of wastewater modification, flow augmentation and local oxygenation is suitable to maintain the acceptable limits of water quality criteria (Kannel et al., 2007).

## 2. Materials and Methods

For supply data, the recorded data of the closest meteorological station to the study area of the neka river, i.e., Dasht-e-Naz station, was used. Also, the coverage percentage was recorded according to field observations on sampling days. To make a hydraulic model of the river, 20 cross-sections have been considered. After entering the sections, the downstream normal depth is considered as boundary conditions, so, the average longitudinal slope of the river is introduced to the model. To run the model and prepare the curves, the hydraulic model was run for 30 flow rates in the reach of 0 to 10 $m/s$. In this study, according to the available information, the relations of discharge-width and velocity-stage were used for river sections. For this purpose, at first, the hydraulic model of the river was created by using the HEC-RAS model, and then the coefficients and powers of the stage-discharge, velocity discharge and width discharge equations were extracted from the model and transferred to the QUAL2Kw. To supply water quality data, fieldwork on the Neka river was done in August and September of 2018. Considering the financial and time limitations and the location of polluting sources in the river, twelve parameters were sampled in situ and laboratory at five points along the river.

## 3. Results

The calibration results show that the model has good accuracy in simulating water temperature. Increasing the water temperature from upstream to downstream was due to increased air temperature from upstream to the downstream and entering highly temperature sources into the river. The accuracy of the model shows in these points, the model can qualitatively simulate natural waterfalls, flat stabilization structures, dams, etc. Also, the oxidation rate of CBOD is equal to 4.37. The increasing trend of total nitrogen along the river is due to the entry of polluting sources containing nitrogenous compounds into the river, and the reason for the decrease in some areas is the consumption of nitrogen by plants and also the settle down of organic nitrogen in the river. The rate of nitrification in the river is very significant and equal to 9.32 per day. Comparing the maximum nitrate values, which is equal to 1935 micrograms of nitrogen per liter, with the limits of the existing maximum standard, shows that the concentration of this variable is within the standard reach. Monitoring the trend of changes in non-ionized ammonium in the river shows that this parameter is within the standard reach. The simulation process of total phosphorus, which shows the sum of organic and inorganic compounds of phosphorus, has good matching with the observational data. Also, alkalinity changes have an increasing trend. The simulation results of electrical conductivity show an increasing trend, which is simulated with very good accuracy.




Calibration of water quality in Neka river

## 4. Discussion and Conclusion

In the current research, the complete process of water quality management was carried out to identify and control the Neka River in 2018. The results obtained from the study show that:

- The model can take into account the quantitative and qualitative effects of the existing structures in the river (bed stabilization structures, flow diversion dams).

- The analysis of the obtained results and the evaluation of the error indicators in the calibration and validation period show that the simulation of the river has an acceptable accuracy. As a result, the QUAL2Kw model has good accuracy in simulating the quality of Nakarood water.

- The river water quality was within the standard reach in both periods and the existing pollutants are not capable of creating critical quality levels in the river.

- The model has an acceptable accuracy in estimating the defects of the available data.

## 5. Six important references

1) Biglari, M., S. Sima. and M. Saadatpour. 2018. Modeling and management of the river water quality for aquatic life using a source control approach (case study: The Zarrineh River). Iran's water resources research. 14(5), 57-70.
2) Vonai, A., Maroufi, p. 2018. Investigation Self-purification and simulation of nitrogen and phosphorus changes along the Abbas Abad River of Hamedan using QUAL2KW. Journal of Irrigation and Water Engineering. 8(2), 172_186.
3) Biglari, M. 2015. water quality simulation of a River system considerly Environmental Flows. Master's thesis. Tarbiat Modarres University, Tehran. Iran. 49.
4) Zhu, W., Niu, Q., Zhang, R., Ye, R., Qian, X., & Qian, Y. 2015. Application of QUAL2K Model to Assess Ecological Purification Technology for a Polluted River. International journal of environmental research and public health, 12(2), 2215-2229.
5) Mathew M, Yao Y, Cao Y, Shodhan K, Ghosh I, Bucci V, Hellweger F. 2011. Anatomy of an urban waterbody: A case study of Boston’s Muddy River. Journal of Environmental Pollution. 159(8), 1996-2002.
6) Kannel P, Lee S, Lee Y, Kanel S, Pelletier G. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. Journal of Ecological Modelling, 202(3), 503-517.

## Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

## Acknowledgments

We thank the sari Agricultural Sciences and Natural Resources University for supporting this research.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال چهاردهم. شماره پنجاه و سه . پاییز ۱۴۰۲

# بررسی روند تغییرات کیفی رودخانه نکا با استفاده از مدل QUAL2Kw در پایین‌دست سد گلورد

فائزه امامی قرا[۱]، رامین فضل اولی[۲*]، مجتبی خوش‌روش[۳]،

تاریخ ارسال:۱۴۰۱/۰۸/۱۷
تاریخ پذیرش:۱۴۰۱/۱۱/۲۶

مقاله پژوهشی

## چکیده

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب سطحی موجود که در معرض دبی آلاینده‌ها قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در این تحقیق، ضمن بررسی و شبیه‌سازی روند تغییرات کیفی در بازه ۸ کیلومتری از نکارود با استفاده از مدل QUAL2Kw، ارزیابی اثرات بندها، آبشارهای طبیعی و سازه‌های تثبیت بستر نیز صورت گرفت. به این منظور، دو دوره نمونه‌برداری کیفی از رودخانه صورت گرفت. سپس مدل اولیه تهیه و پس از رفع کمبود داده‌ها، واسنجی و صحت‌سنجی مدل انجام شد. بررسی روند تغییرات متغیرهای کیفیت آب رودخانه نشان داد که تمامی متغیرها در محدوده استاندارد قرار داشته و رودخانه توان خودپالایی بالایی دارد. بررسی روند تغییرات اکسیژن محلول نشان داد غلظت این متغیر نزدیک به حد اشباع بوده که علت آن شرایط مطلوب هیدرولیکی رودخانه برای نرخ هوادهی و وجود آبشارهای طبیعی و مصنوعی متعدد در رودخانه بوده است. مقدار pH نیز هر چند در محدوده استاندارد قرار داشت، اما در برخی مقاطع نزدیک به حد اشباع بوده که علت آن خروج گاز دی‌اکسیدکربن بر اثر آبشارهای موجود در مسیر جریان بوده که مدل این اثرات را نیز به‌خوبی شبیه‌سازی نمود. همچنین وجود بندهای انحرافی و ایجاد حالت ماندابی در پشت این بندها سبب شده تا زمان بیشتری برای تجزیه مواد آلی در اختیار باکتری‌ها قرار گیرد و این امر موجب افزایش میزان قلیائیت و افزایش pH در محدوده شده است. تحلیل نتایج و ارزیابی شاخص‌های خطا در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که مدل QUAL2Kw دقت مناسبی در شبیه‌سازی کیفیت آب نکارود دارد.

**واژه‌های کلیدی: رودخانه نکا، کیفیت آب، مدل QUAL2Kw، نمونه‌برداری کیفی.**

[۱] کارشناسی ارشد منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساریf.emamighara@yahoo.com
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری ( *نویسنده مسئول: raminfazl@yahoo.com & r.fazloula@sanru.ac.ir)
[۳] دانشیار، گروه مهندسی آب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساریm.khoshravesh@sanru.ac.ir

## مقدمه

فعالیت‌های بشر در بخش‌های شهری، صنعتی و کشاورزی منجر به تولید و تخلیه‌ی مقدار قابل توجهی مواد مغذی و آلی به آب‌های سطحی و رودخانه‌ها شده است (Drolc and Končan, 1996). افزایش رشد و توسعه جمعیت، کشاورزی و صنعت این نگرانی را که عدم توجه به مسائل و مشکلات فرا روی محیط‌زیست به‌خصوص کیفیت منابع آب، توقف توسعه‌ی اقتصادی و به دنبال آن، معضلات و پیامدهای جبران‌ناپذیر اجتماعی و اکوسیستمی را در پی خواهد داشت، افزون‌تر می‌نماید. در رودخانه به‌طور همزمان شرایط هیدرولوژیکی، بیولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، فیزیک زیستگاه و کیفیت آب بر سلامت اکوسیستم مؤثر هستند. عدم وجود شرایط مساعد در یکی از عوامل ذکر شده محیط‌زیست اکوسیستم آبی را دچار مخاطرات جدی خواهد کرد (Maddock, 1999). از طرفی پایش کیفی آب رودخانه‌ها وقت‌گیر و هزینه‌بردار است. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی آب، ابزاری کارآمد در تعیین و ارزیابی اثرات هر تغییری در مدیریت کیفی بدنه‌های آبی خواهد بود (نشریه شماره ۵۲۲ معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، ۱۳۸۸). یکی از بهترین ابزارها به‌دلیل قابلیت دسترسی آسان و امکان دسترسی آن با کمترین هزینه و مقبولیت توسط متخصصین امر، مدل QUAL2Kw می‌باشد، که تاکنون مطالعات متعددی در زمینه شبیه‌سازی کیفیت آب و تحلیل اثر سناریوهای بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها با استفاده از این مدل انجام شده است. بررسی Zhu et al. (2015) در توانایی سیستم تصفیه‌ی زیستی رودخانه‌ی تیان‌لی[1] در حذف آلاینده‌ها نشان داد که غلظت نیتروژن کل، فسفر کل و آمونیوم، اغلب اوقات بیش از مقدار استاندارد است. در این تحقیق، ابتدا سیستم تصفیه‌ی بیولوژیکی در آزمایشگاه اجرا و در نهایت ضرایب حذف هر یک از آلاینده‌ها به دست آمد. سپس، همین سیستم برای ۱۲۹۰ متر از رودخانه در مدل QUAL2K شبیه‌سازی شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که رودخانه تحت این سیستم قادر به حذف حداقل ۳۳ درصد آلاینده‌ها خواهد بود. مطالعاتی که بر رودخانه گل‌آلود بوستون[2] قبل از احیای آن، با هدف شناسایی و درک مشکل کیفیت آب رودخانه توسط Mathew et al. (2011) با استفاده از مدل QUAL2K آغاز شد، نشان داد که منابع آلاینده ورودی به رودخانه، سهم قابل‌توجهی در آلودگی رودخانه نداشته و عامل اصلی کاهش اکسیژن محلول در رودخانه، وجود جلبک‌های کف، رسوبات و فضولات پرندگان مهاجر به رودخانه است و تنها با لایروبی می‌توان کیفیت آب رودخانه را در شرایط مطلوب قرار داد. نتایج مطالعات انجام شده برای پیش‌بینی اثرات شرایط جریان، دبی و شاخه‌های ورودی بر روی کیفیت آب رودخانه مینهو[3] در اسپانیا که توسط Santos et al. (2013) با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام شد، نشان داد که می‌توان از مدل QUAL2Kw برای مدیریت و برنامه‌ریزی در حوضه رودخانه مینهو استفاده کرد. بیگلری و همکاران (۱۳۹۷) در مقاله‌ای با عنوان "مدل‌سازی و مدیریت کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود با رویکرد کنترل آلودگی در مبدأ به‌منظور تأمین سلامت حیات آبزیان" کیفیت آب رودخانه را شبیه‌سازی کردند. در این مطالعه سه دوره نمونه‌برداری پارامترهای کیفیت آب، پایش منابع آلاینده رودخانه و پایش وضعیت پوشش گیاهی بستر از نقاط مختلف رودخانه در فصول مختلف انجام گردید. با استفاده از داده‌های گردآوری‌شده، مدل هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه در محیط QUAL2Kw آماده‌سازی و سپس واسنجی و صحت‌سنجی شد. بررسی سناریوهای مختلف با توجه به رفتار هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه نشان می‌دهد که در طی فصول خشک، انرژی جنبشی واکنش و فرآیند انتقال هر دو بر تغییرات غلظت پارامترهای کیفیت آب اثرگذار بوده درحالی‌که در فصل تر، فرآیند انتقال غالب و اثرگذار است. همچنین، تحلیل منابع آلاینده نشان می‌دهند منابع گسترده همچون فضولات و زباله‌های انباشته‌شده در ساحل رودخانه، بیشترین سهم را در آلودگی آب (مواد مغذی) دارند و از بین منابع نقطه‌ای و آلاینده‌های کشاورزی، منابع نقطه‌ای سهم بیشتر آلایندگی را در فصل تابستان و پاییز و آلاینده‌های کشاورزی سهم بیشتر را در فصل بهار دارند. بررسی سناریوهای مختلف مدیریت کیفیت رودخانه در فصل پاییز نشان می‌دهند در شرایط کنونی، محدود نمودن BOD5 فاضلاب کارخانه قند به مقدار ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر سبب می‌گردد تا غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی رودخانه در حد استاندارد برای حیات آبزیان بماند. هاشمی و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از مدل QUAL2K سهم بار ورودی

[1] Tianlai
[2] Boston
[3] Minho

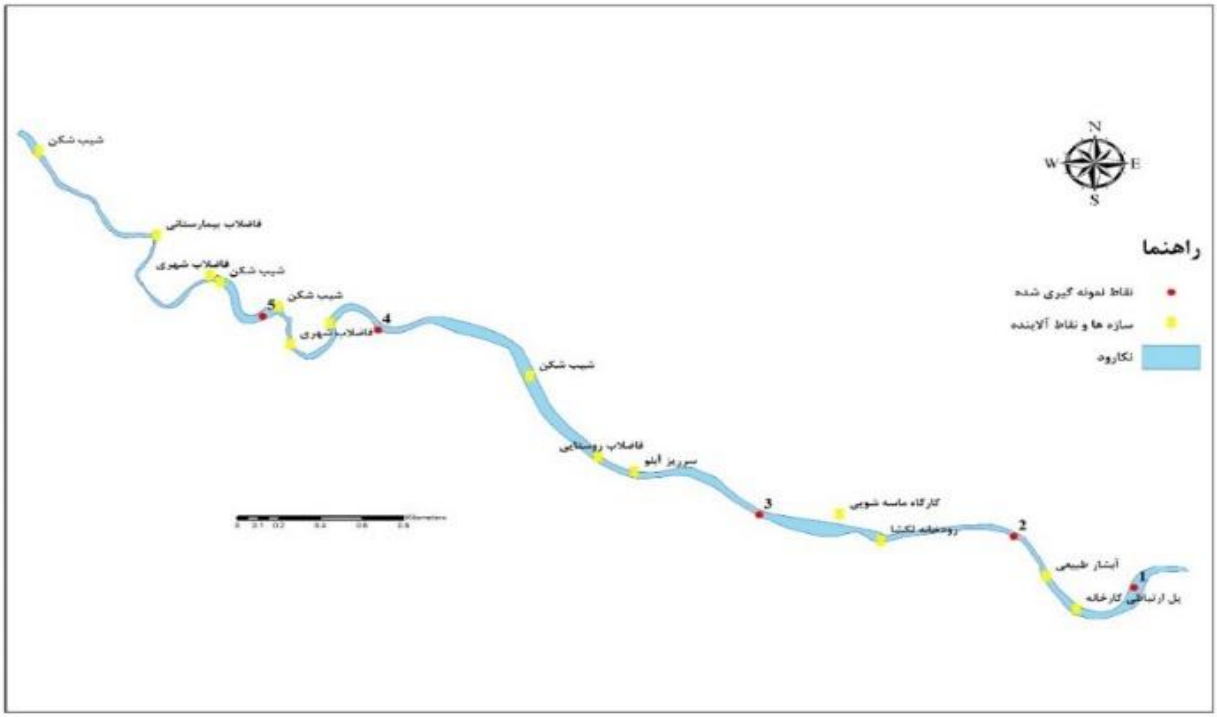
آلودگی از زیر حوضه‌ها به مخزن سد امیرکبیر را تعیین کردند که نتایج نشان داد که سهم بار آلودگی ورودی به مخزن سد از شاخه‌های فرعی، بیشتر از شاخه‌ی اصلی رودخانه است. Mehrdadi et al. (2006) خود پالایی رودخانه تجن را مورد بررسی قرار دادند که منابع آلودگی به‌صورت نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای آن را تهدید می‌کند. در این پژوهش TDS در طول فصل خشک و پرآبی مورد بررسی قرار گرفت که در فصل پرآبی در محدوده استاندارد بوده اما در فصل کم‌آبی بهار و تابستان افزایش یافته بود. مقدار BOD، COD، TDSو DO با استفاده از مدل QUAL2E در هر چهار فصل شبیه‌سازی شد و این پارامترها در مقابل فاصله از دریا رسم شدند، بررسی‌ها نشان داد که مقادیر BOD و COD در تمامی فصول زیاد بوده و TDS نیز در تابستان افزایش یافت ولی افزایش مقدار DO در زمستان مشاهده گردید. مطالعه ظرفیت خودپالایی رودخانه عباس‌آباد همدان با استفاده از مدل یک بعدی QUAL2KW ،و شبیه‌سازی پارامترهای N-NH4 ، N-NO3 و P -PO4 در دو بازه شرب و کشاورزی، در سال‌های ۱۳۹۰ ،۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ توسط ونایی و معروفی (۱۳۹۶) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل خودپالایی رودخانه با ورود مشخصات کمی و کیفی در ایستگاه‌های تعیین شده و پساب‌های ورودی به آن ساخته و کالیبره شد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که بیشترین مقدار خودپالایی پارامتر N-NH4 در بازه کشاورزی در سال ۱۳۹۴ و معادل ۵۲ درصد می‌باشد. برای پارامترهای N-NO3 و P -PO4 بیشترین میزان خودپالایی در سال ۱۳۹۴ در بازه شرب و به‌ترتیب به میزان ۴۵ و ۷۸ درصد می‌باشد. میزان P -PO4 در طول رودخانه روند رو به رشدی داشته است. بهترین شبیه‌سازی برای پارامتر P -PO4 در سال ۱۳۹۰ و ۱۳۹۱ می‌باشد که خطای استاندارد آن معادل ۰/۰۴ می‌باشد. در پژوهشی که توسط خدام محمدی و همکاران (۱۳۹۵) به منظور آگاهی از روند تغییرها و پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه کر با استفاده از نرم افزار QUAL2K انجام شد، ۷ موقعیت مناسب نمونه‌برداری در بازه پایین‌دست سد درودزن تا دریاچه طشک-بختگان انتخاب و اکسیژن محلول در دو ماه شهریور و اسفند که به‌ترتیب کم‌آب ترین و پرآب‌ترین ماه‌های سال در منطقه مورد مطالعه هستند، اندازه‌گیری گردید. کمینه و بیشینه اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده در ماه‌های اسفند و شهریور به‌ترتیب برابر ۵۹/۵ میلی‌گرم در لیتر در پل‌خان و ۲۵/۸ میلی‌گرم در لیتر در پل شهید غنی‌زاده، و ۷۱/۵ میلی‌گرم در لیتر در پل‌خان و ۹۱/۷ میلی‌گرم در لیتر در پل شهید غنی‌زاده می‌باشد. دلیل کاهش اکسیژن محلول در ایستگاه پل‌خان، ورود فاضلاب‌های مجتمع پتروشیمی شیراز و شهر مرودشت می‌باشد. از علت‌های افزایش میزان اکسیژن محلول پس از پل‌خان می‌توان به کم شدن اثر پساب خروجی از تصفیه‌خانه مرودشت و مجتمع پتروشیمی شیراز اشاره کرد. وجود پل‌ها و تاسیسات آب‌بند مانند بند امیر، پل رحمت آباد و بند حسن‌آباد می‌تواند باعث افزایش تلاطم و افزایش هوادهی و قدرت خودپالایی رودخانه کر و در نتیجه افزایش میزان اکسیژن محلول در آن شود. پاشازاده لاله و همکاران (۱۴۰۰) به منظور بررسی کیفی آب رودخانه آجیچای با استفاده از شاخص‌های مختلف کیفی مصارف ویژه، تعداد ۱۶ ایستگاه نمونه‌برداری در طول مسیر رودخانه تعیین و طی دو فصل تر (اردیبهشت ماه ۹۵) و خشک (شهریور ماه ۹۵) نمونه‌برداری انجام شد. پارامترهای فیزیکوشیمیایی شامل اسیدیته (pH) ، دما (T) ، کدورت (Turbidity) ، هدایت الکتریکی (EC) ، کل جامدات محلول و معلق (TS) ، کل جامدات محلول (TDS) ، یون‌های اصلی (سدیم، پتاسیم، کلسیم، منیزیم، کلر، سولفات، بی‌کربنات) و فرعی (نیترات و فسفات)، پارامترهای اکسیژن محلول (DO) ، اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) و اکسیژن‌خواهی بیولوژیک (BOD) و پارامترهای بیولوژیکی شامل کلی‌فرم کل (T.C) و کلی‌فرم‌های مدفوعی (F.C) اندازه‌گیری شد. مطابق نتایج به‌دست آمده مقادیر متوسط برخی از پارامترها از حد مجاز آب آشامیدنی ایران بالاتر می‌باشد. ارزیابی کیفی رودخانه آجی‌چای با استفاده از شاخص آلودگی رودخانه (RPI)، شاخص اورگان (OWQI)، شاخص سید (Said)، شاخص دینیوس (Dinius) و روش وزن‌دهی حسابی شاخص کیفیت آب (WQI) نشان‌دهنده وضعیت خیلی بد رودخانه در اکثر ایستگاه‌ها به‌خصوص قسمت-های میانی آن در محدوده شهر تبریز در اثر ورود آلاینده‌ها به آن می‌باشد. بر اساس نتایج تحقیق شاخص سید، شاخص دینیوس و شاخص وزن‌دهی حسابی به‌دلیل توانایی در نشان دادن روند تغییرات کیفی، شاخص‌های مناسب در ارزیابی کیفی رودخانه آجی‌چای جهت مصارف ویژه و بنابراین مدیریت کیفی آن معرفی می‌گردند. بررسی کیفیت شیمیایی و روند تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه گرگان‌رود استان گلستان توسط نظریان و فرید گیگلو (۱۳۹۴) انجام شد. برای این منظور در

محل ایستگاه نوده از داده‌های ۳۷ سال آمار این ایستگاه استفاده شد. چگونگی کیفیت آب این رودخانه با استفاده از روش‌های گرافیکی تعیین و همچنین روند کلی سالانه و فصل‌های مختلف سال آشکارسازی و مشخص شده است. با توجه به این که تمام سری‌های مشاهداتی غیر نرمال بودند به منظور تعیین روند در داده‌ها از آزمون ناپارامتری من-کندال استفاده شد. نتایج آنالیز کیفی نشان داد که با توجه به نمودار پایپر آب رودخانه گرگان‌رود در محل این ایستگاه از تیپ آب‌های شورمزه بوده و بر اساس سختی کل، از نوع سخت می‌باشند. با توجه به نمودار شولر آب این منطقه از نظر شرب در محدوده قابل‌قبول قرار داشته و طبق نتایج گراف ویلکوکس می‌توان برای کشاورزی مورد استفاده قرار داد. نتایج بررسی روند نشان می‌دهد که اکثر پارامترهای مورد بررسی در ایستگاه نوده روند صعودی و معنی‌دار در بلندمدت داشته‌اند. به طور کلی روند نزولی دبی جریان در فصول مختلف سال و روند افزایشی میزان املاح موجود در آب، کاهش کیفیت شیمیایی آب را جهت استفاده‌های گوناگون سبب خواهد شد. تحقیقی به منظور بررسی اکسیژن محلول و اکسیژن مورد نیاز بیوشیمیایی توسط گلبابایی کوتنایی و همکاران (۱۳۹۱) بر بابلرود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2K انجام شد. به همین منظور ۵ ایستگاه در طول رودخانه مشخص گردید و در سال ۱۳۹۰ از آنها نمونه برداری گردید. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی می‌توان گفت که کیفیت آب رودخانه بابل‌رود برای کشاورزی از وضعیت مناسبی برخوردار است ولی برخی از نقاط آن برای عبور آبزیان نقاط بحرانی محسوب می‌شوند که افزایش اکسیژن محلول سرآب رودخانه تا ۵ mg/L و همچنین افزایش اکسیژن محلول فاضلاب شهری ورودی تا حد ۳ mg/L باعث از بین رفتن نقاط بحرانی می‌شود. مرور منابع موجود نشان داد که استفاده از مدل QUAL2K به‌منظور شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها در داخل و خارج از کشور به‌صورت گسترده‌ای صورت گرفته است. اما در رودخانه نکا تاکنون مدل‌سازی کیفیت آب انجام نشده است لذا بررسی وضعیت کیفیت آب رودخانه مذکور و ارزیابی توان خودپالایی آن نیاز به مطالعه و مدل‌سازی داشته‌است. علاوه براین در این رودخانه تعدادی آبشار طبیعی جریان نیز وجود دارد که می‌تواند اثرات کیفی مؤثری داشته باشد. همچنین می‌توان انتظار داشت که سازه‌های تثبیت بستر و بندهای انحرافی موجود در رودخانه مورد مطالعه می‌توانند بر قابلیت خودپالایی رودخانه و تغییرات پارامترهای کیفی جریان اثر گذار باشند که تاکنون در مطالعات پیشین برای رودخانه‌های داخلی این موضوع مورد بررسی قرار نگرفته است. با این حال در منابع خارجی در مطالعه‌ای که توسط Kannel et al. (2007) ، انجام شد اثر سریز جریان مورد بررسی قرار گرفت و مشخص شده که وجود سرریز در رودخانه باگماتی می‌تواند منجر به بهبود و افزایش میزان اکسیژن محلول در رودخانه شود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

نکارود از ارتفاعات ۳۴۰۰ متری شاه‌کوه در جنوب شرقی شهرستان گرگان سرچشمه گرفته و پس از طی مسافتی حدود ۱۶۵ کیلومتر به ایستگاه آب‌سنجی آبلو واقع در شهر نکا می‌رسد و از آنجا پس از عبور از شهر نکا و دشت‌های ساحلی به دریای خزر می‌پیوندد. پایین‌دست رودخانه از محل گلورد تا خروج رود از کوهستان به علت نفوذ هوای بارانی از داخل دره به حوضه آبخیز مقدار بارندگی زیاد بوده و متوسط آن بین ۷۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر است. در این قسمت از رود حوضه آبخیز پوشیده از جنگل است و مقدار آبدهی آن از سایر مناطق بیشتر است. میانگین ارتفاع حوضه‌ی آبریز رودخانه ۱۳۲۴ متر از سطح دریا بوده و در محدوده جغرافیایی ′۱۷ °۵۳ تا ′۴۴ °۵۴ طول شرقی و ′۲۸ °۳۶ تا ′۴۲ °۳۶ عرض شمالی جریان دارد. مساحت حوضه آبریز حدود ۱۹۰۶ کیلومترمربع است که در استان مازندران و بخش کوچکی از آن در غرب استان گلستان واقع شده است. در این تحقیق، یک بازه‌ی ۸ کیلومتری که ابتدای بازه از بند انحرافی شاه‌بند بوده و پایان محدوده شهری، انتهای بازه‌ی مطالعاتی است، در نظر گرفته شده است. شکل ۱ نقشه بازه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری را در این مطالعه نشان می‌دهد.




**شکل (۱): نقشه بازه مورد مطالعه و موقعیت نقاط نمونه برداری**

### تأمین داده‌های هواشناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

برای تأمین داده‌های موردنیاز، از داده‌های ثبت شده نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به بازه مطالعاتی نکارود یعنی ایستگاه دشت ناز ساری استفاده شد. درصد پوشش ابر نیز با توجه به مشاهدات میدانی در روزهای نمونه‌برداری ثبت گردید. به‌منظور ساخت مدل هیدرولیکی رودخانه، ۲۰ مقطع در محدوده مطالعاتی تهیه و به مدل وارد شد. ضریب زبری رودخانه در بازه‌های مختلف با توجه به منابع بین ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۳۵ در نظر گرفته شد (سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴) و فواصل بازه‌ها و شیب طولی هر بازه نیز با استفاده از نقشه Google Earth استخراج شد. پس از ورود مشخصات مقاطع و بازه‌های رودخانه، شرایط مرزی مسئله، عمق نرمال پایین‌دست در نظر گرفته شد و برای این منظور شیب طولی متوسط رودخانه به مدل معرفی گردید. برای اجرای مدل و تهیه‌ی منحنی‌های موردنظر، مدل هیدرولیکی برای ۳۰ دبی در بازه‌ی ۰ تا ۱۰ مترمکعب بر ثانیه اجرا شد. پس از اجرای مدل، نتایج به محیط نرم افزار Excel منتقل و منحنی‌های مربوطه و معادلات آن‌ها استخراج شد. در مطالعه حاضر، با توجه به اطلاعات موجود، از روابط دبی-عرض و سرعت–اشل برای مقاطع رودخانه استفاده شد. برای این منظور، ابتدا مدل هیدرولیکی رودخانه با استفاده از مدل HEC-RAS ساخته شد و پس‌ازآن ضرایب و توان‌های معادلات دبی اشل، دبی سرعت و دبی عرض از مدل استخراج و به مدل کیفی منتقل شد.

### تأمین داده‌های کیفیت آب رودخانه

عملیات نمونه‌برداری و بازدید میدانی از رودخانه نکا در ماه‌های مرداد و شهریور سال ۹۸ انجام شد. مقاطع و محل ورود آلاینده‌ها به رودخانه، سازه‌ها و عوارض طبیعی تعیین شد. سپس از رودخانه دو دوره نمونه کیفی برداشت شد و مقادیر منابع آلاینده آن بررسی گردید. با توجه به محدودیت‌های مالی و زمانی، موقعیت منابع آلاینده موجود در رودخانه نمونه‌برداری پارامترهای کیفیت آب از پنج نقطه در طول رودخانه صورت گرفت (شکل ۱). دوازده متغیر کیفیت آب در این دو دوره به‌صورت درجا و آزمایشگاهی اندازه‌گیری و ثبت گردیدند. بعد از بازدیدهای میدانی مشخص شد که یک شاخه فرعی در محدوده مطالعاتی به رودخانه می‌ریزد (شاخه فرعی لکشا). علاوه براین مشخص شد به‌واسطه‌ی عبور پل رودگذر از رودخانه برای دسترسی به کارخانه سیمان، جریان از ۳۰ لوله به قطر یک متر عبور کرده و آبشار جریانی به میزان ۱ متر ایجاد می‌شود. در محدوده مطالعاتی در کیلومترهای ۶ تا ۷ تعدادی آبشار طبیعی

جریان وجود دارد. در کیلومتر ۵ ،بند انحرافی کنترلی واقع در ایستگاه هیدرومتری آبلو سبب پس زدگی و آبشار جریان می-شود. علاوه بر این در ادامه مسیر رودخانه در یک، سه و پنج کیلومتری از انتهای بازه مطالعاتی، سه سازه تثبیت بستر سبب آبشار جریان و در برخی موارد پس‌زدگی جریان می‌گردند. علاوه براین، در نزدیکی انتهای بازه مطالعاتی نیز، یک بند انحرافی جریان اثراتی بر کیفیت آب رودخانه میگذارد. بررسی منابع آلاینده در طول بازه مطالعاتی نشان داد که تعداد چهار فاضلاب روستایی، چهار فاضلاب شهری و یک فاضلاب بیمارستانی، وارد رودخانه می‌شوند. از یک فاضلاب روستایی و یک فاضلاب شهری، به نمایندگی از فاضلاب‌های روستایی و شهری، نمونه‌برداری کیفی انجام شد. علاوه براین نمونه‌برداری کیفی از فاضلاب بیمارستان نیز صورت گرفت. در ادامه، مدل کیفیت آب رودخانه انتخاب شد و داده‌هایی همچون مشخصات مقاطع رودخانه، منابع آلاینده، داده‌های هواشناسی و سایر اطلاعات وارد مدل QUAL2Kw گردید. پس از ساخت مدل، واسنجی و صحت‌سنجی مدل، دقت مدل‌ها ارزیابی و تحلیل نتایج انجام شد.

## مدل‌سازی

از بین مدل‌های رایج شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه، نسخه ۱ .۵ مدل QUAL2Kw به‌منظور مدلسازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه نکارود انتخاب شد. QUAL2Kwمدل یک‌بعدی، شبیه‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه با جریان دائمی بوده که قادر است تغییرات کیفیت آب ۱۹ متغیر را به‌صورت روزانه و با گام زمانی کمتر از یک ساعت شبیه‌سازی نماید (Pelletier and Chapra, 2005).

در مدل QUAL2Kw برای همه پارامترها به‌جز جلبک‌های کف یک موازنه جرم کلی برای هر المان بدون در نظر گرفتن ناحیه هایپریک به‌صورت رابطه ۱ در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{dCi}{dt} = \frac{Qi-1}{Vi}Ci\text{-}1 - \frac{Qi}{Vi}Ci - \frac{Qab,i}{Vi}Ci + \frac{E'i-1}{Vi}(Ci\text{-}1 - Ci) + \frac{Ei'}{Vi}(Ci+1 - Ci) + \frac{Wi}{Vi} + Si \quad (1)$$

در این رابطه، $Q_i$ دبی در بازه i (L/day)، $Q_{ab,i}$ برداشت جریان از بازه i (L/day)، $V_i$ حجم بازه i (L)، $W_i$ بارگذاری خارجی در بازه i (mg/day)، $S_i$ چشمه یا چاه بر اثر عکس العمل‌ها یا انتقال جرم (mg/L/day)، $Ei'$ ضریب پخش حجمی بین بازه‌ها (L/day)، $Ei'$ و $Ei-1'$ ضریب پخش حجمی بین بازه‌های i و i-۱ ، i و(L/day) i+1، Ci غلظت پارامتر کیفی آب در بازه i (mg/day)، t زمان (day) می‌باشد.

## فرضیات مدل‌سازی

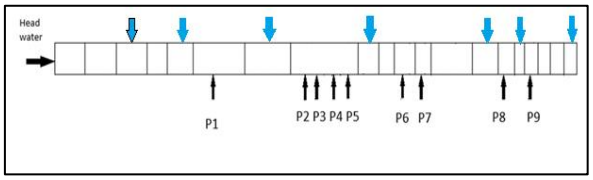
به دلیل عدم وجود برخی از اطلاعات و ساختار مدل، علاوه بر فرضیات اصلی مدل، فرضیات جانبی مدل‌سازی نیز در نظر گرفته شده است:

جریان رودخانه ازنظر کمّی، کیفی و توابع تحریک در شرایط دائمی و غیریکنواخت قرار دارد. از شبیه سازی SOD با توجه به در دسترس نبودن اطلاعاتی از میزان اکسیژن‌خواهی رسوبات و همچنین کفزی‌ها و بی‌مهرگان موجود در رسوبات صرف‌نظر شد. لازم به ذکر است که در محدوده مطالعاتی لجن چندانی مشاهده نشد. با توجه به در دسترس نبودن اطلاعی از وضعیت کیفیت ناحیه هایپریک و همچنین ضخامت جریان این ناحیه از اثر ناحیه هایپریک در این پژوهش صرفنظر شد. لازم به ذکر است که، سایر محققین نیز در اکثر تحقیقات از این اثر صرفنظر نموده‌اند (Kannel et al., 2007).

## آماده‌سازی مدل

مدل QUAL2Kw در روند حل معادلات، شرط پایداری حل را بررسی می‌کند و در صورت عدم انتخاب گام زمانی مناسب، گام زمانی مناسب برای حل مسئله را ارائه می‌دهد. در این مطالعه، گام زمانی ۵/۶۲۳ برای حل معادلات انتخاب شد. اگر جلبک یا گیاه در شبیه‌سازی حضور داشته باشد، به‌منظور رسیدن شبیه‌سازی به حالت دائمی، شبیه‌سازی باید حداقل تا ۲ برابر مقدار زمان عبور جریان در رودخانه انجام شود (Chapra and Pelletier, 2005). باتوجه به اینکه زمان عبور جریان رودخانه در بازه مطالعاتی مورد بررسی کمتر از یک روز است، بنابراین حداقل مدت زمان شبیه‌سازی موردنیاز برای هر دو دوره در مطالعه حاضر برابر با ۲ روز درنظر گرفته شد. در مطالعه حاضر، برای حل معادلات از روش عددی اویلر و برای شبیه‌سازی pH از روش نیوتن_رافسون استفاده شده است. با توجه به فرضیات مدل، شرایط اولیه مسئله برابر با اطلاعات ورودی در سرشاخه درنظر گرفته شد. با توجه به عوارض طبیعی و مصنوعی موجود، محدوده مطالعاتی نکارود نیز به ۲۰ بازه تقسیم شد. (شکل ۲) بازه‌بندی رودخانه و موقعیت منابع آلاینده ورودی را نشان

می‌دهد در این شکل فلش مشکی افقی جهت جریان آب سرشاخه، فلش‌های آبی نمایش‌گر آبشارهای طبیعی و مصنوعی و فلش‌های مشکی عمودی موقعیت منابع آلاینده را نشان می‌دهد.




**شکل (۲): بازه‌بندی و موقعیت منابع آلاینده و آبشارهای طبیعی و مصنوعی رودخانه نکا**

### واسنجی و صحت‌سنجی مدل

پس از ساخت مدل اولیه و اجرای آن و اطمینان از تکمیل بودن داده‌های ورودی به مدل، باید تنظیمات مربوط به واسنجی اتوماتیک مدل انجام شود. در این مرحله، تعیین تعداد نسل و جمعیت الگوریتم ژنتیک، تعداد نرخ‌های فعال برای واسنجی، روش محاسبه نرخ هوادهی رودخانه و همچنین تعیین وزن هر متغیر کیفیت آب در تابع هدف الگوریتم ژنتیک، بسیار حائز اهمیت است. در مرحله‌ی واسنجی ۱۸ نرخ فعال شد، لازم به‌ذکر است که با توجه به عدم وقوع شرایط بی‌هوازی در رودخانه، نرخ دینیتریفیکاسیون برابر با صفر درنظر گرفته شد. علاوه براین، تعداد ۱۲ متغیر منبع آلاینده مجهول نیز برای تخمین توسط مدل در مرحله واسنجی تعریف شد. به‌منظور محاسبه‌ی نرخ هوادهی از روش اینترنال که از جمله ۸ روش تعبیه شده در مدل است، استفاده شد. علت استفاده از این روش، مقبولیت این روش توسط بسیاری از محققین و توصیه راهنمای مدل است (بیگلری، ۱۳۹۵) و (kennel et al, 2007). تعیین تعداد نسل و جمعیت برای الگوریتم ژنتیک به تعداد درجات آزادی مدل، تابع هدف و سایر عوامل بستگی دارد، در مطالعات مختلف، تعداد نسل و جمعیت در بازه‌های ۵۰ تا ۲۰۰ در نظر گرفته شده است (بیگلری، ۱۳۹۵). در این مطالعه، تعداد نسل و جمعیت برابر با ۵۰، با هدف کاهش زمان واسنجی اتوماتیک مدل برای اولین تلاش واسنجی اتوماتیک، درنظر گرفته شد که با همین تعداد، مدل واسنجی شد. تابع هدف الگوریتم ژنتیک، همان تابع هدف پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شد. برای اکسیژن محلول و آمونیوم به ترتیب وزن‌های ۱۰ و ۵، برای دما، هدایت الکتریکی، pH و قلیائیت وزن حداقل برابر با ۱ و برای سایر متغیرها وزن برابر با ۲ تنظیم شد.

### ارزیابی دقت مدل

به‌منظور ارزیابی دقت مدل، از شاخص‌های معمول محاسبه خطا یعنی شاخص RMSE ٪ و RMSE استفاده شد (بیگلری، ۱۳۹۵). رابطه‌های (۲) و (۳) شاخص‌های خطای استفاده شده در این مطالعه را نشان می‌دهد که در آن، $n$ تعداد کل داده‌ها، $O_i^{obs}$ مقدار مشاهداتی متغیر کیفی و $O_i^{sim}$ مقدار مدل‌سازی‌شده متغیر کیفی است. هر چه مقادیر این شاخص‌ها کمتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی بیشتر است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(O_i^{obs} - O_i^{sim}\right)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$RMSE\ \% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{\left(O_i^{obs} - O_i^{sim}\right) * 100}{O_i^{obs}}\right]^2}{n}} \quad (۳)$$

### مقایسه استاندارد کیفیت آب

برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه، غلظت متغیرهای کیفیت آب رودخانه با مقادیر توصیه‌شده برای آبزیان مقایسه شد. (جدول ۱) محدوده استاندارد توصیه‌شده برای پارامترهای کیفی آب برای حیات آبزیان را نشان می‌دهد.

**جدول (۱): محدوده استاندارد متغیرهای کیفیت آب برای آبزیان (بیگلری، ۱۳۹۵ و بیگلری و همکاران، ۱۳۹۷)**

| متغیر | محدوده استاندارد | مرجع |
|---|---|---|
| DO(mg/l) | ۶< | گزارش مطالعات اکولوژیک رودخانه زرینه‌رود ۱۳۹۵، (USEPA, 1986) |
| BOD(mg/l) | ۶> | (EEC, 1978)، (Bhatnagar & Devi, 2013; Bhatnagar et al., 2004) |
| EC(µm/cm) | ۵۰۰۰> | مطالعات اکولومژیک رودخانه زرینه‌رود ۱۳۹۵، ( Bhatnagar & Devi, 2013; Stone & Thomforde, 2004) |
| PH | ۶-۹ | (EEC, 1978) |
| TEMP(°C) | ۳۰> | گزارش مطالعات اکولوژیک رودخانه زرینه‌رود ۱۳۹۵ |
| NO3(mgN/l) | ۱۰/۱۶۱> | (ANZECC, 2000) |
| NH4(mgN/l) | ۰/۷۷> | (EPA, 2003) |
| NH3(mgN/l) | ۰/۰۲۴> | (ANZECC, 2000) |
| N-O(mgN/l) | - | - |
| TN(mgN/l) | ۵> | (EPA, 2003) |
| P-O(mgP/l) | - | - |
| P-ino(mgP/l) | - | - |
| TP(mgP/l) | ۰/۵> | (EPA, 2003) |
| ALK(mgcaco3/l) | ۵۰-۳۰۰ | (USEPA, 1986)، (Bhatnagar & Devi, 2013; Santhosh & Singh, 2007) |

## بحث و نتایج

### نتایج واسنجی مدل

(۲ **Error! Reference source not found.**)

نتایج واسنجی نرخ‌های مدل را نشان می‌دهد. مدل در شبیه‌سازی دمای آب، دقت مناسبی داشته است. علت افزایش دمای آب از بالادست به پایین‌دست نیز افزایش دمای هوا از سرشاخه به سمت پایین‌دست و ورود منابع آلاینده به رودخانه با دمای بیشتر است. اکسیژن محلول در برخی مقاطع به بیش‌ازحد اشباع نیز می‌رسد. علت این امر وجود آبشارهای طبیعی و مصنوعی جریان در رودخانه است. دقت مدل در این نقاط نشان می‌دهد، مدل مذکور به‌خوبی قادر به شبیه‌سازی اثرات کیفی آبشارهای طبیعی، سازه‌های تثبیت بستر و بندها است. در ابتدای محدوده مطالعاتی که پایین‌دست بند انحرافی جریان است (شکل ۱)، با وجود آبشار جریان به ارتفاع حدود ۵ متر، غلظت اکسیژن محلول کمتر از حد اشباع است. علت این امر وجود مانداب در بالادست بند بوده که سبب مصرف اکسیژن محلول توسط باکتری‌ها می‌شود. با ریزش جریان از بند، بخشی از اکسیژن به جریان آب باز می‌گردد و در ادامه با وجود آبشارهای پیاپی جریان تا محل شاخه فرعی، غلظت اکسیژن محلول نزدیک به حد اشباع می‌شود. علت کاهش ناگهانی اکسیژن‌محلول در سه کیلومتری از پایین‌دست، افزایش عمق و کاهش سرعت جریان است که خود سبب کاهش نرخ هوادهی می‌گردد. نرخ اکسیداسیون CBOD نیز برابر با ۴/۳۷ است. این مقدار نشان از بالا بودن توان رودخانه در حذف مواد آلی کربنی دارد و به عبارتی، توان خودپالایی بسیار مناسب است. مرور منابع نشان می‌دهد که هرچه عمق جریان رودخانه کمتر باشد، نرخ حذف مواد آلی بیشتر خواهد بود (Chapra, 1997). بنابراین از دلایل بالا بودن نرخ حذف در رودخانه مورد مطالعه، می‌توان به عمق کم رودخانه اشاره نمود. البته باید توجه داشت که بالا بودن این نرخ در مواردی می‌تواند با مصرف مقادیر قابل‌توجه اکسیژن محلول در رودخانه، دردسرساز نیز باشد. در رودخانه مورد مطالعه، با توجه به غلظت کم BOD و غلظت مناسب اکسیژن محلول در رودخانه به‌واسطه نرخ هوادهی مناسب و آبشارهای طبیعی و مصنوعی موجود در مسیر جریان، بالا بودن نرخ حذف BOD، اثر چندانی بر کاهش اکسیژن محلول نداشته و درواقع می‌توان اظهار داشت که نرخ تولید اکسیژن محلول در آب، بسیار بیشتر از نرخ مصرف آن توسط باکتری‌ها است. بررسی روند تغییرات داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده نشان می‌دهد که مدل به‌درستی روند را شبیه‌سازی نموده به‌جز در کیلومتر ۳، علت این امر می‌تواند خطاهای موجود در نمونه‌برداری و آزمایشات باشد. روند افزایشی نیتروژن کل در طول

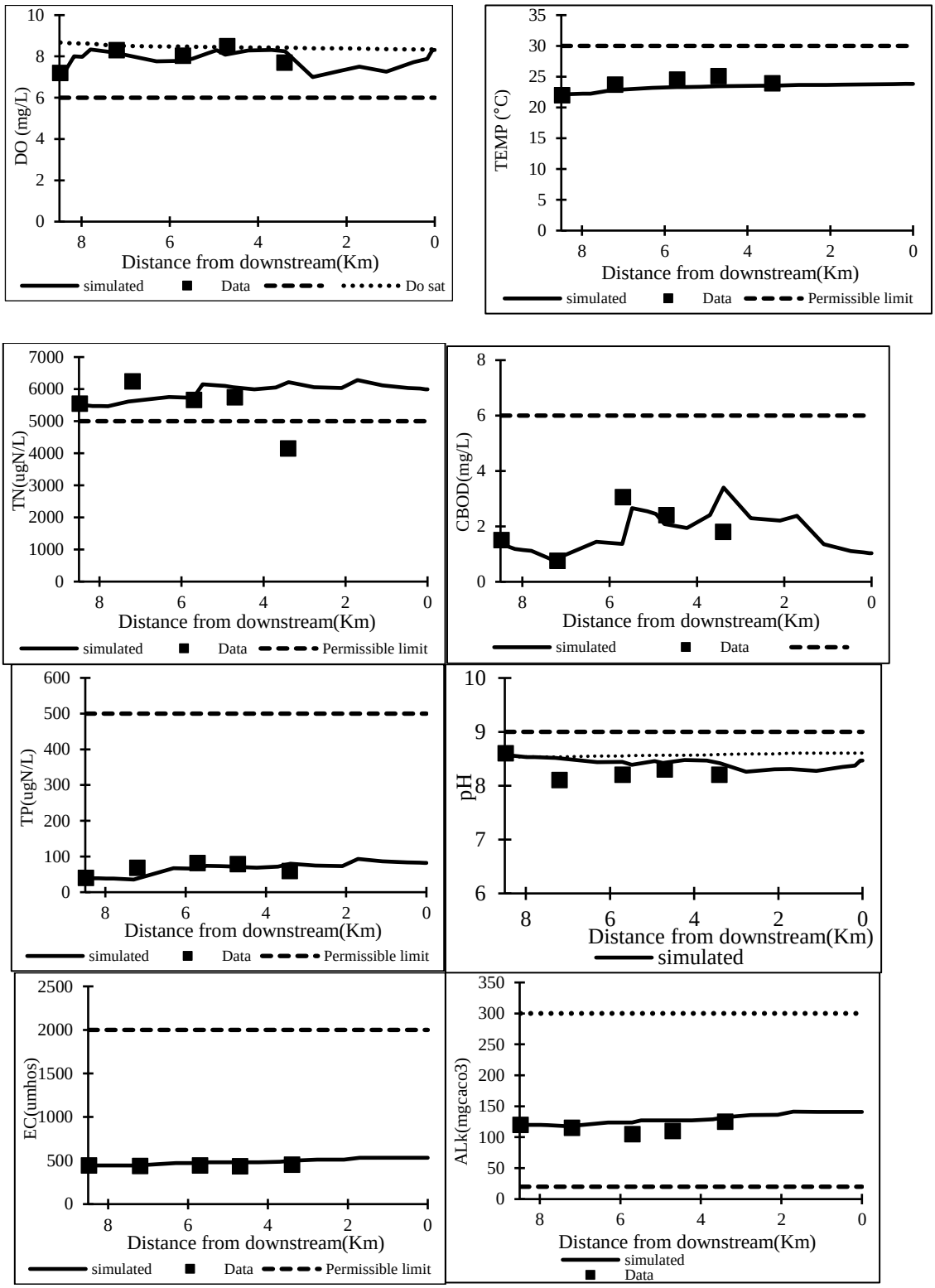
رودخانه، به دلیل ورود منابع آلاینده، حاوی ترکیبات نیتروژنی به رودخانه بوده و دلیل کاهش در برخی از محدوده‌ها، مصرف نیتروژن توسط گیاهان و همچنین ته‌نشینی نیتروژن آلی در رودخانه است. نرخ ته‌نشینی نیتروژن آلی در رودخانه برابر با ۱/۸۹ متر بر روز است که عدد قابل‌توجهی است، چراکه حداکثر مقدار پیش‌فرض مدل برابر با ۲ است. بنابراین یکی از عوامل اصلی در کاهش مقدار نیتروژن کل موجود در آب رودخانه نکا، ته‌نشینی نیتروژن آلی در بستر است. از طرفی نرخ هیدرولیز نیتروژن آلی برابر با ۰/۱۰ بر روز است که عدد کوچکی است و این امر بیانگر این است که تولید آمونیوم به‌واسطه‌ی هیدرولیز نیتروژن آلی، ناچیز خواهد بود. بررسی مقدار نرخ نیتریفیکاسیون نشان می‌دهد که نرخ نیتریفیکاسیون در رودخانه بسیار قابل‌توجه و برابر با ۹/۳۲ بر روز است. بنابراین، غلظت آمونیوم موجود در آب با سرعت قابل‌توجهی توسط باکتری‌ها تجزیه و به نیترات تبدیل می‌شود. مصرف آمونیوم توسط باکتری‌ها، همواره همراه با مصرف اکسیژن خواهد بود. چنانچه غلظت این متغیر قابل‌توجه باشد و نرخ نیتریفیکاسیون نیز بالا باشد، می‌تواند غلظت اکسیژن محلول در رودخانه را به حدود بحرانی برساند، اما در رودخانه نکا با توجه به شرایط ایده‌آل نرخ هوادهی اکسیژن به‌واسطه‌ی عوامل طبیعی و مصنوعی، مشکلی ایجاد نخواهد شد. همان‌طور که اشاره شد، با توجه به عدم وقوع شرایط بی‌هوازی در رودخانه، نرخ دینیتریفیکاسیون در رودخانه برابر با صفر در نظر گرفته شده است، بنابراین تنها عامل کاهش غلظت نیترات، مصرف آن توسط گیاهان است. مقایسه مقادیر حداکثر نیترات که برابر است با ۱۹۳۵ میکروگرم نیتروژن بر لیتر با حدود حداکثر استاندارد موجود، نشان می‌دهد که غلظت این متغیر در محدوده استاندارد است. اما باید توجه داشت که با توجه به بالا بودن نرخ نیتریفیکاسیون که منجر به تولید نیترات می‌گردد و ورود نیترات از منابع آلاینده، در صورت ورود مقادیر قابل‌توجه نیتروژن آلی (که پتانسیل تبدیل به نیترات را داراست) و آمونیوم به رودخانه، خطر عدم تأمین استاندارد مقادیر نیترات در رودخانه وجود دارد.

بررسی روند تغییرات آمونیوم یونیزه نشده در رودخانه نشان می‌دهد که این متغیر در محدوده استاندارد قرار دارد. غلظت این ماده سمی با افزایش غلظت آمونیوم، افزایش دما و pH افزایش خواهد یافت. بنابراین باید توجه داشت که در فصول بحرانی سال (دمای زیاد، آلاینده قابل‌توجه) غلظت این متغیر از حدود استاندارد تجاوز نکند. افزایش pH عامل بسیار اثرگذاری بر افزایش غلظت این متغیر است و با توجه به اینکه در رودخانه نکا pH بالا است، باید توجه ویژه به این امر داشت. براساس استاندارد محیط‌زیست مقدار مجاز pH برای رودخانه‌ها بین ۶/۵ تا ۸/۵ است. با توجه به (شکل ۳) که روند تغییرات pH را در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد، در ابتدای محدوده‌ی مطالعاتی، مقدار pH بیش از حد اشباع است که علت این امر سرریز جریان از بند انحرافی در این محل است. در بالادست بند، جریان ماندابی مشاهده می‌شود که سبب مصرف مواد آلی و مغذی می‌شود. مصرف این مواد سبب افزایش قلیائیت و افزایش pH می‌گردد. افزایش گاز دی‌اکسید کربن در آب، سبب کاهش pH می‌گردد و کاهش این گاز در آب سبب افزایش pH خواهد شد چنانچه ریزش جریان از این سازه سبب از دست دادن گاز دی‌اکسیدکربن آب شود، مقدار pH در پایین‌دست افزایش می‌یابد و چنانچه سبب ورود گاز دی‌اکسیدکربن به آب شود، pH بعد از این سازه کاهش می‌یابد. در ادامه، مقدار این متغیر روندهای کاهشی و افزایشی را در طول رودخانه طی می‌کند که ناشی از وجود بندها، آبشارهای جریان و فرآیندهای اثرگذار بر قلیائیت (که خود به‌صورت مستقیم بر pH اثر می‌گذارد) است. به‌طورکلی بررسی روند تغییرات این متغیر نشان می‌دهد که مقدار آن در محدوده استاندارد برای اغلب کاربری‌های آب است. روند شبیه‌سازی فسفر کل که نشان‌دهنده مجموع ترکیبات آلی و غیرآلی فسفر است، تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی دارد. حد استاندارد تغییرات فسفر کمتر از ۰/۵ میلی‌گرم فسفربرلیتر است که مقایسه آن با مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد که محدوده تغییرات فسفر در بازه مطالعاتی موردنظر در محدوده استاندارد قرار دارد. روند افزایشی فسفر کل در طول رودخانه، ورود مقادیر قابل‌توجه فسفر آلی و غیرآلی از منابع آلاینده است. نرخ هیدرولیز فسفر آلی در رودخانه قابل‌توجه و برابر با ۲/۶۲ بر روز است و با سرعت قابل‌توجهی به فسفر غیرآلی تبدیل خواهد شد. بنابراین از دلایل اصلی افزایش فسفر غیرآلی در رودخانه، می‌توان به بالا بودن نرخ

هیدرولیز فسفر آلی اشاره نمود. یکی از منابع مصرفی فسفر غیرآلی نیز، مصرف این ماده توسط گیاهان است. تغییرات قلیائیت نیز روند افزایشی دارد. از عوامل مؤثر در افزایش قلیائیت آب، مصرف نیترات و فسفر توسط گیاه، دنیتریفیکاسیون، هیدرولیز فسفر آلی و نیتروژن آلی و دفع آمونیوم توسط گیاه را می‌توان نام برد. هم‌چنین نیتریفیکاسیون و دفع مصرف آمونیوم در فتوسنتز ازجمله مواردی هستند که سبب کاهش قلیائیت آب می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی هدایت الکتریکی که با دستگاه مولتی‌پارامتر سنج و به صورت درجا در محل اندازه‌گیری شد، روند افزایشی را نشان می‌دهد که با دقت بسیار خوبی شبیه‌سازی شده است. از عوامل افزایش روند هدایت الکتریکی آب رودخانه می‌تواند ورود فاضلاب‌های شهری و روستایی به رودخانه نکا باشد.

**جدول (۲): نتایج واسنجی مدل**

| Parameter | Value | Units | Auto-cal | Min value | Max value |
|---|---|---|---|---|---|
| Slow CBOD Hydrolysis rate | 3.63 | /d | Yes | ۰ | ۵ |
| Slow CBOD Oxidation rate | 0.10 | /d | Yes | ۰ | ۰/۵ |
| Fast CBOD Oxidation rate | 4.37 | /d | Yes | ۰ | ۵ |
| Organic N Hydrolysis | 0.10 | /d | Yes | ۰ | ۵ |
| Organic N Settling velocity | 1.89 | m/d | Yes | ۰ | 2 |
| Ammonium Nitrification | 9.32 | /d | Yes | ۰ | ۱۰ |
| Organic P Hydrolysis | 2.62 | /d | Yes | ۰ | ۵ |
| Organic P Settling velocity | 0.16 | m/d | Yes | ۰ | ۲ |
| Inorganic P Settling velocity | 0.09 | m/d | Yes | ۰ | ۲ |
| Sed P oxygen attenuation half sat constant | 0.77 | mgO2/L | Yes | ۰ | ۲ |
| Detritus Dissolution rate | 0.93 | /d | Yes | ۰ | ۵ |
| Detritus Settling velocity | 2.30 | m/d | Yes | ۰ | ۵ |
| Bottom Plants: | | | | | |
| Max Growth rate | 64.57 | gD/m2/d or /d | Yes | ۰ | ۱۰۰ |
| Basal respiration rate | 0.25 | /d | Yes | ۰ | ۰/۳ |
| Excretion rate | 0.45 | /d | Yes | ۰ | ۰/۵ |
| Death rate | 0.01 | /d | Yes | ۰ | ۰/۵ |
| Light constant | 5.43 | langleys/d | Yes | ۱ | ۱۰۰ |
| Ammonia preference | 84.28 | UgN/L | Yes | ۱ | ۱۰۰ |




**شکل (۳): نتایج واسنجی پارامترهای کیفی آب رودخانه نکا**

**نتایج صحت‌سنجی مدل**

به‌منظور صحت‌سنجی مدل کیفیت آب نکارود، از نتایج نمونه‌برداری، در تاریخ ۲۶ شهریورماه ۱۳۹۸ استفاده شد. باتوجه به محدودیت زمانی و مالی مطالعه حاضر، صحت‌سنجی این مدل محدود به یک دوره در فصل خشک شد. بررسی شرایط هیدرولیکی رودخانه در دوره صحت‌سنجی نشان می‌دهد، هرچند دبی سرشاخه نسبت به دوره واسنجی از ۰/۶۲۲ به ۰/۴۸۱ کاهش داشته اما روند مشخصات هیدرولیکی و نرخ هوادهی و زمان عبور جریان تفاوت چندانی نداشته است. بنابراین با توجه به اینکه هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی در فصل خشک رودخانه بوده و تغییرات کمی جریان، هواشناسی و توابع تحریک نیز تا حدی وجود دارد، دوره مناسبی برای صحت‌سنجی مدل انتخاب شده است. بررسی دقت مدل‌ها در این دوره نشان می‌دهد که مدل‌های اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، هدایت الکتریکی، فسفر کل، قلیائیت و pH دارای دقت قابل‌قبولی بوده و مدل نیتروژن کل با وجود پیش‌بینی صحیح روند تغییرات داده‌های مشاهداتی، دارای مقادیر قابل‌توجهی خطا است. به‌طورکلی خطاهای موجود در مدل‌ها می‌تواند ناشی از خطای نمونه‌برداری، خطای آزمایشات و خطای مدل‌سازی باشد. دقت مدل در دوره صحت‌سنجی، تأییدی بر توان مدل در تخمین نقص داده‌ها نیز است. چراکه در دروه واسنجی علاوه بر واسنجی نرخ‌ها، ۱۲ متغیر مجهول از یک منبع آلاینده نیز تخمین زده شد که در دوره صحت‌سنجی ثابت در نظر گرفته شد. بنابراین قابلیت مدل در تخمین نقص داده‌ها در این پژوهش مورد بررسی و تائید قرار گرفت. لازم به‌ذکر است که بیگلری (۱۳۹۵) برای نخستین بار از این امکان برای تخمین نقص داده‌های منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای ازجمله کیفیت آب خروجی از تصفیه خانه آب شهری میاندوآب، پساب برگشتی از زمین‌های کشاورزی، آلودگی ناشی از تماس جریان رودخانه با فضولات و زباله‌های ساحل رودخانه زرینه‌رود، استفاده نمود. نتایج ایشان نیز حاکی از دقت مدل در تخمین نقص داده‌ها بود.

**ارزیابی دقت مدل در تخمین پارامترها**

ارزیابی دقت مدل در هر دو دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که مدل دقت قابل قبولی در شبیه سازی متغیرهای کیفیت آب دارد. براساس شاخص RMSE٪ بیشترین دقت مدل در هر دو دوره مربوط به متغیر pH و پس از آن اکسیژن محلول است و بیشترین خطای مدل نیز مربوط به متغییر CBOD بوده که این امر در غلظت‌های کم CBOD معمولاً مشاهده می‌شود (بیگلری، ۱۳۹۵). برای نمونه میزان خطای RMSE٪ برای CBOD در مطالعه‌ای توسط بیگلری در سال ۱۳۹۵ بر رودخانه زرینه رود در مرحله واسنجی بیش از ۲۰۰٪ گزارش شده است که البته مقادیر سایر شاخص‌های خطا در محدوده قابل‌قبول بوده‌اند و ایشان علت این امر را در مقادیر کم غلظت متغیرها طبیعی اعلام کردند. لازم به ذکر است که در دوره صحت‌سنجی میزان RMSE٪ برای همین متغیر کمتر از ۳۰٪ گزارش شده و با توجه به اینکه سایر شاخص‌های ارزیابی خطا (عملکرد) مقادیر قابل‌قبولی را ارائه می‌دهند، عملکرد مدل قابل قبول اعلام شده است. در مطالعه دیگری که توسط کانل و همکاران در سال ۲۰۰۷ برای رودخانه باگماتی نپال صورت گرفت، مقدار شاخص RMSE٪ را برابر با ۵۳٪ برای پارامتر CBOD و در حد قابل قبول گزارش کردند. رفیعی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۴ مدل‌های ساخته شده با شاخص خطای RMSE کمتر از ۲/۴ (برحسب میلیگرم بر لیتر) را برای شبیه‌سازی اکسیژن محلول، نیترات، آمونیوم و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، مدل‌های با دقت خوب معرفی کردند.

**جدول (۳): ارزیابی عملکرد مدل در دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی**

| پارامتر | %RMSE | | RMSE | |
|---|---|---|---|---|
| | واسنجی | صحت‌سنجی | واسنجی | صحت‌سنجی |
| DO(mg/l) | ۴/۱۱ | ۹/۹۶ | ۰/۳۳ | ۰/۷۱ |
| CBOD (mg/l) | ۴۷/۲۱ | ۳۱/۶۰ | ۱/۰۵ | ۱/۵۶ |
| EC (umhos) | ۷/۱۳ | ۸/۶۹ | ۳۱/۶۷ | ۴۲/۱۳ |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| pH (s.u) | ۲/۹۷ | ۱/۵۸ | ۰/۲۴ | ۰/۱۳ |
| TN (mgN/l) | ۲۲/۸۹ | ۱۷/۶۸ | ۰/۹۸ | ۲/۳۳ |
| TP (mgP/l) | ۲۸/۰۱ | ۱۳/۸۳ | ۰/۱۸ | ۰/۰۱ |

## نتیجه‌گیری

رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب سطحی هستند که نقش مهمی در تأمین آب موردنیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند و پذیرنده حجم وسیعی از آلودگی‌ها می‌باشند. بسیاری از برنامه‌ریزی‌های منابع آب در کشورها، براساس پتانسیل بالقوه منابع آب سطحی است. در پژوهش حاضر، روند کامل فرآیند مدیریت کیفیت آب رودخانه با هدف، شناسایی و کنترل آلودگی رودخانه نکا در سال ۱۳۹۸ صورت گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعه صورت گرفته، نشان می‌دهد که:

- مدل QUAL2Kw قابلیت در نظر گرفتن فرآیندهای حاکم و اثرگذار بر کیفیت آب رودخانه موردنظر را دارد.
- مدل قادر به در نظر گرفتن اثرات کمی و کیفی سازه‌های موجود در رودخانه است (سازه‌های تثبیت بستر، بندهای انحراف جریان).
- تحلیل نتایج به‌دست‌آمده و ارزیابی شاخص‌های خطا در دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهد که شبیه‌سازی رودخانه دقت قابل‌قبولی دارد. درنتیجه مدل QUAL2Kw دقت مناسبی در شبیه‌سازی کیفیت آب نکارود را دارد.
- مدل‌سازی آبشارهای طبیعی و مصنوعی جریان و بندها در مدل و بررسی دقت مدل در محل این سازه‌ها و اثرات این سازه‌ها نشان می‌دهد که مدل دقت بسیار خوبی برای در نظر گرفتن اثر این نوع سازه‌ها در شبیه‌سازی کیفیت آب دارد.
- کیفیت آب رودخانه در هر دو دوره در محدوده استاندارد قرار داشته و آلاینده‌های موجود قادر به ایجاد مقاطع بحرانی کیفیت در رودخانه نمی‌باشند.
- رودخانه از توان خود پالایی بالایی برخودار بوده، به نحوی که نرخ حذف BOD بیش از ۴ بر روز بوده و نرخ نیتریفیکاسیون نیز بیش از ۹ بر روز است.
- با وجود بالا بودن نرخ‌های اکسیداسیون مواد کربنی و نیتروژنی و به تبع آن مصرف بالای اکسیژن توسط باکتری‌ها، غلظت اکسیژن محلول در رودخانه بیش از حداقل‌های استاندارد بوده و در برخی موارد حتی به بیش از حد اشباع می‌رسد که علت این امر، وجود آبشارهای طبیعی و مصنوعی در مسیر جریان در محدوده مطالعاتی است.
- به‌واسطه‌ی وجود بندها و سرریزها در مسیر رودخانه، مقدار pH در برخی مواقع به حد اشباع می‌رسد اما همواره در محدوده استاندارد است.
- مدل دقت قابل‌قبولی در تخمین نقص داده‌های موجود دارد.

## منابع

بیگلری، م. ۱۳۹۵. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در شرایط تأمین نیاز زیستی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس.تهران. ایران. ۴۹ ص.

بیگلری، م.، س، سیما.و م، سعادتپور. ۱۳۹۷. مدل‌سازی و مدیریت کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود با رویکرد کنترل آلودگی در مبدأ به‌منظور تأمین سلامت حیات آبزیان. تحقیقات منابع آب ایران. سال چهاردهم. شماره ۰۵، ص ۷۰-۵۴.

پاشازاده لاله، ز.، جعفری ه.و واعظی هیر، ع. ۱۴۰۰. ارزیابی کیفیت آب رودخانه آجی‌چای (دشت تبریز) براساس شاخص‌های کیفی مصارف ویژه. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. دوره ۱۱. شماره ۴. ۳۶۷- ۳۴۴.

خدام محمدی، م.، بوستانی، ف. ۱۳۹۵. ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر (مطالعه موردی: پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک- بختگان. مجله مهندسی منابع آب. دوره ۹. شماره ۳۰. ۹۶-۸۷.

سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۹۴، راهنمای تعیین ضریب زبری هیدرولیکی رودخانه‌ها، ضابطه شماره ۶۸۸.

گلبابایی کوتنایی، ف.، امینی راد، ح.، میرزایی، م.و یوسفی کبریا، د. ۱۳۹۱. مدل‌سازی کیفی رودخانه بابل‌رود توسط نرم‌افزار QUAL2K. دومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران.

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور. ۱۳۸۸. دستورالعمل پایش کیفی آب‌های سطحی (جاری). نشریه شماره ۵۲۲. ۲۰۳ ص.

نظریان، س.، فرید گیگلو، ب. ۱۳۹۴. بررسی کیفیت شیمیایی آب و روند تغییرات پارامترهای کیفی در محل ایستگاه نوده رودخانه گرگان‌رود استان گلستان. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. دوره ۵. شماره ۳. ۹۱-۸۰.

ونایی، ع.، معروفی، ص. ۱۳۹۶. بررسی خودپالایی و شبیه‌سازی تغییرات نیتروژن و فسفر در طول رودخانه عباس‌آباد همدان با استفاده از نرم افزار QUAL2KW. مجله مهندسی آبیاری و آب ایران. دوره ۸. شماره ۲. ۱۸۶-۱۷۲.

هاشمی، ح.، قاسمی زیبارانی، الف.و رنجککش، ی. ۱۳۹۰. سهم‌بندی بار آلودگی ورودی از زیرحوضه‌ها به مخزن سد امیرکبیر با استفاده از مدل QUAL2K. مجله محیط‌شناسی. سال ۳۷، شمارۀ ۵۷. ۸-۱.

ANZECC, S. 2000. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council, 2000. Australian and New Zealand Guidelines for Fresh and Marine Water Quality.

Drolc, A. and Končan, J. Z. 1996. Water quality modelling of the river Sava, Slovenia. Water Research, 30(11), 2587-2592.

EPA. 2003. Aquaculture Management and the Environment Protection (Water Quality) Policy. Official Journal..

Kannel P, Lee S, Lee Y, Kanel S, Pelletier G. 2007. Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. Journal of Ecological Modelling 202(3):503-517

Maddock, I. 1999. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. Freshwater biology, 41(2), 373-391 .

Mathew M, Yao Y, Cao Y, Shodhan K, Ghosh I, Bucci V, Hellweger F. 2011. Anatomy of an urban waterbody: A case study of Boston’s Muddy River. Journal of Environmental pollution 159(8):1996-2002.

Mehrdadi, N; Ghobadi, M and Nasrabadi, T. 2006. "Evaluation of the quality and selfpurification potential of Tajan river using; HGFV’D model", Journal of Environmental Health Science and Engineering, No.3, pp. 199-204.

Pelletier, G., & Chapra, S. 2005. QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, retrieved, 10.

Rafiee M., Akhound Ali A.M., Moazed H., Lyon S.W., Jaafarzadeh N., Zahraie B. 2014. A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. Journal of Hydraulic Structures 1(2):10-22.

Santos, S. Vilar, V. J. Alves, P. Boaventure, R. A. and Botelho, C. 2013. Water quality in Minho River (Portugal/Spain). Enviromental monitoring and assessment, 185(5), 3269-3281.

Zhu, W., Niu, Q., Zhang, R., Ye, R., Qian, X., & Qian, Y. 2015. Application of QUAL2K Model to Assess Ecological Purification Technology for a Polluted River. International journal of environmental research and public health, 12(2), 2215-2229.