Advanced Technologies in Water Efficiency
homepage:https://atwe.razi.ac.ir
Online ISSN:2783-4964
Razi University

Simulation of quality and pollution of Dez river using QUAL2Kw model

Mohsen Lashani[1], Saeid Shabanlou[2], Mohsen Najarchi[3]✉, Mohammad Reza Basiri[4], Hosein Mazaheri[5]

[1] Ph. D student of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: parseyan_saze@yahoo.com
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran. E-mail: saeid.shabanlou@gmail.com
[3] Corresponding Author, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: mohsen.najarchi@iau.ac.ir
[4] Assistant Professor, Department of Textile Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: mohammad.r.basiri51@gmail.com
[5] Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Arak Branch, Islamic Azad University, Arak, Iran. E-mail: Hossein.mazaheri@iau.ac.ir

ABSTRACT

The Dez River, as the third largest river in the country, plays an essential role in the economic, social and environmental life of North Khuzestan. Also, it is very important because it supplies water to more than 125 thousand hectares from the Dez plain and the lands downstream of this plain to the place of Bituminous Dam and provides a significant part of the environmental needs of the Karun River. The purpose of this research is to investigate the trend of quality and pollution along the Dez River and evaluate the effects of urban, agricultural and industrial wastewater discharges on the trend of pollution and quality of the Dez River in 131 intervals based on the QUAL2Kw model. In the calibration and validation stages of the model, it was determined that wide parameters such as flow geometry, river hydraulic conditions, water flow rate, aeration coefficients, pollutant entry points, nitrification rate, oxygen demand, etc. in the river are involved in qualitative modeling results. The results showed that QUAL2Kw water quality model is highly accurate in simulating quality parameters and pollution in Dez River. The trend of changes in quality parameters and pollution in the Dez River showed that this river is better in terms of BOD pollution due to the discharge of urban and industrial sewage, in terms of EC pollution due to the discharge of agricultural land drains (mainly sugarcane plan) and in terms of N-NH4 pollution It is in a critical condition due to urban and industrial sewage and drainage of agricultural lands. Therefore, it is suggested that all the wastewater of Dezful city, fish farming effluent, Haft Tepe complex and Pars paper factory should be treated and then discharged, but regarding agricultural drains, corrective measures such as improvement in the type of irrigation systems, fertilizers , the cultivation pattern of the area, etc., should be done at the source.

Keywords: QUAL2Kw, Qualitative simulation, Pollution trends, Dez River

Article Type: Research Article
Article history: Received: 03 February 2024 **Revised:** 17 April 2024 **Accepted:** 05 May 2024 **ePublished:** 21 June 2024

1.Introduction

The Dez River, as the third largest river in the country, plays an essential role in the economic, social and environmental life of North Khuzestan. Also, it is very important because it supplies water to more than 125 thousand hectares from the Dez plain and the lands downstream of this plain to the place of Bituminous Dam and provides a significant part of the environmental needs of the Karun River. The purpose of this research is to investigate the trend of quality and pollution along the Dez River and evaluate the effects of urban, agricultural and industrial wastewater discharges on the trend of pollution and quality of the Dez River in 131 intervals based on the QUAL2Kw model.

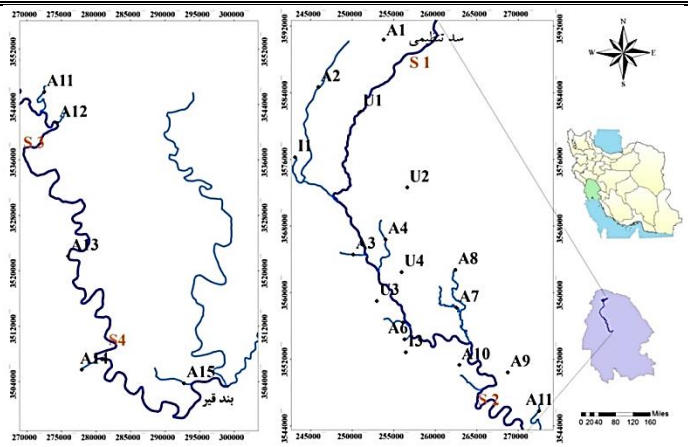


Figure 1. The location of the study area (a- the range of the regulatory dam to Abshirin station b- the range of Harmaleh station to Bamdej station)

2. Methodology

The QUAL2Kw model simulates the river in one dimension (one dimension along the length of the river) along with non-uniform permanent flow and can consider the effect of loading both point and non-point. In this model, in order to determine the concentration of qualitative parameters, the finite difference method is used to numerically solve the displacement-diffusion equation (Chapra et al., 2006). In this research, the QUAL2Kw model was used to simulate the process of pollution and quality in Dez River. This model is able to solve the equations related to the river in both permanent and quasi-dynamic conditions. Also, simulate parameters such as dissolved oxygen, biochemical oxygen demand, temperature, ammonia nitrogen, etc. in the river network. In this model, the qualitative simulation is done based on the river course spacing. Spacing is done according to the hydraulic conditions of the river and the place of discharge of pollutants. Therefore, the distance between the regulatory dam and Bandaghir was divided into 131 intervals with variable lengths. In the calibration and validation stages of the model, it was determined that wide parameters such as flow geometry, river hydraulic conditions, water flow rate, aeration coefficients, pollutant entry points, nitrification rate, oxygen demand, etc. in the river are involved in qualitative modeling results.

3. Results and discussion

The results showed that QUAL2Kw water quality model is highly accurate in simulating quality parameters and pollution in Dez River. The trend of changes in quality parameters and pollution in the Dez River showed that this river is better in terms of BOD pollution due to the discharge of urban and industrial sewage, in terms of EC pollution due to the discharge of agricultural land drains (mainly sugarcane plan) and in terms of N-NH4 pollution It is in a critical condition due to urban and industrial sewage and drainage of agricultural land. Therefore, it is suggested that all sewage of Dezful city, sewage of fish farming, Haft Tepe complex and Pars paper factory be treated and then discharged, but regarding agricultural drains, corrective measures such as improvement in the type of irrigation systems, fertilizers , the cultivation pattern of the area, etc., should be done at the source.

4. Conclusions

The construction of a treatment plant as a solution for all polluting sources seems to be expensive and impossible. Therefore, it is suggested that all sewage of Dezful city, sewage of fish farming, Haft Tepe complex and Pars paper factory be treated and then discharged, but regarding agricultural drains, corrective measures such as improvement in the type of irrigation systems, fertilizers , the cultivation pattern of the area, etc., should be done at the source.

5. References

Chapra, S., Pelletier, G., & Tao, H. (2006). A Modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.04: Documentation and user's manual. Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, Medford, MA. https://www.semanticscholar.org/paper/

6. Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Cite this article: Lashani, M., Shabanlou, S., Najarchi, M., Basiri, M.R., & Mazaheri, H. (2024). Simulation of quality and pollution of Dez river using QUAL2Kw model, *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(2), 1-21. DOI: 10.22126/atwe.2024.10383.1115

Publisher: Razi University

© The Author(s).

فناوری های پیشرفته در بهره وری آب

وبگاه نشریه: https://atwe.razi.ac.ir شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۹۶۴

شبیه‌سازی روند کیفیت و آلودگی رودخانه دز با استفاده از مدل QUAL2Kw

محسن لشنی[۱]، سعید شعبانلو[۲]، محسن نجارچی[۳]✉، محمدرضا بصیری[۴]، حسین مظاهری[۵]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک ، ایران. رایانامه: parseyan_saze@yahoo.com

[۲] دانشیار، گروه مهندسی آب، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی ، کرمانشاه، ایران. رایانامه: saeid.shabanlou@gmail.com

[۳] نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک ، ایران. رایانامه: mohsen.najarchi@iau.ac.ir

[۴] استادیار، گروه مهندسی نساجی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی ، اراک ، ایران. رایانامه: mohammad.r.basiri51@gmail.com

[۵] دانشیار، گروه مهندسی شیمی، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی ، اراک ، ایران. رایانامه: hossein.mazaheri@iau.ac.ir

چکیده

رودخانه دز به‌عنوان سومین رودخانه پرآب کشور نقش اساسی در حیات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شمال خوزستان دارد. همچنین به دلیل تأمین آب بیش از ۱۲۵ هزار هکتار از اراضی دشت دز و اراضی پایین‌دست این دشت تا محل بندقیر و تأمین بخش قابل‌توجهی از نیاز زیست‌محیطی رودخانه کارون بسیار حائز اهمیت است. هدف از این تحقیق بررسی روند کیفیت و آلودگی در طول رودخانه دز و ارزیابی اثرات تخلیه فاضلاب‌های شهری، کشاورزی و صنعتی بر روند آلودگی و کیفیت رودخانه دز، در ۱۳۱ بازه بر اساس مدل QUAL2Kw است. در مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل مشخص شد، پارامترهای گسترده‌ای مانند خصوصیات هندسی جریان، شرایط هیدرولیکی رودخانه، میزان جریان آب، ضرایب هوادهی، نقاط ورودی آلاینده‌ها، نرخ نیتریفیکاسیون، اکسیژن خواهی و غیره در رودخانه در نتایج مدل‌سازی کیفی دخالت دارند. نتایج نشان داد مدل کیفیت آب QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی و آلودگی در رودخانه دز از دقت بالایی برخوردار است. روند تغییرات پارامترهای کیفی و آلودگی در رودخانه دز نشان داد که این رودخانه ازنظر آلایندگی BOD به دلیل تخلیه فاضلاب‌های شهری و صنعتی، ازنظر آلایندگی EC به سبب تخلیه زهکش اراضی کشاورزی (عمدتاً طرح نیشکر) و ازنظر آلایندگی N-NH4 به علت فاضلاب‌های شهری، صنعتی و زه آب اراضی کشاورزی در شرایط بحرانی قرار دارد. لذا پیشنهاد می‌شود تمامی فاضلاب شهر دزفول، پساب پرورش ماهی، مجتمع هفت‌تپه و کارخانه کاغذسازی پارس تصفیه و سپس تخلیه گردند اما در خصوص زهکش‌های کشاورزی اقدامات اصلاحی مانند اصلاح در نوع سیستم‌های آبیاری، کودهای مصرفی، الگوی کشت منطقه و غیره در مبدأ صورت گیرد.

واژه‌های کلیدی: QUAL2Kw، شبیه‌سازی کیفی، روند آلودگی، رودخانه دز

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

سابقه مقاله: دریافت: ۱۴ بهمن ۱۴۰۲ **اصلاح:** ۲۹ فروردین ۱۴۰۳ **پذیرش:** ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۳ **چاپ الکترونیکی:** ۰۱ تیر ۱۴۰۳

استناد: لشنی، م.، شعبانلو، س.، نجارچی، م.، بصیری، م.ر.، و مظاهری، ح. (۱۴۰۳). شبیه سازی روند کیفیت و آلودگی رودخانه دز با استفاده از مدل QUAL2Kw، *فناوری های پیشرفته در بهره وری آب*، ۴(۲)، ۲۱-۱، شناسه دیجیتال: 10.22126/atwe.2024.10383.1115

ناشر: دانشگاه رازی

© نویسندگان.

مقدمه

رودخانه‌ها مهم‌ترین منابع حیاتی تأمین آب دریاها، دریاچه‌ها و در اکثر موارد اصلی‌ترین شریان‌های انتقال و توزیع آب بخش‌های صنعت، کشاورزی و شهری به شمار می‌آیند. نتایج بررسی وضعیت کیفی رودخانه‌های داخل کشور نشان می‌دهد که کیفیت آب رودخانه‌ها پس از عبور از مناطق با کاربری شهری، روستایی، صنعتی و کشاورزی به‌واسطه‌ی ورود آلاینده‌ها کاهش می‌یابد و این کاهش کیفیت اغلب در فصول خشک که حداقل جریان برقرار است اتفاق می‌افتد.

رودخانه دز به‌عنوان سومین رودخانه پرآب کشور نقشی اساسی در حیات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی شمال خوزستان دارد. تخلیه پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی و طرح نیشکر در مسیر رودخانه حیات رودخانه را بخصوص در مقاطع بحرانی با مشکل مواجه نموده است. همچنین افزایش جمعیت، کاهش آبدهی رودخانه‌ها و انتقال آب بین حوضه‌ای اثر مستقیم در تشدید وضعیت آلودگی رودخانه دارد. هدف از این تحقیق شبیه‌سازی وضعیت کیفیت و آلودگی قسمتی از رودخانه دز با استفاده از مدل QUAL2Kw و واسنجی و صحت‌سنجی آن بر اساس داده‌های کیفیت و آلودگی در محل ایستگاه‌های بر روی رودخانه دز است. تعیین نقاط یا بازه‌های بحرانی در طول رودخانه دز ازنظر پارامترهای آلودگی و کیفیت از اهداف دیگر این تحقیق است. بر اساس مدل واسنجی شده در رودخانه دز، می‌توان در آینده با توجه به میزان توسعه و تغییرات اقلیمی و تغییر الگوی بهره‌برداری از رودخانه، وضعیت کیفی رودخانه دز را پیش‌بینی نموده و برای بهبود کیفیت آن برنامه‌ریزی نمود.

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

در پی افزایش جمعیت و رقابت در مصرف، تعارض و تضاد در چگونگی بهره‌برداری از رودخانه‌ها رو به فزونی است. لذا برای بهره‌برداری بهینه از این منابع، درک خصوصیات و رفتار طبیعی رودخانه‌ها به‌منظور حفظ سلامت رودخانه‌ها و حیات جامعه بشری امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است (گیلبرت و ماکسول[1]، ۲۰۱۷.، هو و همکاران[2]، ۲۰۱۶.، و لی و همکاران[3]، ۲۰۱۶)

مدیریت امروز حوضه‌های آبریز و رودخانه‌ها اقتضا می‌کند که تعادل منطقی و مناسبی بین مصارف منابع آب و توانایی و قابلیت پیش‌بینی بازتاب رودخانه نسبت به تغییرات و اشاره‌ای تحمیلی برقرار شود. نیل به این هدف جز بافهم و درک درستی از وظایف رودخانه و اثرات متغیرهای فیزیکی بر رفتار کلی رودخانه میسر نیست. مدل‌های شبیه‌ساز کیفیت آب ابزاری کارآمد و رایج در امر برنامه‌ریزی و مدیریت کیفی رودخانه‌ها به شمار می‌آیند. از بین مدل‌های شبیه‌ساز موجود، مدل QUAL2Kw به‌طور گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها مورداستفاده قرارگرفته و قابلیت انجام تحلیل عدم قطعیت را داراست (چاپرا و همکاران[4]، ۲۰۰۶).

هاشمی و همکاران (۱۳۹۱) برای ارزیابی کیفیت آب رودخانه کرج، ۱۴ پارامتر کیفی آب را در ۴۲ ایستگاه با استفاده از مدل QUAL2K و روش تحلیل عاملی موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد روش تحلیل عاملی می‌تواند به‌عنوان یک روش مناسب برای تعیین مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رتبه‌بندی کیفیت آب در ایستگاه‌ها استفاده شود. نجفی و محمود پور (۱۳۹۱) مدل‌سازی کیفی رودخانه قره‌سو را بر اساس آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای شهرها، کارخانه‌های صنعتی، اراضی کشاورزی با استفاده از مدل QUAL2K انجام دادند. نتایج نشان داد بحرانی‌ترین بازه، بازه بعد از شهر کرمانشاه است که بیشترین مقدارTN ، TP و کمترین مقدار DO را داراست و اعمال سناریوی کاهش بار آلودگی‌های ورودی به رودخانه در اثر احداث تصفیه‌خانه سبب بهبود وضعیت کیفی رودخانه می‌شود.

بیگلری و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی شرایط کیفی رودخانه زرینه‌رود با استفاده از مدل QUAL2K به این نتیجه رسیدند که مدل مذکور قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی بیش‌تر پارامترهای کیفیت آب رودخانه را دارد و مقادیرTN ، TP و DO در شرایط بحرانی از حدود مجاز برای حیات آبزیان تجاوز نموده‌اند. هم‌چین از بین دو سناریوی افزایش جریان سرشاخه و کنترل منابع آلاینده جهت بهبود وضعیت کیفیت آب رودخانه، سناریوی دوم به‌عنوان سناریوی برتر معرفی گردید.

---

[1] Gilbert and Maxwel
[2] Hu et al
[3] Li et al
[4] Chapra et al

عاشق‌معلا و حمامی (۱۳۹۳) از مدل کیفیت آب QUAL2K برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی DO و BOD رودخانه قشلاق کردستان استفاده نمودند. در این پژوهش دو سناریوی تخلیه پساب طبق استانداردهای تخلیه DO) و BOD به ترتیب ۲ و ۳۰ میلی–گرم بر لیتر (و تخلیه پساب بر اساس توان خود پالایی رودخانه و به‌شرط حفظ شرایط کیفی مناسب رودخانه اجرا گردید. سناریوی دوم باصرفه اقتصادی ده میلیارد ریالی به‌عنوان سناریوی برتر انتخاب شد. نتایج نشان داد با استفاده بهینه از توان خود پالایی هر رودخانه می‌توان استانداری تعیین کرد که توجیه اقتصادی مناسبی هم برای تخلیه کنندگان داشته باشد.

رفیعی و همکاران[1] (۲۰۱۳) در رودخانه گرگر، پارامترهای N-NO3 ، N-NH4، CBODو DOرا با به‌کارگیری مدل QUAL2K موردبررسی قراردادند. نتایج نشان داد که مدل مذکور باوجود کمبود اطلاعات، ارزیابی قابل قبولی از وضعیت رودخانه ارائه می‌دهد. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد مدل نسبت به دبی رودخانه، دبی منابع نقطه‌ای، نرخ نیتریفیکاسیون و CBOD حساسیت بیش‌تری دارد. بررسی کیفیت آب گل‌آلود رودخانه بستونیا با استفاده از مدل QUAL2K نشان داد که کیفیت آب رودخانه کم‌تر تحت تأثیر بارش و نقطه ورودی فاضلاب قرار می‌گیرد (متئو و همکاران[2]، ۲۰۱۱).

ژانگ و همکاران[3] (۲۰۱۲) با هدف ارائه مبنایی جهت تصمیم‌گیری مدیریت آب زیست‌محیطی، با استفاده از مدل QUAL2K کیفیت رودخانه تایهو چین را مورد تحلیل و بررسی قراردادند. ظرفیت بار آلودگی آب زیست‌محیطی پارامترهایBOD ، NH3-N، TN و TPبه ترتیب ۱۷/۵۱، ۱/۵۲، ۲/۷۴، ۰/۳۷ تن برای است. نتایج نشان داد که برای برآوردن اهداف کیفیت آب، NH3-N، TN وTP که بارهای آلودگی رودخانه موردمطالعه هستند بایستی به ترتیب به میزان ٪۵۰.۹۶، ٪ ۴۴.۱۱ و ٪۲۲.۹۲ کاهش یابند.

استفاده از مدل ترکیبی HEC-5 و QUAL2K تحت عنوان مدل‌سازی با رویکرد ابتکاری برای شناسایی اثر جزر و مد بر شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه، نشان داد که ترکیب این دو مدل برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های جزر و مدی نتیجه‌ی قابل قبولی برای شبیه‌سازی خصوصیات کیفی آب خصوصاً در رودخانه‌های آلوده خواهد داشت (فن و همکاران[4]، ۲۰۰۹).

محرابی و همکاران[5] (۲۰۱۵)، با به‌کارگیری مدل QUAL2K، کیفیت آب رودخانه کین‌وارس شهر زنجان و پاسخ آن به راهبردهای مدیریت مواد مغذی را مورد ارزیابی قراردادند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد رودخانه مذکور از مواد مغذی چون نیتروژن و فسفر اشباع‌شده که می‌تواند موجب کاهش اکسیژن محلول آب گردد.

سنر و همکاران[6] (۲۰۱۷) کیفیت آب رودخانه بیوک مندرسی ترکیه (منتهی به دریای مدیترانه) بر اساس هفت متغیر آمونیاک، نیترات، نیتریت، مواد جامد معلق، فسفات، COD و BOD موردبررسی قرارداد و با توجه به طبقه‌بندی استاندارد کیفیت آب ترکیه، طبقه‌بندی کرد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده توصیه شد که برای اطمینان از بهبود کیفیت آب رودخانه باید یک نظارت مؤثر بر منابع آلاینده حوضه، ایجاد گردد تا بتواند دولت ترکیه را با پروتکل حمایت از دریای مدیترانه در برابر آلودگی از منابع زمینی تطبیق دهد.

خسروی نیا و همکاران[7] (۲۰۰۹) به بررسی کیفیت آب حوضه کارون در محدوده ملاثانی–فارسیات پرداختند. پارامترهای DO و BOD در ۱۵ بازه مختلف نمونه‌برداری و با مدل WASP شبیه‌سازی شدند. سپس عملیات واسنجی مدل به روش سعی و خطا انجام گردید. نتایج نشان داد که تطابق خوبی بین نتایج مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده وجود دارد. لذا نتیجه‌گیری کردند که از مدل WASP برای پیش‌بینی غلظت پارامترهای مذکور در رودخانه کارون می‌توان استفاده کرد.

چوئرسوان و همکاران[8] (۲۰۱۳) کیفیت رودخانه آب المتاخونگ پاکستان را با مدل QUAL2K شبیه‌سازی کردند. در این ۲۵ کیلومتر پساب صنایع نساجی، رستوران‌ها، هتل‌ها و پساب فاضلاب خانگی در رودخانه تخلیه می‌شود. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی مدل QUAL2K، حاکی از کارایی خوب این مدل در شبیه‌سازی متغیرهای کیفی بود.

عابدی کوپایی و همکاران[9] (۲۰۰۸) به بررسی امکان آلودگی آب زاینده‌رود اصفهان و آلودگی برخی از چاه‌های فلمن به سم دیازینون پرداختند. آب رودخانه زاینده‌رود در چند ایستگاه موردبررسی قرار گرفت و ازنظر کیفی طبقه‌بندی گردید.

---

[1] Rafiee et al
[2] Mathew et al
[3] Zhang et al
[4] Fan et al
[5] Mehrabi et al
[6] Sener et al
[7] Khosravi Nia et al
[8] Chuersuwan et al

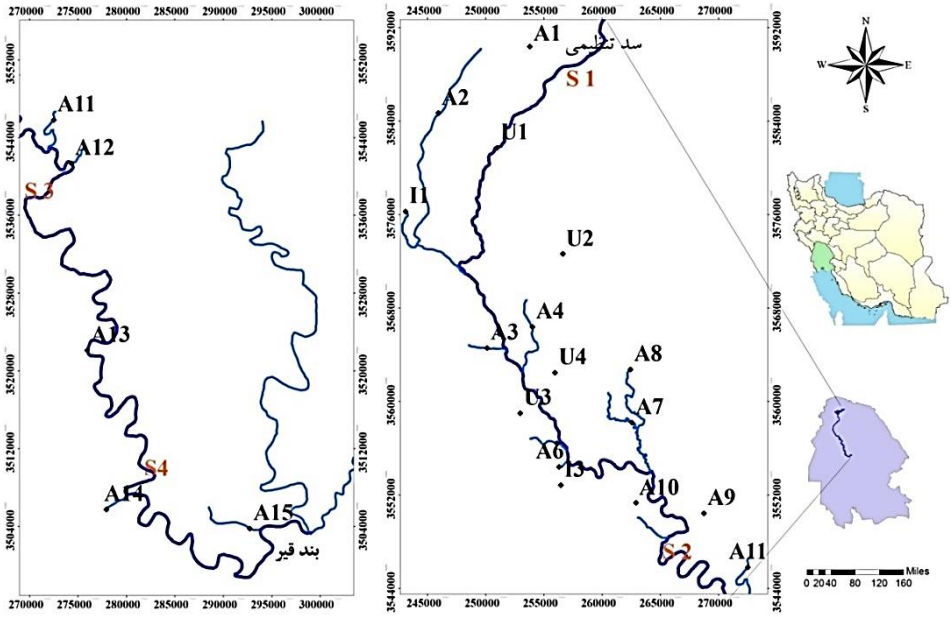
وارکار و همکاران[1] (۲۰۲۱) یک شبکه پایش کیفیت آب برای شبیه‌سازی آلودگی‌های غیر نقطه‌ای طراحی کردند. این روش با در نظر گرفتن هر دو منبع آلودگی نقطه‌ای و بازه ای، در تعیین مکان‌های بهینه و تعداد مکان‌های پایش که در آن تغییرات فصلی در طول سال‌های آزمایشی مشهود است، بسیار مفید است.

فن و همکاران[2] (۲۰۲۳) با ترکیب مدل‌های GEFC، QUAL2K و GIS یک رویکرد یکپارچه برای پهنه‌بندی شاخص کیفیت آب رودخانه پیشنهاد کردند تا بتواند نقاط بحرانی آلودگی در رودخانه را شناسایی کند و سطوح تصفیه موردنیاز را پیدا کند.

از دیگر تحقیقات درزمینه موضوع این تحقیق می‌توان به تحقیقات محمد و همکاران (۲۰۲۳)،، عزیز پور و همکاران (۲۰۲۱، ۲۰۲۲)،، مزرعه و همکاران (۲۰۲۳، ۲۰۲۴)،، رجبی و شعبانلو (۲۰۱۲)،، گرامی مقدم و همکاران (۲۰۱۹)،، غریب و همکاران (۲۰۲۰)،، شعبانلو (۲۰۱۸)،، عظیمی و همکاران (۲۰۱۶)،، و علیزاده و همکاران (۲۰۲۱) اشاره کرد.

روش پژوهش

رودخانه دز بعد از شاخه کارون یکی از بزرگ‌ترین و طویل ترین رودخانه های ایران و حوضه آبریز خلیج‌فارس و دریای عمان به شمار می‌آید که از دوشاخه اصلی به نام سزار و بختیاری تشکیل‌شده است. رودخانه دز پس از عبور از تنگ پنج و تنگ هفت و تله‌زنگ و پشت سر گذاشتن دریاچه سد دز، وارد جلگه خوزستان می‌شود. سپس با گذر از شهر دزفول و طی مسافت پرپیچ‌وخمی به طول تقریبی ۱۹۴ کیلومتر (دزفول- بندقیر)، در فاصله ۴۰ کیلومتری شمال شهرستان اهواز و در محلی به نام بندقیر با رودخانه شطیط و گرگر یکی شده و کارون بزرگ را تشکیل می‌دهند. طول رودخانه دز از سرچشمه تا محل تلاقی با کارون در حدود ۵۲۰ کیلومتر بوده و حوضه آبریز آن منطقه‌ای به وسعت ۲۲۵۰۰ کیلومترمربع را شامل می‌گردد. رودخانه دز به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های ایران به دلیل توسعه اراضی کشاورزی و کارخانه‌های صنعتی و همچنین مجاورت با شهرها پذیرای پساب‌های مختلف ناشی از زهکش‌های کشاورزی و شهری و صنعتی بوده که باعث شده وضعیت کیفیت و آلودگی در برخی از بازه‌های رودخانه به‌شدت تحت تأثیر قرار گیرد. به دلیل اهمیت این رودخانه در تأمین بخش وسیعی از مصارف مختلف دشت دز و نقش آن در تأمین نیاز زیست‌محیطی منطقه برای این تحقیق انتخاب‌شده است. لذا منطقه موردمطالعه قسمتی از رودخانه دز در بازه سد تنظیمی دزفول تا محل بند¬قیر انتخاب‌شده که در شکل (۱) نشان داده‌شده است. در این شکل، علامت‌های اختصاری S، A، U و I به ترتیب نشان‌دهنده محل ایستگاه‌های هیدرومتری و محل تخلیه پساب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی است.

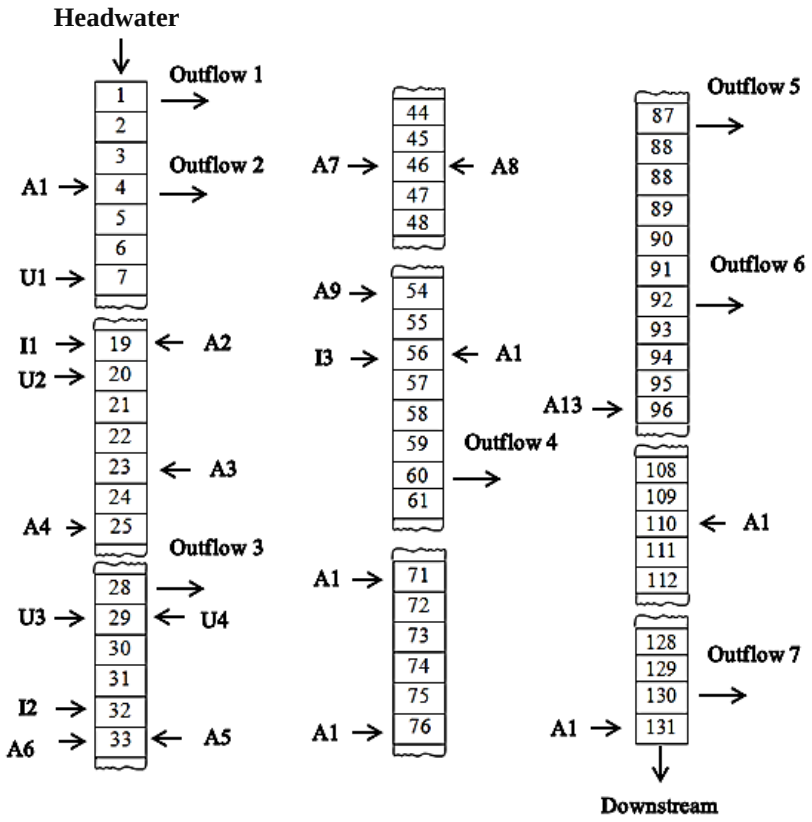


[9] Abedi Koupai et al
[1] Varekar et al
[2] Fan et al

شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی (الف- بازه سد تنظیمی تا ایستگاه آب شیرین ب- بازه ایستگاه حرمله تا ایستگاه بامدژ)

شبیه‌سازی کیفیت و آلودگی

مدل QUAL2Kw در سال ۲۰۰۶ توسط چاپرا[1] و همکاران توسعه یافت که درواقع ویرایش مدرنی از مدل Qual2e است (چاپرا و همکاران، ۲۰۰۶). مدل مذکور آخرین‌مدل از سری مدل‌های QUAL است که مورد تأیید سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا[2] (USEPA) بوده و به‌طور گسترده‌ای جهت شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها مورداستفاده قرارگرفته است (کانل و همکاران[3]، ۲۰۰۷). مدلQUAL2Kw رودخانه را به‌صورت یک‌بعدی (یک بعد در راستای طول رودخانه) همراه با جریان دائمی غیریکنواخت شبیه‌سازی می‌کند و می‌تواند اثر بارگذاری را هم به‌صورت نقطه‌ای و هم غیر نقطه‌ای در نظر بگیرد. در این مدل به‌منظور تعیین غلظت پارامترهای کیفی، از روش تفاضل محدود[4] برای حل عددی معادله جابجایی- پخش[5] استفاده می‌شود. در این تحقیق از مدل QUAL2KW برای شبیه‌سازی روند آلودگی و کیفیت در رودخانه دز استفاده شد. این مدل قادر است معادلات مربوط به رودخانه را هم در شرایط دائمی و هم شبه‌دینامیکی حل کند. همچنین پارامترهایی چون اکسیژن محلول، نیاز اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، دما، نیتروژن آمونیاکی و ... را در شبکه رودخانه شبیه‌سازی نماید (چاپرا و همکاران، ۲۰۰۶). در این مدل شبیه‌سازی کیفی بر اساس بازه‌بندی مسیر رودخانه انجام می‌شود. بازه‌بندی، متناسب با شرایط هیدرولیکی رودخانه و محل تخلیه آلاینده‌ها صورت می‌گیرد؛ بنابراین حدفاصل سد تنظیمی تا محل بندقیر به ۱۳۱ بازه با طول‌های متغیر تقسیم شد. بازه‌های رودخانه، محل ورود منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای و محل برداشت آب از رودخانه در شکل (۲) نشان داده‌شده است.



[1] Chapra
[2] United States Environmental Protection Agency
[3] Kannel et al
[4] Finite difference
[5] Advection-Diffusion

شکل ۲. بازه بندی رودخانه دز و جانمایی منابع نقطه‌ای ورودی و خروجی

در هر بازه مشخصات هندسی از قبیل شیب طولی کانال، شیب دیواره‌ها، شیب طولی رودخانه، رقوم ارتفاعی کف، عرض کف و غیره در محیط نرم‌افزار Auto CAD 2018 محاسبه و وارد مدل شد. مدل QUAL2Kw با فرض ذوزنقه‌ای بودن مسیر رودخانه و با استفاده از معادله مانینگ، عمق و سرعت جریان را محاسبه می‌کند (پلتیر و چاپرا[1]، ۲۰۰۸). بعد از بازه بندی، برخی اطلاعات دیگر موردنیاز مدل نظیر ضریب مانینگ با توجه به جنس زمین منطقه، بازدیدهای میدانی و اطلاعات مربوط به مقاطع رودخانه‌ای در حدود ۰/۰۳۳ انتخاب شد. منابع برداشت نقطه‌ای از رودخانه دز نیز در جدول (۱) نشان داده‌شده است.

جدول ۱. منابع برداشت نقطه‌ای از رودخانه دز

ردیف	معرف نقطه برداشت	برداشت آب	فاصله تا انتهای رودخانه (km)
۱	Outflow 1	کانال سبیلی	۱۹۳/۵
۲	Outflow 2	آبگیر شرقی و غربی	۱۸۸
۳	Outflow 3	هفت تپه	۱۵۵
٤	Outflow 4	میاناب	۱۲۱
۵	Outflow 5	امام خمینی	۸۰
٦	Outflow 6	شعیبیه	۷۲
۷	Outflow 7	دهخدا	۸

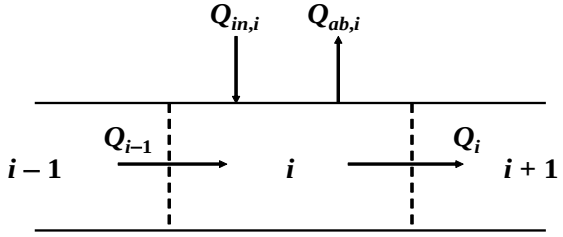
معادلات حاکم بر مدل‌سازی

رابطه بیلان جریان در مدل QUAL2Kw

در طول رودخانه، با فرض اختلاط کامل، برای هر المان موازنه جریان در حالت پایدار طبق رابطه زیر صورت می‌گیرد (چاپرا و همکاران، ۲۰۰۶):

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \quad (۱)$$

که در آن Q_i میزان جریان خروجی از بازه i، Q_{i-1} میزان جریان خروجی از بازه i-1، $Q_{in,i}$ جریان ورودی از تمامی منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به بازه i و $Q_{ab,i}$ جریان خروجی از تمامی منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای از بازه i است. شکل (۳) شماتیک بیلان جریان را نشان می‌دهد.

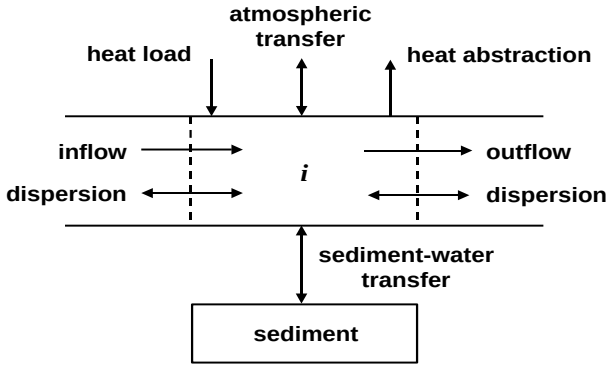


شکل ۳. بیلان جریان برای بازه i ام از رودخانه

[1] Pelletier r and Chapra

رابطه بیلان دما در مدل QUAL2Kw

یکی از پارامترهای مهم در شبیه‌سازی، میزان درجه حرارت در هر نقطه از رودخانه است. تغییرات درجه‌ی حرارت بر کیفیت آب رودخانه، میزان اکسیژن محلول، نرخ کاهش BOD و... تأثیرگذار است. عواملی که در تعیین میزان درجه حرارت مؤثرند، عبارت‌اند از: دمای اولیه آب رودخانه، دمای هوا، دمای سطح زمین و بستر رودخانه، دمای منابع ورودی نقطه‌ای یا غیر نقطه‌ای ورودی به رودخانه و غیره. عوامل مؤثر بر درجه‌ی حرارت و چگونگی موازنه‌ی آن برای بازه i، در شکل (۴) نشان داده‌شده است.



شکل ٤. بیلان دما برای بازه i ام از رودخانه

همچنین موازنه گرما در هر بازه از رابطه (۲) محاسبه می‌گردد (چاپرا و همکاران، ۲۰۰۶):

$$\frac{dT_i}{dt}=\frac{Q_{i-1}}{V_i}T_{i-1}-\frac{Q_i}{V_i}T_i-\frac{Q_{ab,i}}{V_i}T_i+\frac{E'_{i-1}}{V_i}(T_{i-1}-T_i)+\frac{E'_i}{V_i}(T_{i+1}-T_i)+\frac{W_{h,i}}{\rho_w C_{\rho w}V_i}\left(\frac{m^3}{10^6 cm^3}\right)+\frac{J_{h,i}}{\rho_w C_{\rho w}H_i}\left(\frac{m}{100cm}\right)+\frac{J_{s,i}}{\rho_w C_{\rho w}H_i}\left(\frac{m}{100cm}\right) \quad (۲)$$

در این رابطه:

Q: دبی (m^3/day)، T: درجه حرارت آب ($^{\circ}C$)، t: زمان (day)، V_i: حجم آب (m^3)، E': ضریب پخشیدگی حجمی بین بازه i و i+1 (m^3/day)، $W_{h,i}$: مقدار خالص حرارت دریافت شده از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به بازه i ام (cal/day)، ρ_w: چگالی آب (gr/cm^3)، C_{pw}: گرمای ویژه آب (cal/grc)، $J_{h,i}$: شار حرارت بین بازه i ام و هوا ($cal/cm^2.day$)، $J_{s,i}$: شار حرارت بین آب و رسوب ($cal/cm^2.day$)، H_i: عمق متوسط آب در بازه i ام در رودخانه (m) است.

رابطه بیلان جرم در مدل QUAL2Kw

یکی از اصول پایه در فرمول‌بندی مدل‌های کیفی آب، اصل تعادل جرم است. درواقع معادله اصلی که مدل مذکور به حل آن می‌پردازد، معادله جابجایی- پخش یک‌بعدی است که برای تمامی متغیرها به‌غیراز جلبک کف، از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\frac{dc_i}{dt}=\frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1}-\frac{Q_i}{V_i}c_i-\frac{Q_{ab,i}}{V_i}c_i+\frac{E'_{i-1}}{V_i}(c_{i-1}-c_i)+\frac{E'_i}{V_i}(c_{i+1}-c_i)+\frac{W_i}{V_i}+S_i+\frac{E'_{hyp,i}}{V_i}(c_{2,i}-c_i) \quad (۳)$$

W_i بار وارده آلاینده به شاخه (g/day)، S_i منابع ورود و خروج آلاینده ($g/m^3/day$)، C_i: غلظت جزء کیفی در آب رودخانه و $c_{2,i}$ غلظت جزء کیفی در منطقه رسوب هایپرهئیک است. سایر اجزاء در روابط قبل، تعریف‌شده‌اند لذا از تکرار آن‌ها خودداری می‌شود.

معرفی منابع آلاینده عمده رودخانه دز و پارامترهای شبیه‌سازی‌شده

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع آب‌های سطحی قادرند مواد آلاینده‌ای که به‌صورت تصفیه‌شده یا نشده وارد آن‌ها می‌شوند را پایش کنند. فاضلاب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی با ویژگی‌های کیفی متفاوت، ازجمله مهم‌ترین منابع آلاینده‌ای هستند که همواره کیفیت آب رودخانه را تهدید می‌کنند. اگر مقادیر غلظت و میزان تخلیه فاضلاب‌های ورودی به رودخانه‌ها از حد معین و استاندارد مجاور فراتر رود، آب سطحی قادر به تصفیه آن نخواهد بود و تهدیدهای جدی‌تری را برای اکوسیستم به بار خواهد آورد. در ذیل به معرفی انواع این منابع آلاینده پرداخته‌شده است:

الف) آلودگی‌های ناشی از فاضلاب‌های شهری

فاضلاب‌های شهری با توجه به ویژگی‌های فرهنگی، عادات غذایی، کیفیت آب مصرفی و همچنین شرایط آب و هوایی و فرآیند تصفیه حاوی مقادیر بالای BOD و COD، عناصر غذایی (N) و میکروارگانیسم‌های بیماری‌زا (باکتریایی و انگلی) آب می‌باشند. این فاضلاب‌ها شامل فاضلاب انسانی و مصارف خانگی و اماکن عمومی، حمام، بیمارستان‌ها، مؤسسات و ادارات و همچنین رواناب ناشی از شستشوی سطح معابر و خیابان‌ها براثر بارندگی می‌باشند که در بیشتر موارد مستقیماً و بدون تصفیه وارد آب رودخانه می‌شوند. منابع آلاینده شهری عمده در محدوده مطالعه شامل فاضلاب شهرهای دزفول، صفی‌آباد، حر و میانرود است که در حاشیه رودخانه دز واقع‌شده‌اند و فاضلاب خود را به شاخه دز تخلیه می‌کنند. دفع فاضلاب مابقی شهرک‌ها و روستاهای دشت از یا طریق سیستم چاه جذبی و سپتیک انجام می‌شود و یا به شاخه‌های فرعی رودخانه (مانند بالارود و کهنک) تخلیه می‌گردد.

ب) زه آب‌های کشاورزی

توسعه کشاورزی و لزوم تهیه مواد غذایی براثر افزایش جمعیت مستلزم آبیاری وسیع است. لذا پس از آبیاری مقادیر زیادی زه‌آب سطحی و یا زیرزمینی از مزرعه خارج می‌شود. زه آب‌های کشاورزی وابسته به کیفیت آب مصرفی، نوع و راندمان سامانه آبیاری، نوع سامانه زهکشی، میزان مصرف نهاده‌های کشاورزی، نوع و ویژگی‌های خاک و همچنین شرایط اقلیمی منطقه است. مشخصه اصلی زه آب‌های کشاورزی دارا بودن EC بالا، وجود عناصر مغذی (N و P) در غلظتی قابل‌توجه و همچنین وجود بقایای سموم و آفت‌کش‌ها و در درجه‌های کم‌تر، عوامل میکروبی است.

اطلاعات مربوط به کیفیت و آلایندگی زهکش‌های کشاورزی که در رودخانه دز تخلیه می‌شوند از آزمایشگاه امور آب سازمان آب و برق خوزستان اخذ شد. بر اساس این اطلاعات، زه‌آب اراضی کشاورزی دشت دز شرقی و غربی، پساب اراضی نیشکر هفت‌تپه، نیشکر میاناب، نیشکر امام خمینی، نیشکر شعیبیه و بخشی از پساب نیشکر کارون که بخش وسیعی از اراضی منطقه را دربر دارند، توسط ۱۵ زهکش ب صورت نقطه-ای وارد رودخانه می‌شود.

ج) فاضلاب‌های صنعتی و پرورش‌ماهی

فاضلاب‌های صنعتی با دامنه تغییرات کیفی وسیع، نقش مهمی در آلایندگی منابع آب دارند. مصرف آب در اغلب صنایع زیاد است به‌طوری‌که کارخانه‌های مختلف نظیر مجتمع هفت‌تپه، کاغذسازی پارس و پرورش ماهی آن‌هم در نزدیکی منابع آب، از یک‌سو با بهره‌برداری از آب رودخانه و از سوی دیگر با برگشت آب آلوده به منبع آبی مقادیر زیادی BOD و COD را به رودخانه دز تخلیه می‌نمایند. ته‌نشینی مقادیر زیادی مواد جامد معلق در رودخانه و افزایش تیرگی و کدورت آب و همچنین افزایش املاح و مواد شیمیایی و سمی و روغنی و نفتی باعث تغییر در طعم، بو، رنگ آب می‌گردند. در جدول (۲) این آلاینده‌ها به تفکیک معرفی‌شده‌اند.

جدول ۲. منابع آلاینده نقطه‌ای ورودی به رودخانه دز (منبع: سازمان آب و برق خوزستان)

فرم آلاینده ورودی	معرف آلاینده	منبع آلایندگی	فاصله تا انتهای رودخانه (km)
زهکش کشاورزی	A1	لور	۱۸۹
	A2	سبز آب	۱۷۰/۲۳
	A3	بنه حسن	۱۶۲/۳۶
	A4	ساغری	۱۶۰/۵۲
	A5	هفت‌تپه (٦)	۱٤۹/٤۳

	A6	هفت‌تپه (۸)	۱٤۹
	A7	سلیمه	۱۳۸/٤۱
	A8	عجیرب	۱۳۸
	A9	تاپ درین	۱۳۰/۵
	A10	عتیج	۱۲۸/۵
	A11	کهنک- لوره	۱۰۹/۷۷
	A12	کارون	۱۰٤/۹
	A13	میاناب	٦٦/۲
	A14	خارور	۳۹
	A15	شعیبیه	٦
فاضلاب شهری	U1	دزفول	۱۸۵/۱
	U2	صفی‌آباد	۱٦۸
	U3	حر	۱۵٤/۱
	U4	میانرود	۱۵۳/۲
فاضلاب صنعتی	I1	پرورش ماهی	۱۷۰/۵
	I2	مجموع کارخانه‌های هفت‌تپه	۱۵۰
	I3	کاغذسازی پارس	۱۲۷/۵

پارامترهای شبیه‌سازی‌شده شامل دما، هدایت الکتریکی آب (EC)، PH، اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن موردنیاز بیولوژیکی (BOD)، نیتروژن نیتراتی ($N\text{-}NO_3$) و نیتروژن آمونیاکی ($N\text{-}NH_4$) است. میانگین مقدار پارامترهای مذکور برای تمامی منابع آلاینده تخلیه‌شده به رودخانه دز طی دوره‌ی آماری در جدول (۳) آورده شده است.

جدول ۳. میانگین پارامترهای شبیه‌سازی‌شده منابع نقطه‌ای ورودی به رودخانه دز در تیرماه طی دوره‌ی آماری (۹۳-۸۷) (منبع: سازمان آب و برق خوزستان)

منبع آلایندگی	دبی	T	EC	pH	DO	Fast BOD	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$
	m3/s	°C	umhos	-	mg/L	mgO2/L	ugN/L	ugN/L
لور	۱/۳	۱٦	٦۹۷	۷/۸	۸/۵	۳/۸٦	۱٦۳۸	٤۰۰
سبز آب	۳	۲٤	۷۸۷	۷/۷	۸/۱	٤/۲	۲۷٤۵	۵۵۷
بنه حسن	۱/۳	۲٦	۷۷۸	۷/۸	۸/۷	۳/۲	۱٦۸۳	۲۳۹
ساغری	۵/۵	۲۳	۷۰۸	۷/٤	۷/٦	۳/۷	۲۵۹٦	٦٦۹
هفت‌تپه (٦)	۱/۳	۲٦	۱۲۸۱	۷/٦	۷/٦	۲/۸	۲۲۳۰	۱۲٤
هفت‌تپه (۸)	۱/۵	۲۵	۱۵٤۵	۷/۵	٦/۰٦	۱/۷	۱۹۲۰	٦۵۰
سلیمه	٤/۲	۲٤	۷٤۷	۷/۵	٦	۲/۷	۲۵۲٤	٦٦۰
عجیرب	۱۰/۰۵	۲٤	۷۸۹	۷/۳	٦/٦	۲/۹	٤٦۹۰	٦٦۰
تاپ درین	۱/۲	۲٦	۸۸۸	۷/۵	۷/٤	٤	۳۸۸٤	۱۵۸
عتیج	۲/۲۵	۲۵	۱۲٤۲	۷/۷	٦/۸٦	۳	۱۹۲۰	۷۳۸

کهنک- لوره	۱۹/۳	۲۵	۲٦۰۸	۷/۷	٦/۷۱	٤/٤۵	۳۸٦٤	۸۲۳
کارون	۱۰	۲٦	۳۰۸۰	۷/۸	۷/۷	۳/۹	۱۷٦۵	۸۲۳
میاناب	۳/۵	۲۹	۳۳۱۰	۷/۵	۳/۱٤	۲/۸٦	۲۱۸۰	۵۵۷
خارور	۲/۵	۳۱	٤۹۵۲	۷/۹	۳/٤۹	۲/۰۳	۲۹٤۰	۸۵۷
شعیبیه	۱۱	۲۷	۵۰۲۰	۷/۸	۸/۵۸	٤/۹۸	۲٦۵۰	۱۱۵۰
دزفول	۲/٤٤	۲۸	۱۷۵۰	۷/٤	۱	۱۱۳/۵	۱۷۵۰	۱٤٦٦۵
صفی‌آباد	۰/۰٤	۲٤	۱۷۵۰	۷/٤	۵	۲۰/۸	۳۱٦	۳۰٤٤
حر	۰/۰٤	۲٤	۱۷۵۰	۷/٤	۵	۲۳/۸	۳٦۲	۳٤۵٦
میانرود	۰/۰۵	۲٤	۱۷۵۰	۷/٤	۵	۲۳/۸	۳٦۲	۳٤۵٦
پرورش ماهی	۷/۲	۲٤	۱۷۰۰	۷	۰/۹۷	۲۲	٤٦۸۸	۳۵۰
کارخانه هفت‌تپه	۱/۸	۲٦	۱۸۰۰	٦/۹	٤	۱۱٤	٤٤۷	۱۲٤
کاغذ پارس	۰/٦۳	۲۸/۵	۱٤۵۰	٦/۸	۱	۲۵۰	۲۲٦٦	۱۳۰۰

کیفیت آب رودخانه‌ها

در جدول (۴) غلظت متغیرهای کیفی آب رودخانه در چهار گروه مختلف آورده شده است. در این دسته‌بندی، گروه یک (1A، 1B) نشانگر کیفیت مناسب آبی است که برای کلیه کاربردهای عمومی مناسب است و گروه چهار بدترین کیفیت آب را نشان می‌دهد که برای اغلب کاربردها نامناسب است. با توجه به شرایط اقلیمی و اقتصادی ایران، می‌توان کیفیت آب گروه ۲ را برای اغلب رودخانه‌ها توصیه نمود (کارآموز و کراچیان،۱۳۹۳). در این تحقیق، استاندارد منتخب با توجه به استاندارد ملی ایران و گروه‌های 1B و 1A انتخاب شد.

جدول ٤. نمونه‌ای از توصیه‌های موجود برای کیفیت آب رودخانه‌ها (کرنکل و نواتنی[1])

پارامتر	واحد سنجش	گروه‌های مختلف				استاندارد ملی		استاندارد منتخب
		1A	1B	2	3	4		
دما	°C	<=۲۰	۲۰-۲۲	۲۲-۲۵	۲۵-۳۰	> ۳۰	< ۲۱	1B
PH	-	٦/۵-۸/۵	٦/۵-۸/۵	٦/۵-۸/۵	۵/۵-۹/۵	۹/۵ < یا ۵/۵>	۷/۵	1B
EC	umhos	<=٤۰۰	٤۰۰-۷۵۰	۷۵۰-۱۵۰۰	۱۵۰۰-۳۰۰۰	> ۳۰۰۰	< ۵۰۰	استاندارد ملی
DO	mg/l	> ۷	۵-۷	۳-۵	–	< ۳	> ۷	1A
BOD_5	mg/l	<=۳	۳-۵	۵-۱۰	۱۰-۲۵	> ۲۵	< ۱۰	2
NO_3	mg/l	–	<=٤٤	–	٤٤-۱۰۰	> ۱۰۰	< ٤٤	استاندارد ملی
NH_4	mg/l	<=۰/۱	۰/۱-۰/۵	۰/۵-۲	۲-۸	> ۸	< ۰/۵	1B

واسنجی مدل

در مرحله واسنجی پس از ورود اطلاعات هیدرولیکی، هواشناسی و کیفی، مدل برای چهار سال آماری، تیرماه (فصول کم‌آبی) سال ۸۷ تا ۹۰ اجرا شد و سپس مقادیر محاسباتی توسط مدل با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید. با توجه به وجود برخی اختلاف مقادیر لازم است تا مدل

[1] Krenkel and Novotny

واسنجی گردد. به‌عبارت‌دیگر هدف از واسنجی، حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی‌شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی است و این کار ممکن است به‌وسیله اندازه‌گیری دقیق پارامترها و یا به‌وسیله روش‌های بهینه‌سازی انجام شود. معمولاً اختلافاتی میان شکل خروجی مدل و فیزیک سیستم واقعی موردمطالعه وجود دارد که لازم است با تغییر و تخمین برخی پارامترها و ضرایب، دقت مقادیر حاصل از مدل را افزایش و برازش خوبی بین خروجی مدل و مشاهدات ثبت‌شده ایجاد نمود. ایده آل، آن است که مدل تا حد امکان واقعیت را منعکس کند. به‌طورمعمول دو روش عمومی واسنجی که در اکثر مدل‌ها بکار می‌رود به شرح زیر است.

۱-واسنجی مدل به‌وسیله آزمون‌وخطا (روش دستی)

۲-واسنجی مدل به‌صورت خودکار (سیستمی)

درروش اول، کاربر تمام پارامترهایی را که می‌تواند بر اساس مشاهدات فیزیکی انجام دهد وارد کرده و تخمینی از پارامترهای ناشناخته را به‌عنوان برآورد اولیه انجام می‌دهد. سپس مدل اجرا می‌شود و خروجی آن با مقادیر مشاهده‌شده مقایسه می‌گردد. این کار تا بهترین تطبیق این دو خروجی ادامه می‌یابد. این روش در مدل QUAL2Kw توسط تنظیم پارامترهای مختلف در کاربرگ Rates انجام می‌گیرد. پس از تغییرات دستی پارامترها و ضرایب مدل به‌صورت سعی و خطا و اجرای مکرر مدل ادامه می‌یابد، نهایتاً پس از نزدیک شدن محاسبات به مشاهدات مقادیر نهایی پارامترهای واسنجی به‌عنوان بهترین مقادیر در مرحله واسنجی پذیرفته می‌شوند.

درروش دوم، مدل QUAL2Kw با استفاده از روابط آزمون Fitness، فاصله نتایج مشاهداتی و نتایج محاسباتی را حداقل می‌نماید که رابطه میانگین مربعات خطا (RMSE) جزء کاربردی‌ترین روابط برای این برازش است (پلیتیر و همکاران [1] ، ۲۰۰۵). آنگاه از نتیجه این برازش در الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون خودکار مدل استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک یکی از تکنیک‌های مقایسه‌ای برای فرآیندهای انتخاب به‌صورت تکاملی و تدریجی است (گلدبرگ[2]، ۱۹۸۹). در این تحقیق از روش واسنجی دستی استفاده شد، بدین‌صورت که برای داده‌های هرسال واسنجی ابتدا به‌صورت جداگانه انجام و درنهایت ضرایب واسنجی که برای تمامی چهار سال مذکور مشترک است، به دست آمد.

صحت‌سنجی مدل

در مرحله صحت‌سنجی با در اختیار داشتن یک یا چند سری دیگر از داده‌های اندازه‌گیری شده و با توجه به تخمین پارامترها و ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله واسنجی و بدون تغییر آن‌ها مدل را بار دیگر با سری جدید اطلاعات اجرا می‌شود تا میزان نزدیکی و خطا میان محاسبات و مشاهدات اندازه‌گیری گردد. چنانچه واسنجی پارامترهای مدل به‌خوبی انجام‌شده باشد در مرحله صحت‌سنجی مدل پاسخگوی هرگونه تغییر در مقدار پارامترهای ورودی به مدل خواهد بود.

صحت‌سنجی مدل کیفی برای تیرماه سال‌های ۹۱ تا ۹۳ اجرا شد و برای ارزیابی هر یک از پارامترهای شبیه‌سازی‌شده، از ضرایب همبستگی (r)، مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) و پارامتر نش (NASH) استفاده گردید.

$$r = \frac{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)(Y_p - \bar{Y}_p)}{\sqrt{\sum (Y_m - \bar{Y}_m)^2 \sum (Y_p - \bar{Y}_p)^2}} \quad (۴)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(Y_m - Y_p)^2}}{X_{max} - X_{min}} \quad (۵)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}(Y_m - Y_p)^2}{\sum_{t=1}^{n}(Y_m - \bar{Y}_p)^2} \quad (۶)$$

که در آن Y_m مقدار مشاهداتی، $\bar{Y}_m$ میانگین مقادیر مشاهداتی، Y_p مقدار پیش‌بینی‌شده، $\bar{Y}_p$ میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده، X_{max} و X_{min} به ترتیب بیشترین و کمترین مقدار مشاهداتی است. در پارامترهای شبیه‌سازی‌شده هرچه میزان ضریب همبستگی و آماره نش به یک و مجذور میانگین مربعات خطا نرمال‌شده به صفر نزدیک‌تر باشد، نتایج مدل از اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود.

[1] Pelletier et al
[2] Goldberg

تحلیل حساسیت مدل

تحلیل حساسیت مدل برای اینکه پارامترهای کیفی که مدل QUAL2Kw به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد مشخص شود انجام شد. این آنالیز برای ۷ پارامتر و بر اساس میزان حساسیت چند پارامترها به تغییرات اکسیژن محلول سنجیده شد برای این کار با افزایش یا کاهش ۲۰ درصدی اکسیژن و ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها میزان حساسیت مدل بر اساس تغییرات پارامترهای کیفی شبیه‌سازی‌شده سنجیده شد.

یافته‌ها

مدل QUAL2Kw برای پارامترهای کیفی و آلودگی شامل دما، PH، هدایت الکتریکی (EC)، اکسیژن محلول (DO)، نیاز اکسیژن خواهی بیولوژیکی (BOD)، نیتروژن نیتراتی (N-NO3) و نیتروژن آمونیاکی (N-NH4) واسنجی و صحت‌سنجی شد. بدین‌صورت که ابتدا تمامی داده‌های هیدرولیکی، هواشناسی و کیفی وارد مدل شد. سپس مدل برای تیرماه سال‌های ۸۷ تا ۹۰ واسنجی شد. ضرایب واسنجی در هر بار اجرای مدل تغییر داده شدند تا آنجا که خروجی مدل با داده‌های مشاهداتی در ۵ ایستگاه پایش کیفی بسیار نزدیک گردید. در مرحله صحت سنجی، مدل با استفاده از سری دوم داده‌های مشاهداتی (تیرماه سال‌های ۹۱ تا ۹۳) و بدون تغییر دادن ضرایب واسنجی شده مجدداً اجرا گردید. این ضرایب که به‌صورت دستی تغییر داده می‌شد ضرایب نهایی در نظر گرفته شدند که در جدول (۵) نشان داده‌شده‌اند.

جدول ۵. ضرایب واسنجی مدل کیفی QUAL2Kw در رودخانه دز

پارامتر	مقدار	واحد	حد بالا	حد پایین
ISS Settling velocity	0.2	mg/day	0	2
Fast CBOD Oxidation rate	0.05	1/day	0	5
Organic N Settling velocity	0.025	mg/day	0	2
Organic N Hydrolysis	0.05	1/day	0	5
Ammonium Nitrification	1.25	1/day	0	10
Nitrate Denitrification	0.6	1/day	0	2
Sed denitrification transfer coeff	0.2	mg/day	0	1

جدول (۶)، نتایج حاصل از صحت‌سنجی، بر اساس آماره‌های ضریب همبستگی، مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده و آماره نش را نشان می‌دهد. بر اساس پارامترهای ذکرشده، هر چه مقدار آماره‌های r و Nash به یک و NRMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل دقت بیشتری خواهد داشت.

جدول ٦. مقدار آماره‌های آزمون در مرحله صحت‌سنجی

پارامترها	دما	PH	EC	DO	Fast CBOD	$N\text{-}NO_3$	$N\text{-}NH_4$
r	۰/۹۷	۰/۹۹	۰/۹۸	۱	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۳
NRMSE	۰/۰۹	۰/۳	۰/۱	۰/۰٤	۰/۰٤	۰/۱۱	۰/۲

NASH	۰/۹٤	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۹	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۳

بر اساس آنچه گفته شد و اعداد جدول فوق، می‌توان نتیجه گرفت که مدل کیفیت آب QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی و آلودگی برای رودخانه دز، از دقت بالایی برخوردار است.

نتایج تحلیل حساسیت مدل QUAL2Kw

در جدول (۷) پارامترهای کیفی که مدل QUAL2Kw به آن‌ها حساسیت بیشتری دارد مشخص گردیده است. این آنالیز بر اساس میزان حساسیت چند پارامترها به تغییرات اکسیژن محلول سنجیده شد. این آنالیز برای هفت پارامتر انجام گردید که از این میان با افزایش یا کاهش ۲۰ درصدی اکسیژن و ثابت نگه‌داشتن دیگر پارامترها میزان حساسیت مدل سنجیده شد.

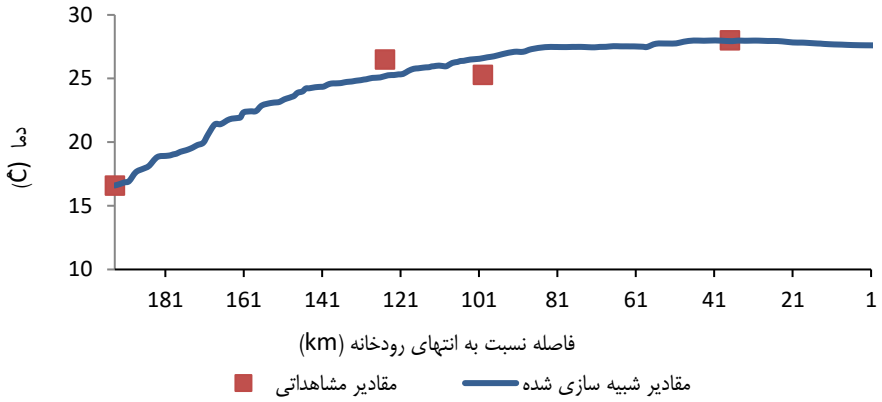
جدول ۷. تحلیل حساسیت مدل کیفی QUAL2Kw برای رودخانه دز

PARAMETER	Description	DO Change (%)	
		+20% Parameter	-20% Parameter
Q	River flow	2.89	-3.39
q	Point source flow	-2.1	2.63
k_{dc}	Fast CBOD oxidation rate	-0.54	1.75
k_{na}	Nitrification rate	-1.24	1.6
n	Manning coefficient	-0.45	0.91
CBOD	Point sources CBOD	-0.72	0.78
k_{dn}	Denitrification rate	0.67	-0.6

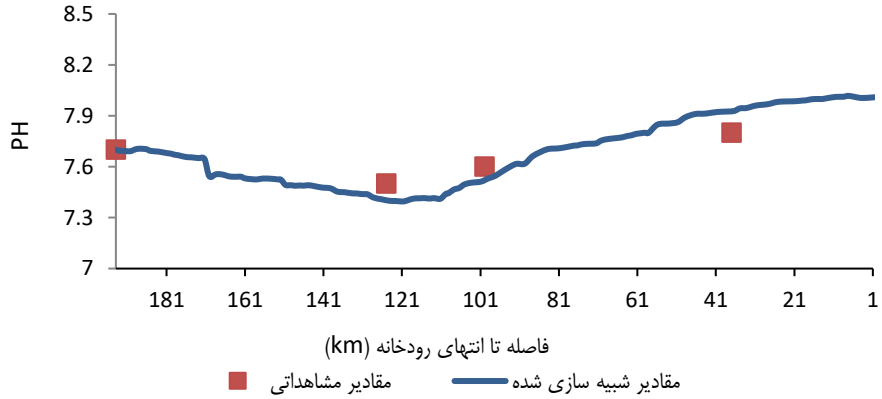
مشخص شد که مدل بیشترین حساسیت را به میزان جریان، نقاط ورود منابع آلودگی، نیاز اکسیژن بیولوژیکی و سرعت نیتریفیکاسیون داراست.

نتایج حاصل از شبیه‌سازی کمی-کیفی

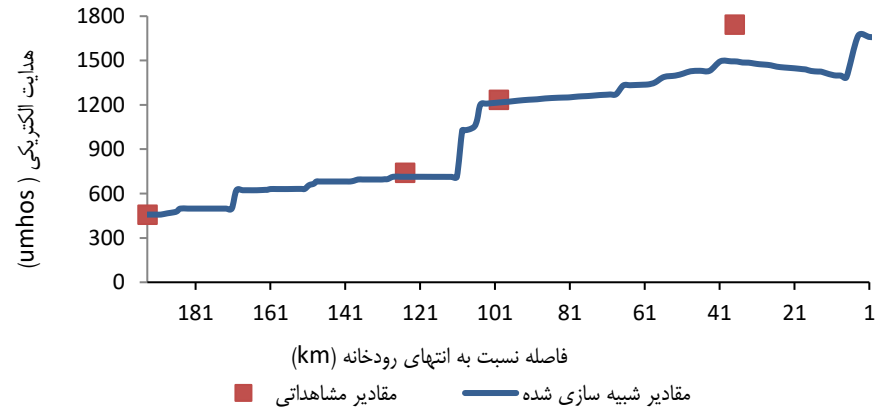
با استفاده از ضرایب واسنجی شده می‌توان برای مدل‌سازی کیفی رودخانه دز از هر سری داده‌های تخمینی مربوط به منابع آلاینده ورودی به رودخانه در هرزمانی استفاده نموده و تغییرات کیفیت و آلودگی رودخانه را در هر نقطه از آن برای آینده پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از اجرای مدل QUAL2Kw، برای پارامترهای کیفی در طول رودخانه دز، در شکل‌های (۵) تا (۷) نشان داده‌شده است. از سرشاخه به سمت انتهای رودخانه، به ترتیب از مقادیر ثبت‌شده در ایستگاه‌های دزفول، آب شیرین، حرمله و بام دژ به‌عنوان مقادیر مشاهداتی استفاده گردید همان‌طور که از نمودارها مشخص است، بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل QUAL2Kw و مقادیر مشاهداتی در ایستگاه‌های پایش کیفی، اختلاف ناچیزی وجود دارد. به دلیل تخلیه منابع آلاینده نقطه‌ای با دماهای متفاوت، میزان دمای آب انتهای رودخانه نسبت به سرشاخه افزایش‌یافته است. مقدار PH نیز بین بازه ۸/۸-۷ تغییر می‌کند که با توجه به استاندارد کیفیت آب رودخانه‌ها قابل‌قبول است. پارامتر هدایت الکتریکی در طول مسیر رودخانه بخصوص در دونقطه تخلیه شاخه کهنک به رودخانه دز و تخلیه زه‌آب اراضی طرح نیشکر امام‌خمینی و شعیبیه توسط زهکش شعیبیه در نزدیکی بند قیر سیر صعودی دارد.



شکل ۵. شبیه‌سازی دما در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)



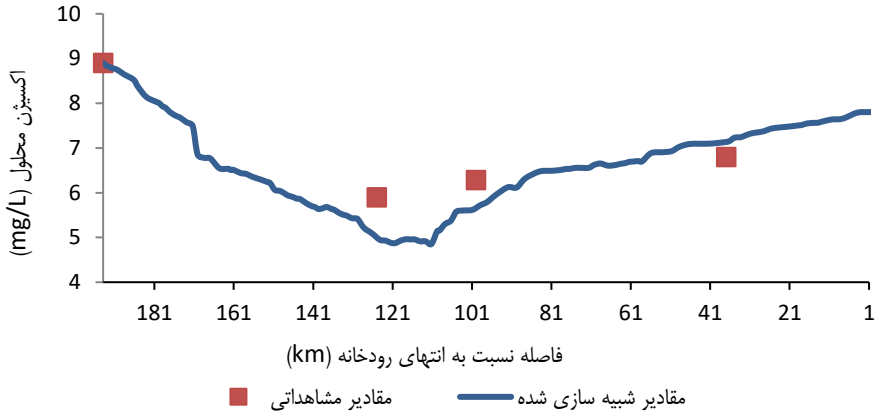
شکل ٦. شبیه‌سازی پارامتر PH در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)



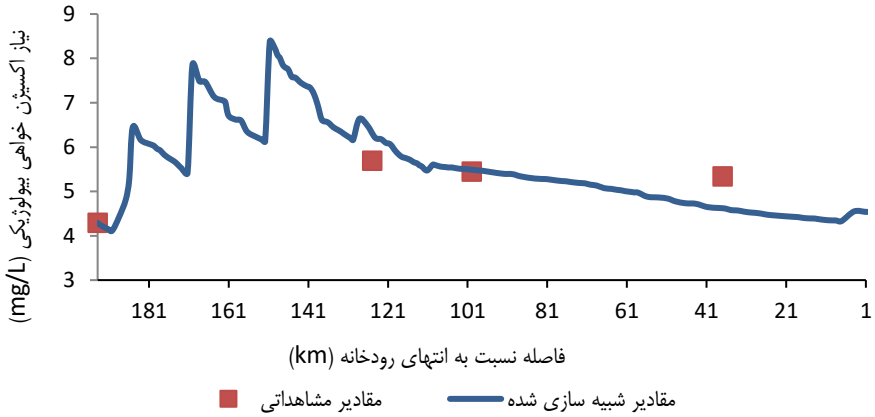
شکل ۷. شبیه‌سازی پارامتر EC در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)

همچنین نتایج حاصل از اجرای مدل QUAL2Kw، برای پارامترهای آلودگی در طول رودخانه دز، در شکل‌های (۸) تا (۱۱) نشان داده‌شده است. در نیمه ابتدایی رودخانه، به دلیل تخلیه متوالی فاضلاب شهر دزفول، پساب پرورش ماهی، مجتمع هفت‌تپه و کارخانه کاغذسازی پارس (به ترتیب در کیلومترهای ۱۸۵، ۱۷۰، ۱۵۰ و ۱۲۷) با BOD بالا و از سوی دیگر کاهش قابل‌ملاحظه دبی به دلیل برداشت آب توسط دو آبگیر بزرگ شرقی و غربی، رودخانه ازنظر میزان BOD در شرایط بحرانی قرار دارد که همین امر موجب کاهش اکسیژن محلول نیز گردیده است. باوجوداینکه تخلیه زهکش‌های کشاورزی چون میاناب، خارور، شعیبیه و گسترش اراضی طرح نیشکر امام خمینی و شعیبیه در مجاورت رودخانه باعث افزایش میزان نیتروژن نیتراتی در طول رودخانه شده است اما مغایرتی با استانداردهای مربوطه ندارد. مقدار نیتروژن آمونیاکی در برخی از

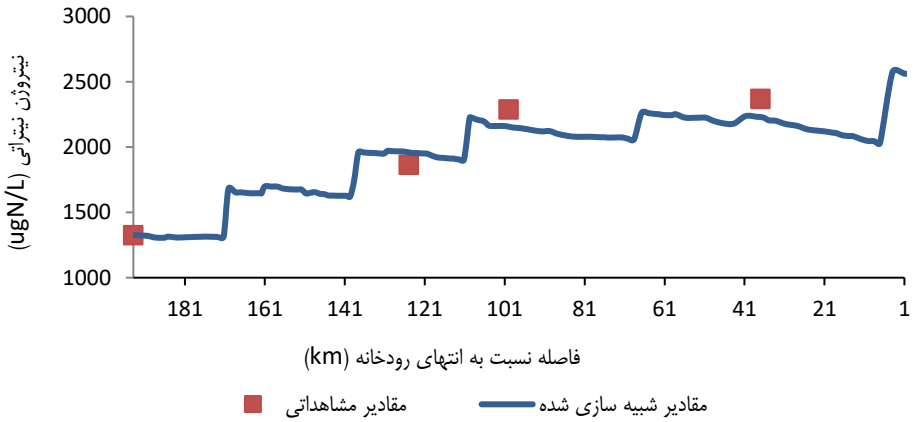
بازه‌های رودخانه بخصوص پایین‌دست نقاط تخلیه فاضلاب‌های شهری، تخلیه رودخانه کهنک و زهکش‌های کشاورزی نیمه انتهایی رودخانه، از حدود استاندارد مجاز رودخانه‌ها فراتر رود.



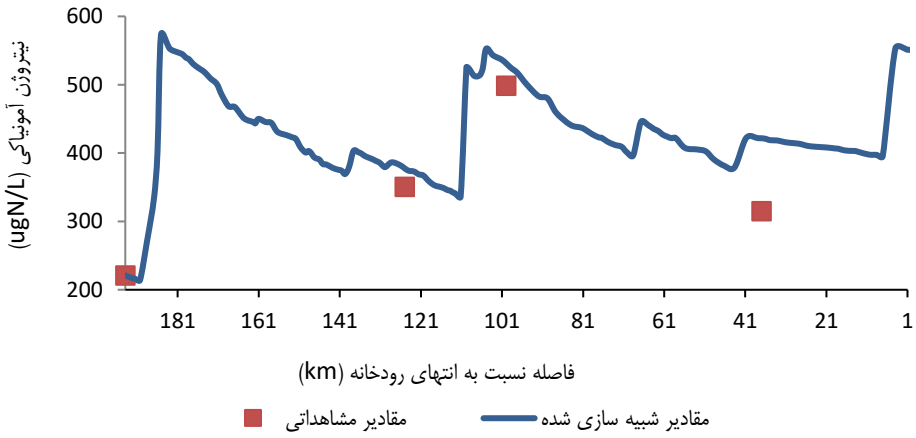
شکل ۸. شبیه‌سازی پارامتر DO در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)



شکل ۹. شبیه‌سازی پارامتر BOD در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)



شکل ۱۰. شبیه‌سازی پارامتر N-NO3 در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)



شکل ۱۱. شبیه‌سازی پارامتر N-NH4 در طول رودخانه دز (تیرماه ۱۳۹۰)

بحث

پژوهش حاضر با اهداف بررسی روند کیفیت و آلودگی رودخانه دز به سبب تخلیه آلاینده‌های شهری، صنعتی و کشاورزی، تعیین بازه‌های بحرانی ازنظر شدت آلایندگی در طول مسیر رودخانه با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام شد. در مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل مشخص شد، پارامترهای گسترده‌ای مانند خصوصیات هندسی جریان، شرایط هیدرولیکی رودخانه، میزان جریان آب، ضرایب هوادهی، نقاط ورودی آلاینده‌ها، نرخ نیتریفیکاسیون، اکسیژن خواهی و ... در رودخانه در نتایج مدل‌سازی کیفی دخالت دارند. رفیعی و همکاران (۲۰۱۳) با مدل نمودن کیفی آب رودخانه گرگر به برخی از این پارامترها اشاره‌کرده و به نتایج مشابهی دست یافتند. نتایج نشان داد در طول رودخانه دز، بازه حمیدآباد (ورودی شاخه بالارود) تا ایستگاه حرمله به علت تراکم بالای ورود انواع زهکش‌ها و آلاینده‌های صنعتی و کشاورزی بالاترین مقادیر پارامترهای آلودگی و کیفی را داراست و تا ایستگاه بامدژ به علت افزوده شدن چند منبع آلودگی دیگر مقادیر برخی از پارامترها به‌تدریج نیز افزایش می‌یابد. به دلیل انحراف حجم گسترده‌ای از آب رودخانه توسط کانال‌های غربی و شرقی بند انحرافی دزفول (با حداکثر ظرفیت ۱۵۷ و ۹۲ مترمکعب بر ثانیه) و توزیع آن روی دشت‌های غربی و شرقی، سپس تراکم ورود بیش از ۱۰ منبع آلاینده کشاورزی و صنعتی در حدود طول ۶۰ کیلومتر از رودخانه و دیگر نقاط آلاینده در ادامه رودخانه، موجب کاهش کیفیت آب در حدود ۱۶۰ کیلومتر بازه انتهایی دز می‌گردد. با توجه به اینکه این رودخانه به‌عنوان یک منبع آب پاک و پالایش کننده آب رودخانه کارون پس از الحاق به آن به شمار می‌رود لذا کنترل کیفی آن از این جنبه نیز بسیار مهم است.

نتیجه‌گیری

احداث تصفیه‌خانه به‌عنوان یک راهکار برای تمامی منابع آلاینده امری پرهزینه و غیرممکن به نظر می‌رسد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود تمامی فاضلاب شهر دزفول، پساب پرورش ماهی، مجتمع هفت‌تپه و کارخانه کاغذسازی پارس تصفیه و سپس تخلیه گردند اما در خصوص زهکش-های کشاورزی اقدامات اصلاحی مانند اصلاح در نوع سیستم‌های آبیاری، کودهای مصرفی، الگوی کشت منطقه و غیره در مبدأ صورت گیرد.

روند تغییرات پارامترهای کیفی و آلودگی در رودخانه دز نشان داد که این رودخانه ازنظر آلایندگی BOD به دلیل تخلیه فاضلاب های شهری و صنعتی، ازنظر آلایندگی EC به سبب تخلیه زهکش اراضی کشاورزی (عمدتاً طرح نیشکر) و ازنظر آلایندگی N-NH4 به علت فاضلاب های شهری، صنعتی و زه آب اراضی کشاورزی در شرایط بحرانی قرار دارد. بر اساس آماره‌های آزمون محاسبه‌شده در مرحله صحت‌سنجی، می‌توان نتیجه گرفت که مدل کیفیت آب QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی و آلودگی در رودخانه دز از دقت بالایی برخوردار است. لذا پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از مدل کیفی واسنجی شده QUAL2Kw رودخانه دز جهت پیش‌بینی میزان آلودگی آن با توجه به میزان توسعه شهری و صنعتی در آینده و ارائه راهکارهای مدیریتی بهره‌مند گردید.

منابع

بیگلری، محمدرضا.، سیما، سمیه.، و سعادت پور، مطهره. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در شرایط بحرانی و اثربخشی اقدامات مدیریتی: مطالعه موردی زرینه‌رود. کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران، دانشگاه تهران، ایران. https://civilica.com/doc/600286/

عابدی کوپایی، جهانگیر.، نصری، زهره.، طالبی، خلیل.، مأمن پوش، علیرضا.، و موسوی، سید فرهاد. (۱۳۹۰). مطالعه کیفیت شیمیایی و آلودگی آب زاینده‌رود در بالادست به دیازینون و توان خودپالایی آن. علوم آب‌وخاک، ۱۵(۵۶) ،۱-۲۰.
http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1390.15.56.1.1

خسروی نیا، احسان.، گلمایی، سیدحسن.، و ضیاتباراحمدی، میرخالق. (۱۳۸۸). مدیریت کیفی سیستم های رودخانه‌ای به‌وسیله مدل ریاضی WASP7 مطالعه موردی رودخانه کارون. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران،گرگان، ایران. https://civilica.com/l/3869/

عاشق‌معلا، مریم.، محمدی فاضل، اصغر.، و حمامی، مجید. (۱۳۹۳). نقش توان خودپالایی رودخانه‌ها در تعیین مجاز پارامترهای کیفی پساب‌ها. نشریه علوم و مهندسی محیطزیست، ۱(۴) ، ۴۹-۳۷. https://www.magiran.com/paper/1408039

میرباقری، سید احمد.، محمودی، شاهرخ.، و خضری، سید مصطفی. (۱۳۹۰). مدل‌سازی تغییرات نیتروژن و فسفر در طول رودخانه چالوس با استفاده از نرم‌افزار QUAL2K. نشریه مهندسی عمران و محیطزیست، ۴۰(۳)، ۶۰-۴۹.
https://www.magiran.com/paper/950002

نجفی، حسین.، و محمود پور، طاهر. (۱۳۹۱). مدل‌سازی کیفی رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل QUAL2K. همایش ملی جریان و آلودگی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/148298/

هاشمی، سید حسین.، رنج‌کش، یوسف.، رمضانی، سعیده، و قاسمی زیارانی، الهام. (۱۳۹۱). تحلیل مقایسه‌ای کیفیت آب رودخانه کرج با تکنیک آماری تحلیل عاملی و مدل QUAL2K. همایش ملی جریان و آلودگی آب، دانشگاه تهران، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/148297/

References

Abedi-Koupai, J., Nasri, Z., Talebi, Kh., Mamanpoush, A., & Mousavi, S.F. (2011). Investigation of Zayandehrud Water Pollution by Diazinon and its Assimilative Capacity. Jwss, 15(56), 1-20. http://dorl.net/dor/20.1001.1.24763594.1390.15.56.1.1 [In Persian]

Alizadeh, A., Rajabi, A., Shabanlou, S. Yaghoubi, B., & Yosefvand, F. (2021). Modeling long-term rainfall-runoff time series through wavelet-weighted regularization extreme learning machine. Earth Sci Inform 14, 1047–1063. https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-021-00603-8

Amiri, S., Rajabi, A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level variations using deep learning methods and GMS numerical model. Earth Science Informatic. https://doi.org/10.1007/s12145-023-01052-1

Ashiq-Moala, M., Mohammadi Fazel, A., & Hamami, M. (2013). The role of self-purification power of rivers in the permissible determination of quality parameters of effluents. Journal of Environmental Sciences and Engineering, (4)1, 49-37. https://www.magiran.com/paper/1408039 [In Persian]

Azimi, H., Shabanlou, S., Ebtehaj, I., & Bonakdari, H. (2016). Discharge Coefficient of Rectangular Side Weirs on Circular Channels. International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation, 17(7-8), 391-399. http://dx.doi.org/10.1515/ijnsns-2016-0033

Azizpour, A., Izadbakhsh, M.A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2021). Estimation of water level fluctuations in groundwater through a hybrid learning machine. Groundwater for Sustainable Development, 15, 100687. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100687

Azizpour, A., Izadbakhsh, M.A., Shabanlou, S., Yosefvand, F., & Rajabi, A. (2022). Simulation of time-series groundwater parameters using a hybrid metaheuristic neuro-fuzzy model. Environment Science and Pollution Research. https://doi.org/10.1007/s11356-021-17879-4

Bigleri, M.R., Sima, S., & Saadatpour, M. (2015). Simulation of river water quality in critical conditions and the effectiveness of meditative measures: a case study of Zarineh Rood. Iran Water and Wastewater Science and Engineering Congress, University of Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/600286/ [In Persian]

Chapra, S., Pelletier, G., & Tao, H. (2006). A Modeling framework for simulating river and stream water quality, Version 2.04: Documentation and user's manual. Civil and Environmental Engineering Dept, Tufts University, Medford, MA. https://www.semanticscholar.org/paper/

Chuersuwan, N., Nimrat, S., & Chuersuwan, S. (2013). Water Quality Management in Lamtakhong River. Journal of Pakistan Water Resources Management, 10, 22-41. http://dx.doi.org/10.19026/rjaset.6.3456

Fan, C., Ko, C.H., & Wang, W.S. (2009). An innovative modeling approach using qual2k and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation. Journal of Environmental Management, 90(5), 1824-1832. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.011

Gharib, R., Heydari, M., Kardar, S., & Shabanlou, S. (2020). Simulation of discharge coefficient of side weirs placed on convergent canals using modern self-adaptive extreme learning machine. Appl Water Sci 10, 50. https://doi.org/10.1007/s13201-019-1136-0

Gilbert, J. M., & Maxwel, R, M. (2017). Examining regional groundwater–surface water dynamics using an integrated hydrologic model of the San Joaquin River basin. Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 923–947. https://doi.org/10.5194/hess-21-923-2017

Hashemi, S.H., Rangekesh, Y., Ramezani, S., & Ghasemi Ziyarani, E. (2012). Comparative analysis of Karaj river water quality with statistical technique of factor analysis and QUAL2K model. National Conference on Water Flow and Pollution, University of Tehran, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/148297/ [In Persian]

Hu, L., Xu, Z., & Huang, W. (2016). Development of a river-groundwater interaction model and its application to a catchment in Northwestern China. Journal of Hydrology, 543, 483-500. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.028

Khosravi Nia, H., Golmaei, H., Mir Khaleq, Z., & Ahmadi, T. (2009). Quality Management of River Systems by Wasp7 Mathematical Model Case Study of Karun River, Iranian Watershed Management Association 5th National Conference on Watershed Management Science and Engineering. Gorgan, Iran. https://civilica.com/l/3869/ [In Persian]

Li, Z., Quan, J., Li, X-Y., Wu, X-C., Wu, H-W., Li, Y-T., & Li, G-Y. (2016). Establishing a model of conjunctive regulation of surface water andgroundwater in the arid regions. Agricultural Water Management, 174: 30- 38. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.04.030

Mathew, M., Yao, Y., Cao, Y., Shodan, K.h., Ghosh, I., Bucci, V., Leatao, Ch., Njoka, D., Wei, I., & Hellweger, L. (2011). Anatomy of an urban waterbody: A case study of bostons mudyy river. Enviromental Pollution, 159(8-9), 1996-2002. http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2011.02.018

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2023). A Hybrid Machine Learning Model for Modeling Nitrate Concentration in Water Sources. Water, Air, & Soil Pollution, 234(11), 1-22. http://dx.doi.org/10.1007/s11270-023-06745-3

Mazraeh, A., Bagherifar, M., Shabanlou, S., & Ekhlasmand, R. (2024). A novel committee-based framework for modeling groundwater level fluctuations: A combination of mathematical and machine learning models using the weighted multi-model ensemble mean algorithm. Groundwater for Sustainable Development, 24, 101062. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101062

Moghadam, R.G., Izadbakhsh, M.A., Yosefvand, F., & Shabanlou, S. (2019). Optimization of ANFIS network using firefly algorithm for simulating discharge coefficient of side orifices. Appl Water Sci, 9, 84. https://doi.org/10.1007/s13201-019-0950-8

Mirbagheri, S.A., Mahmoudi, S., & Khazri, S.M. (2019). Modeling of Nitrogen and Phosphorus Changes along Chalus River Using QUAL2K Software. Journal of Civil and Environmental Engineering, 40(3), 49-60. https://www.magiran.com/paper/950002 [In Persian]

Mohammed, K.S., Shabanlou, S., Rajabi, A., Yosefvand, F., & Izadbakhsh, M.A. (2023). Prediction of groundwater level fluctuations using artificial intelligence-based models and GMS. Applied Water Science, 13, 54. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01861-7

Mummidivarapu, S. K., Rehana, S., & Satyaji Rao, Y. R. (2023). Mapping and assessment of river water quality under varying hydro-climatic and pollution scenarios by integrating QUAL2K, GEFC, and GIS. Environmental Research, 239 (1), 117250. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117250

Najafi, H., & Mahmoudpour, T. (2012). Qualitative modeling of Qarasu river using QUAL2K model. National Conference on Water Flow and Pollution, University of Tehran, Tehran, Iran. https://civilica.com/doc/148298/ [In Persian]

Rafiee, M., Akhond Ali, A.M., Moazed, H., Jaafarzadeh, N., & Zahraie, B. (2013). A Case Study of Water Quality Modeling of the Gargar River, Iran. Journal Of Hydraulic Structures, 1(2), 10-22. https://doi.org/10.22055/jhs.2014.10533

Rajabi, A., & Shabanlou, S. (2012). Climate index changes in future by using SDSM in Kermanshah, Iran. Journal of Environmental Research and Development, 7(1), 37-44. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20123377231

Pelletier, G., & Chapra, S. (2008). QUAL2Kw theory and documentation A modeling framework for simulating river and stream water quality. Environmental Assessment Program Olympia. Washington, 98504-7710. http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.07.002

Sener, S., Sener, E., & Davraz, A. (2017). Evaluation of water quality using water quality index method and GIS in Aksu River (Turkey). Journal of Water Management, 584, 131-14. http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.102

Shabanlou, S. (2018). Improvement of extreme learning machine using self-adaptive evolutionary algorithm for estimating discharge capacity of sharp-crested weirs located on the end of circular channels. Flow Measurement and Instrumentation, 59, 63-71. https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.11.003

Varekar, V., Yadav, V., & Karmakar, S. (2021). Rationalization of water quality monitoring locations under spatiotemporal heterogeneity of diffuse pollution using seasonal export coefficient. Journal of Environmental Management, 277, 111342. http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111342

Zhang, R., Qian, X., Yuan, X., Ye, R., Xia, B., & Wang, Y. (2012). Simulation of Water Environmental Capacity and Pollution Load Reduction Using QUAL2K for Water Environmental Management. International Journal of Environmental Research and Public Health, 9(12), 4504-4521. http://dx.doi.org/10.3390/ijerph9124504