Research Paper

Investigating the Maximum Dischargeable Pollution Load in Mountain Rivers Based on Modeling

Ali Vanaei[1], **Abdollah Taheri Tizro**[2*], **Safar Marofi**[3]

[1] Ph.D. Student of Water Sciences and Engineering - Water Resources, Department of Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. Email: a.vanaei84@gmail.com.
[2] Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. ORCID: 0000-00019015027X, Email: ttizro@yahoo.com.
3 Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran. ORCID: 0000-0002-4649-8516, Email: marofisafar59@gmail.com.

10.22125/IWE.2024.436734.1784

Received:
February 12, 2024
Accepted:
April 21, 2024
Available online:
June 29, 2024

Keywords:
water pollution, self-purification, quality, TMDL, QUAL2KW

Abstract

Today, one of the most effective ways to manage and protect surface water resources is to use the capacity to accepted pollution of rivers. In this study, the self-purification capacity of Abbasabad river in Hamedan using the QUAL2KW model, based on the simulation of DO, BOD and COD parameters, taking into account the water quality standards in two areas for drinking (1.86 km) and agriculture (4.33 km) was evaluated. The accuracy of the simulated values was calculated through the statistical indices such as R2, SE, RMSE and NRMSE. The RMSE values in the validation stage for DO, BOD and COD values were calculated as 0.26, 1.82 and 2.62, respectively. The simulation results showed that the amount of dissolved oxygen decreased by -3.21% in the first period and by -1.66% in the second period. Also, the concentration of BOD and COD increased by 30.13 and 27.94% in the first period and by 70.84 and 60.81% respectively in the second period. Also, TMDL results showed that in the first period, the amount of input load should be reduced, but in the second period, it is possible to increase the input load. For BOD and COD parameters, the maximum load was calculated based on the agricultural standard at the two watersheds, as 49.80 mg/liter and 99.15 mg/liter.

1. Introduction

One of the most important water sources are surface waters or rivers, which play an important role in providing water needed for various activities such as agriculture, industry, drinking and production. On the other hand, these sources have been placed as the place of discharge of sewage, factory effluent and agricultural drains. Rivers have natural self-purification capacity and resilience to water deficits, but when deficits exceed a certain limit, they affect biodiversity and livelihoods and lead to high costs for treatment and restoration (IWMI, 2004). The maximum pollutant load acceptance capacity (TMDL) in rivers is limited according to their self-purification ability.

* **Corresponding Author**: Abdollah Taheri Tizro
Address: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.
Email: ttizro@yahoo.com, ttizro@Basu.ac.ir
Tel: 09181190052

2. Materials and Methods

In this study, qualitative parameters (DO, BOD, COD) of Abbas Abad River in Hamedan were simulated using the QUAL2KW model according to its capabilities. For this purpose, DO, BOD, COD parameters were first sampled in May of 2022 and 2023. The parameters of 2022 were used for calibration and the parameters of 2023 were used for accuracy. Statistical methods were used to compare the simulated and measured values in order to evaluate the validity of the model. In this study, due to the fact that a part of Abbas Abad River water is used to provide drinking water for Hamedan city and a part is used as agricultural water for irrigation of gardens and agricultural fields, therefore, in order to investigate the percentage of self-purification of river Do The interval was taken into account.

3. Results

Based on the results presented, for drinking purposes, the values of BOD and COD are not only not possible to increase the input load, but they must also be reduced to 49% and 32%, respectively, in order to still be acceptable in terms of drinking standards. It should be noted that this is due to the location and location of water collection from the river for drinking purposes (first period). If the place of drinking water collection changes in the future, this evaluation will not be valid. Also, in terms of agricultural use, if the values of BOD and COD increase up to 3.45 and 5.86 times, respectively, they will still be acceptable in terms of agricultural standards. As stated before, this is valid considering the location and location of water harvesting from the river for agricultural purposes (second period). The results of this research are in line with the results of (Raga Irsanda et al., 2014; Salvai and Bezdan, 2008). In total, it can be mentioned that this river has a pollution load of 2229.06 kg per day and 4447.89 kg per day for BOD and COD values, respectively.

4. Discussion and Conclusion

According to the results, the process of dissolved oxygen changes along the route is almost uniform and linear and has few fluctuations, which can be due to the high slope and proper aeration of the river. The changes of BOD and COD are relatively similar and are significantly higher than the changes of dissolved oxygen in such a way that it increases from a minimum value to a maximum value that is several times the initial value. The results of Vanaei et al. (2022) also support this case. TMDL process was also used to determine the self-purification capacity of the river and the maximum total daily load. Based on the results, for drinking purposes, not only is it not possible to increase the input load for BOD and COD values, but these values must be reduced by 49% and 32%, respectively, in order to be acceptable in terms of drinking standards. However, in terms of agricultural use, this trend is different and if the values of BOD and COD increase to 3.45 and 5.86 times, respectively, they will still be acceptable in terms of agricultural standards. The modeling results are completely acceptable to achieve management goals, especially in areas where rivers usually face a severe lack of data. The results of Vanaei et al. (2016, A) are also in line with these results.

5. Five important references

1) International Water Management Institute (IWMI). (2004). IWMI Annual report 2003-2004. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute (IWMI), 49p.
2) Irsanda, P.G.R., N. Karnaningroem and D. Bambang. 2014. Analisis Daya Tampung Beban Pencemaran Kali PelayaranKabupaten Sidoarjo Dengan Metode Qual2kw. Jurnal Teknik ITS, 3(1): D47-D52.
3) Salvai, A. and A. Bezdan. 2008. Water quality model QUAL2K in TMDL development. Balwois Ohrid, Republic of Macedonia, 27: 1-8.
4) Vanaei, A., S. Maroufi and A. Azeri. 2022. Simulation of pollution in steep mountain rivers using the QUAL2KW model, Irrigation Science and Engineering, (45) 1: 19-34.
5) Vanaei, A., S. Maroufi and A. Azeri. 2016. A. Investigation of self-remediation of the mountainous area of the Abbas Abad River in Hamedan, Environmental Journal, (84) 4: 727-742.
6) Zhang, Y., H. Yang and Z. Wang. 2016. Simulating water quality of Wei River with QUAL2K model, a case study of Hai River Basin in China. In MATEC Web of Conferences, 68: 14005. EDP Sciences.

نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران
سال چهاردهم. شماره پنجاه و شش .تابستان۱۴۰۳

بررسی حداکثر بار آلودگی قابل تخلیه در رودخانه‌های کوهستانی مبتنی بر مدل‌سازی

علی ونائی[۱]، عبداله طاهری تیزرو*[۲]، صفر معروفی[۳]

تاریخ ارسال:۱۴۰۲/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش:۱۴۰۳/۰۲/۰۲

مقاله پژوهشی

چکیده

امروزه یکی از موثرترین راه‌کارهای مدیریت و حفاظت از منابع آب سطحی، استفاده از ظرفیت پذیرش آلودگی رودخانه‌ها می‌باشد. در این مطالعه ظرفیت خودپالایی رودخانه عباس‌آباد همدان با استفاده از مدل QUAL2KW، مبتنی بر شبیه¬سازی پارامترهای DO، BOD و COD با در نظر گرفتن استانداردهای کیفی آب در دو بازه شرب (۱/۸۶ کیلومتر) و کشاورزی (۴/۳۳ کیلومتر) مورد ارزیابی قرار گرفت. میزان دقت مقادیر شبیه‌سازی شده، از طریق محاسبه شاخص‌های آماری نظیر R^2، SE، RMSE وNRMSE صورت گرفت. مقادیر RMSE در مرحله صحت‌سنجی برای مقادیر DO، BOD و COD به‌ترتیب ۰/۲۶، ۱/۸۲ و ۲/۶۲ محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد میزان اکسیژن محلول در بازه اول به‌میزان ۳/۲۱- درصد و در بازه دوم به‌میزان ۱/۶۶- درصد کاهش داشته است. همچنین میزان غلظت BOD و COD در بازه اول به‌ترتیب به‌میزان ۳۰/۱۳ و ۲۷/۹۴ درصد و در بازه دوم نیز به‌ترتیب به‌میزان ۷۰/۸۴ و ۶۰/۸۱ درصد افزایش داشته است. همچنین نتایج TMDL نشان داد در بازه اول میزان بار ورودی می‌بایست کاهش یابد ولی در بازه دوم امکان افزایش بار ورودی وجود دارد. برای پارامترهای BOD و COD بیشترین بار وارده براساس استاندارد کشاورزی در محل تقسیم آب دو، به‌میزان ۴۹/۸۰ میلی‌گرم در لیتر و ۹۹/۱۵ میلی گرم در لیتر محاسبه شد.

واژهای کلیدی: آلودگی آب، خودپالایی، کیفیت، TMDL، QUAL2KW

[۱] دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب- منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، a.vanaei84@gmail.com.
[۲] دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، ttizro@yahoo.com . (مسئول مکاتبه)
[۳] استاد تمام، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، marofisafar59@gmail.com.

مقدمه

رشد جمعیت و افزایش فعالیت‌های انسانی در حوضه آبریز رودخانه‌ها، تخلیه فاضلاب‌های خانگی و صنعتی، فعالیت‌های کشاورزی، رواناب و شیرابه محل‌های دفع زباله باعث کاهش کیفیت آب این منابع مهم، شده است (Ng et al. 2006). محدودیت منابع آب، مدیریت نادرست آب کشاورزی، قدیمی بودن روش‌های تولید صنعتی و آلوده‌سازی آن‌ها و ناکارایی سامانه‌های کنترل و نظارت بر آلودگی منابع آب، از جمله عواملی است که ضرورت توجه بیشتر به کیفیت منابع آب موجود را ایجاب می‌نماید. این موضوع در حالی است که در دهه‌های اخیر گسترش آلودگی منابع آب به‌خصوص آب‌های سطحی، جوامع انسانی و اکوسیستم‌های طبیعی را به‌شدت تهدید می‌کند، یکی از مهمترین منابع آبی آب‌های سطحی یا رودخانه‌ها هستند که نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید دارند. از طرفی این منابع به‌عنوان محل تخلیه فاضلاب‌ها، پساب کارخانه‌ها و زهکش‌های کشاورزی قرار گرفته‌اند. بسیاری از برنامه‌ریزی‌های منابع آب در کشورها بر اساس پتانسیل بالقوه منابع آب سطحی می‌باشد. آگاهی از کیفیت منابع آب یکی از نیازمندی‌های مهم در برنامه‌ریزی و توسعه منابع آب و حفاظت و کنترل آن‌ها می‌باشد (شکری و همکاران، ۱۳۹۴). مدیریت جامع منابع آب نمی‌تواند بدون لحاظ کردن مدیریت کیفی منابع آب سطحی به اهداف خود دست یابد (Tharme, 2003). ازاین‌رو در مدیریت رودخانه‌ها علاوه بر کمیت و میزان دبی، پارامترهای کیفی نیز از مؤلفه‌های حائز اهمیت بوده که می‌بایست به‌دقت مورد بررسی قرار گیرد. رودخانه‌ها دارای ظرفیت خودپالایی طبیعی و قابلیت انعطاف نسبت به کمبودهای آبی هستند، اما وقتی کمبودها از حد مشخصی تجاوز نمودند، تنوع زیستی و معیشت را تحت تأثیر قرار می‌دهند و منجر به هزینه‌های بالای جهت تصفیه و احیای مجدد می‌شوند (IWMI, 2004). حداکثر ظرفیت پذیرش بار آلاینده (TMDL) در رودخانه‌ها با توجه به‌توان خودپالایی که دارند محدود می‌باشد. حداکثر بار روزانه (TMDL) به حداکثر تعداد آلاینده‌های دفع شده در یک عنصر محیط آب تحت اهداف مشخص محیط اشاره می‌کند و بیانگر این است که تخلیه مجاز آلودگی‌ها نباید عملکردهای عنصر محیطی را خراب کند (فلاح و همکاران، ۱۴۰۲). با افزایش جمعیت و سرعت فعالیت‌های توسعه‌ای، این منابع آبی بیش از گذشته متحمل تغییرات ساختاری و عملکردی نامطلوب شده‌اند (Khalili et al, 2020). جهت بررسی کیفی رودخانه در نظر گرفتن پارامترهایی که بیشترین تاثیر را در فرآیند خودپالایی رودخانه دارند ضرورت دارد. در این راستا ویژگی‌های کیفی آب از قبیل اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی زیستی (BOD) و شیمیایی (COD) در رودخانه عباس‌آباد همدان مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی این ویژگی‌ها استفاده از ابزارهای مدیریتی از جمله مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب، می‌تواند بسیار سودمند باشد. انواع مختلفی از این مدل‌ها در طول چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند. برخی از مدل‌ها پیچیده و برخی دیگر نسبتاً ساده می‌باشند (Lindenschmidt 2006, Cox, 2003). با توجه به محدودیت داده‌ها برای شبیه‌سازی، به‌طور گسترده‌ای مدل‌های یک بعدی (D1) کیفیت آب پذیرفته شده است (Mahamah, 1998). به‌عنوان یک مدل D1، QUAL2K یکی از بهترین ابزارها برای شبیه‌سازی کیفیت آب با توجه به انعطاف‌پذیری آن، سهولت استفاده و در دسترس بودن آن می‌باشد (Ye et al., 2013). رفیعی و همکاران (۱۴۰۲) توان خودپالایی و حداکثر ظرفیت روزانه آلاینده‌ها (TMDL) برای پارامترهای اکسیژن محلول (DO)، نیاز اکسیژن زیست‌شیمیایی (BOD_5)، نیترات (NO_3) و فسفات (PO_4) را در گستره کامل رودخانه‌های بالیقلی‌چای و قره‌سو با استفاده از مدل QUAL2Kw در دو دوره کم‌آبی و پرآبی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان دهنده اختلاف سطوح شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل از داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر دو رودخانه بود. بیشتر مقاطع مورد بررسی از رودخانه‌ها توان خودپالایی اندکی را نشان دادند. نتایج به‌دست آمده نشانگر وضعیت نامطلوب کیفیت آب در بیشتر بازه‌های مورد بررسی از این رودخانه‌ها بود. نتایج علیپور نصیرمحله

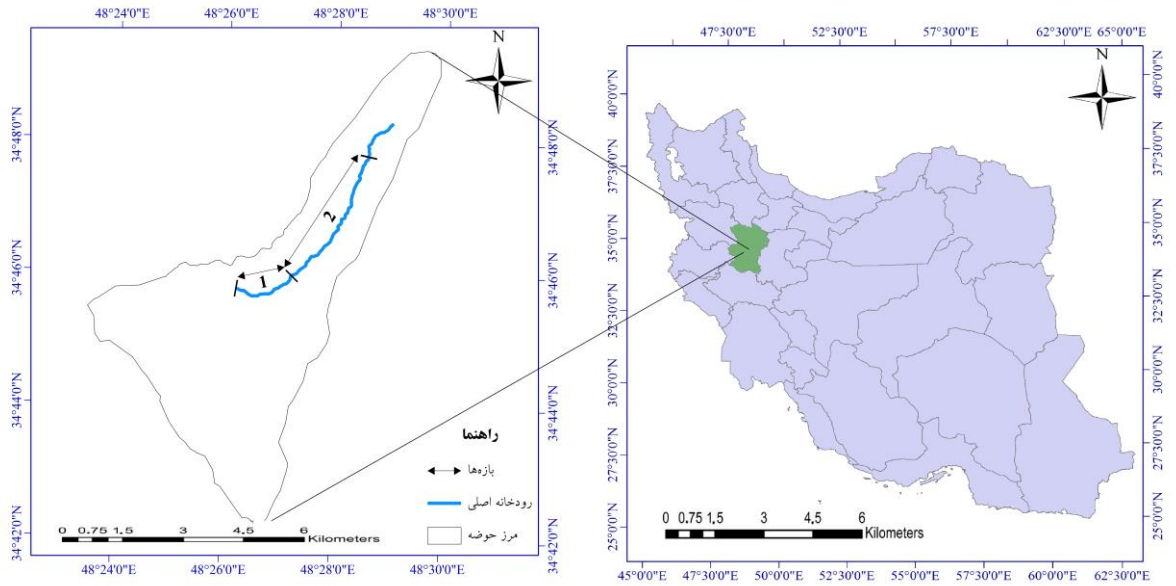
و رادفر (۱۴۰۲) نشان دهنده بیشتر بودن بار ورودی به رودخانه از منابع آلاینده غیرنقطه‌ای در فصل کشت بود که سبب افزایش بار نیترات از حداکثر مجاز می‌گردد، و برداشت آب برای کاربری‌های شرب و کشاورزی را با محدودیت مواجه می‌نماید. فلاح و همکاران (۱۴۰۲) نیز در تحقیقی باعنوان شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه سالند با استفاده مدل QUAL2K پرداختند. ایشان دریافتند نتایج حاصل از مدل تا حدود زیادی گویای شرایط واقعی رودخانه می‌باشد که این امر نشان دهنده توانا بودن مدل QUAL2Kwدر شبیه‌سازی پارامترهای کیفی است. همچنین ایشان دریافتند که سرعت جریان رودخانه تأثیر بیشتری در خودپالایی آب رودخانه‌های کوهستانی دارد و محل آلودگی منبع نقطه‌ای تأثیر بسیار محدودی در این زمینه دارد. Juwana et al (2024) به تحلیل بار آلودگی رودخانه پرداختند، نتایج نشان داد بیشترین سهم بار آلودگی BOD، به‌میزان ۵۳ درصد مربوط به مصرف خانگی و کمترین مقدار به‌میزان ۲ درصد مربوط به بخش کشاورزی است. همچنین بر اساس مطالعه Goodarzi et al (2023) بر روی رودخانه دز مشخص شد با اعمال سناریوی کاهش بار آلاینده نقطه‌ای، پارامترهای کیفی آب رودخانه تا حد زیادی قابل کنترل است. همچنین میزان حداکثر خودپالایی رودخانه‌ای در اندونزی با استفاده از مدل QUAL2KW مورد ارزیابی قرار گرفت. در این ارزیابی اندازه‌گیری COD و BOD در هفت ایستگاه نشان داد که میزان حداکثر ظرفیت حمل BOD، ۰/۰۲۴ تن در ساعت و برای COD، ۰/۹۶ تن در ساعت بوده که میزان آلایندگی رودخانه کمتر از این مقدار می‌باشد (Setiawan, 2018). تحقیق Patel and Jariwala (2023) نیز نشان داد بیشترین و کمترین ظرفیت حمل بار BOD به‌ترتیب ۲۰۵۷/۷ کیلوگرم در روز در بازه شماره ۲۱ رودخانه و ۱۰۸۸/۱ کیلوگرم در روز برای بازه شماره ۴ رودخانه است. Akpen et al (2016) تاثیر تخلیه فاضلاب را روی کیفیت آب رودخانه ووپا در نیجریه بررسی کردند. نتایج بدست آمده بیانگر تغییرات کیفی آب در فصل خشک و پرآبی بوده و مقدار BODدر فصل خشک بیشتر از فصل پرآبی بوده است. Haider et al (2013) میزان اکسیژن محلول و نیاز اکسیژن بیولوژیکی و بیوشیمیایی را برای رودخانه‌های بزرگ مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق از رابطه استریتر فلپس استفاده کرده و ضمن مرور روابط تعیین BOD و DO در سال‌های مختلف با استفاده از میزان BOD و زمان مقدار ضریب زوال را تعیین کردند. در پژوهشی دیگر توسط Fan et al, (2021) ظرفیت حمل بار رودخانه جینگ-می کریک در کشور تایوان با استفاده از ترکیب مدل‌های HEC-RAS و QUAL2K مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست آمده برای تعیین حداکثر بار روزانه (TMDL) به‌منظور مدیریت کیفیت آب، با در نظر گرفتن سه چشم‌انداز بلندمدت، میان‌مدت و کوتاه‌مدت و دو سناریو کاهش فردی و گروهی آلاینده استفاده شد. در این تحقیق ظرفیت حمل بار آلودگی کمی‌سازی شد و یک سیستم TMDL بر اساس معیارهای کیفیت آب مربوطه با استفاده از مدل‌سازی کیفیت آب ایجاد گردید. نتایج نشان داد که سناریو کاهش گروهی، عملکرد بهتری برای کنترل آلودگی از خود نشان می‌دهد و طی آن کاهش آلودگی در فاضلاب‌های با دبی بیشتر منجر به بهبود کیفیت آب رودخانه می‌شود. همچنین کیفیت آب رودخانه کوچک آکاکی (LAR) با استفاده از مدل QUAL2Kw بررسی شد. در این مطالعه سناریوهای مختلف با هدف انتخاب رویکردهای بهبود کیفیت آب و کاهش بار آلودگی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد با مدیریت و کنترل منابع آلودگی از طریق به‌کارگیری بهترین شیوه‌های مدیریتی و اقدامات درون جریانی، می‌توان به هدف ارتقای کیفیت آب رودخانه، حفاظت از آبزیان و کاهش آلودگی دست یافت (Angello et al, 2021). همچنین مطالعات (Farkhani, 2021؛ Nikakhtar, 2020؛ Areeyaenezhad et al, 2019؛ Hoseini, 2019؛ ونائی و همکاران، ۱۳۹۶، ب) نیز کارایی مدل QUAL2KW را در شبیه‌سازی کیفیت آب تایید کردند. با توجه به مطالعه تحقیقات پیشین و بررسی منابع می‌توان دریافت که در سال‌های اخیر محققین از مدل‌هایی نظیر مدل QUAL2KW به‌منظور ارزیابی المان‌های آلودگی

رودخانه استفاده نموده‌اند. این مطالعات بیشتر در حوضه‌های بزرگ صورت پذیرفته است. لذا در این مطالعه سعی شده است که از این ابزار و بهره‌گیری از روش TMDL حداکثر بارگذاری قابل تحمل در یک حوضه کوچک مقیاس کوهستانی نسبتاً پرشیب استفاده گردد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان همدان منطقه‌ای کوهستانی با مساحتی بیش از ۱۹ هزار کیلومترمربع در غرب ایران واقع شده که یکی از مهمترین ارتفاعات آن کوه الوند با ۳ هزار ۳۱۲ متر ارتفاع می‌باشد. رودخانه عباس‌آباد از ارتفاعات الوند در ۱۲ کیلومتری جنوب غربی همدان در جهت شمال جاری می‌شود. این رودخانه به طول ۱۸ کیلومتر (در حد فاصل مناطق گنجنامه و عباس‌آباد)، شاخه‌هایی را از اطراف دریافت و پس از مشروب کردن باغات و اراضی اطراف خود، در نزدیکی آبادی گراچقا به رود خاکو می‌ریزد. این رودخانه به‌دلیل داشتن حوضه‌ای برفی، دارای رژیمی دایمی است (وزارت نیرو، ۱۳۸۴). شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۱): نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان همدان

روش تحقیق

در این مطالعه شبیه‌سازی کیفی رودخانه عباس‌آباد همدان شامل پارامترهای (DO، BOD، COD) با استفاده از مدل QUAL2KW انجام پذیرفت. برای این‌منظور ابتدا نمونه‌برداری پارامترهای DO، BOD و COD از ۶ ایستگاه منتخب به‌تعداد یک مرتبه در اردیبهشت‌ماه سال‌های ۱۴۰۱ و ۱۴۰۲ انجام پذیرفت.پارامترهای سال ۱۴۰۱ برای واسنجی و پارامترهای سال ۱۴۰۲ برای صحت‌صنجی مورد استفاده قرار گرفت.

برای مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده از روش‌های آماری استفاده گردید تا میزان اعتبار مدل مورد بررسی قرار گیرد. به‌منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل، از شاخص‌های آماری ضریب تبیین (R^2)[1]، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)[2]، خطای استاندارد (SE)[3] و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال (NRMSE)[1]

[1] Coefficient of Determination
[2] Root Mean Square Error
[3] Standard Error

استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها در روابط ۱ تا ۴ ارایه گردیده است.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)(Y_p - \overline{Y}_p)]^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_m - \overline{Y}_m)^2 \sum_{i=1}^{n}(Y_p - \overline{Y}_p)^2} \quad (۱)$$

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum(\mathrm{Y_m} - \mathrm{Y_p})^2}{\mathrm{n}-1}} \quad (۲)$$

$$\mathrm{SE} = \frac{\sqrt{\frac{1}{\mathrm{n}-1}\sum(\mathrm{Y_m} - \mathrm{Y_p})^2}}{\overline{\mathrm{Y}}_\mathrm{m}} \quad (۳)$$

$$\mathrm{NRMSE} = \frac{\mathrm{RMSE}}{\mathrm{Y_{max}} - \mathrm{Y_{min}}} \quad (۴)$$

که در این روابط n تعداد نمونه‌های مورد مطالعه، Y_m مقادیر اندازه‌گیری شده در هر روز، Y_p مقدار پیش‌بینی شده با استفاده از مدل، $\overline{Y}_m$ میانگین داده‌های اندازه‌گیری شده، Y_{max} مقدار بیشینه داده‌ها و Y_{min} مقدار کمینه داده‌ها می‌باشد.

به‌منظور محاسبه درصد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری از رابطه ۵ استفاده شد (Rafiee et al, 2014).

$$\mathrm{MAPE} = (\sum\left(\left|\mathrm{P_{i,j}} - \mathrm{O_{i,j}}\right|\right)/\sum\left(\mathrm{O_{i,j}}\right)*100/\mathrm{m}) \quad (۵)$$

در این رابطه: MAPE میانگین قدرمطلق درصد خطا، $O_{i,j}$ مقادیر مشاهده شده، $P_{i,j}$ برابر با مقادیر پیش‌بینی شده و m برابر تعداد جفت از مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده متغیرهای حالت است. مقادیر این پارامترها برای همه اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌ها محاسبه شده است.

جمع‌آوری آمار و اطلاعات موردنیاز

برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه عباس‌آباد با استفاده از مدل QUAL2KW اطلاعاتی از قبیل دبی، شیب طولی رودخانه بین هر ایستگاه، ضریب مانینگ، عرض کف، شیب دیواره، فاصله بین هر یک از ایستگاه‌ها، دمای متوسط هوا، دمای نقطه شبنم، دمای آب، سرعت باد، تعداد روزهای ابری، وجود یا عدم وجود جلبک در کف رودخانه و درصدی از رودخانه که در اثر کوه‌ها و پوشش گیاهی زیر سایه قرار گرفته‌اند موردنیاز می‌باشد. ضریب مانینگ با توجه به وضعیت بستر، جداره رودخانه و مسیر آن براساس بازدیدهای صحرایی منطقه و همچنین با مقایسه عکس-های مرجع انتخاب شد. آمار هواشناسی از ایستگاه هواشناسی فرودگاه همدان تهیه شد و مابقی پارامترها براساس بازدیدهای محلی در زمان‌های مختلف و نقشه-برداری‌های صورت گرفته تعیین گردید. در این مطالعه با توجه به اینکه بخشی از آب رودخانه عباس‌آباد جهت تامین آب شرب شهر همدان و بخشی نیز به‌عنوان حقابه‌های کشاورزی جهت آبیاری باغات و زمین‌های کشاورزی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا به‌منظور بررسی درصد خودپالایی رودخانه دو بازه در نظر گرفته شد. بازه اول از محدوده گنج‌نامه تا محل تقسیم آب، جهت برداشت شرب (تقسیم آب یک) و بازه دوم از محل تقسیم آب یک تا محل برداشت آب برای مصارف کشاورزی (تقسیم آب دو) می‌باشد (شکل ۱). محل ایستگاه‌های نمونه برداری به تعداد ۶ محل به‌نحوی انتخاب گردید که نتایج به‌دست آمده از هر ایستگاه بتواند شاخص گویایی از وضعیت بالادست خود بوده و اثر ورود منابع آلاینده را در مقایسه با ایستگاه‌های پایین‌دست نشان دهد (نوشادی و حاتمی‌زاده، ۱۳۸۹). از این ایستگاه‌ها در ماه‌های موردنظر نمونه‌برداری آب صورت گرفته و آزمایشات کیفی موردنیاز انجام شد. طول رودخانه ۷/۴۳ کیلومتر بوده و در مسیر این رودخانه شاخه فرعی تاریک‌دره به این رودخانه اضافه می‌شود. برای انجام فرایند مدل‌سازی، مسیر رودخانه به ۱۶ قطعه تقسیم‌بندی شد (شکل ۲).

فرایند TMDL

در مطالعات ظرفیت خودپالایی رودخانه، بر اساس رابطه ۶، ظرفیت بارگذاری (LC)[۹] یا حداکثر بار کل روزانه (TMDL)، بیشترین مقدار بارگذاری آلاینده قابل تحمل توسط یک رودخانه است، به شرط آنکه استانداردهای

[1] Normalized Root Mean Square Error

کیفیت آب رعایت شود (Zhang and Fillmore 2003). سهم‌بندی بار مواد زاید (WLA)[۱۰] بخشی از حداکثر بار کل روزانه است که به یک منبع آلودگی نقطه‌ای فعلی یا آتی تخصیص داده می‌شود. سهم‌بندی بار (LA)[۱۱] درصدی از حداکثر بار کل روزانه است که به یک منبع آلودگی غیرنقطه‌ای فعلی یا آتی تخصیص داده می‌شود. مجموع سهم‌بندی بار مواد زاید برای منابع نقطه‌ای (WLA) و سهم‌بندی بار برای منابع غیرنقطه‌ای (LA) به اضافه یک حاشیه ایمنی (MOS)[۱۲]، معادل TMDL است.

$$LC=TMDL=(WLA+LA+MOS) \quad (۶)$$

که در آن WLA: سهم‌بندی بار مواد زاید، LA: سهم‌بندی بار، MOS: حاشیه ایمنی می‌باشد.

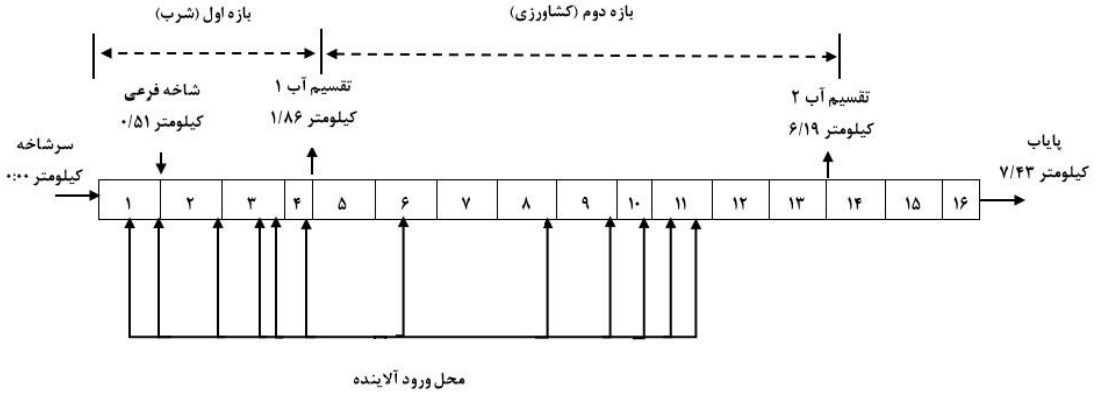
در این مطالعه از استاندارد کیفیت آب‌های ایران (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۹۰) استفاده گردید، در بسیاری از موارد، گزینه‌های مدیریتی را می‌توان با استفاده از مدل، به‌ویژه در سامانه‌های رودخانه‌ای که بارهایی از چندین منبع می‌پذیرد ارزیابی کرد. در این تحقیق سناریوی ورود بار آلودگی به رودخانه (بدون تغییر در حجم و غلظت) به‌صورت گسترده در بازه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. به‌منظور ارزیابی ظرفیت خودپالایی و حداکثر توان بارگذاری، نیاز به محاسبه بار ورودی کل به بازه مورد نظر از رودخانه می‌باشد. در این مطالعه بررسی ظرفیت خودپالایی رودخانه در بازه‌های شرب (بازه اول) و کشاورزی (بازه دوم) در نظر گرفته شد. در این‌خصوص، بارگذاری یا کاهش بار به‌نحوی انجام گرفت که کیفیت آب، استاندارد کاربری در نظر گرفته شده را نقض ننماید. حداکثر میزان بار ورودی (L_i) از پارامترهای مورد بررسی بر حسب kg/day، در هر بازه از رابطه شماره ۷ محاسبه می‌شود.

$$L_i = (Q_h \times C_h) + (Q_p \times C_p) + (Q_{np} \times C_{np}) \quad (۷)$$

که در آن Q و C به‌ترتیب برابر با دبی (مترمکعب بر ثانیه) و غلظت پارامترهای کیفی (میلی‌گرم در لیتر) می‌باشد. اندیس‌های h، np و p به‌ترتیب به سراب، منابع غیرنقطه‌ای و منابع نقطه‌ای اشاره دارد (عظیمی و همکاران، ۱۳۸۹).

شبیه‌سازی هندسه رودخانه در مدل QUAL2KW:

مدل QUAL2KW شامل تعامل صلی چرخه غذایی، تولید جلبک، اکسیژن‌خواهی کفزی¬ها، مصرف اکسیژن کربنی، بازدمش اتمسفری و آثار آن‌ها روی رفتار اکسیژن محلول است. کلیفرم¬ها و اجزای ناپایدار اختیاری به صورت اجزای ناپایدار زوال¬پذیری که با سایر اجزا اندرکنش ندارند، مدل می¬شوند (Rosgen, 1996). QUAL2KW برای مدل‌سازی، مسیر رودخانه را به قطعه‌هایی تقسیم‌بندی می‌کند، این تقسیم‌بندی برای رودخانه عباس‌آباد مطابق شکل ۲ انجام پذیرفت.



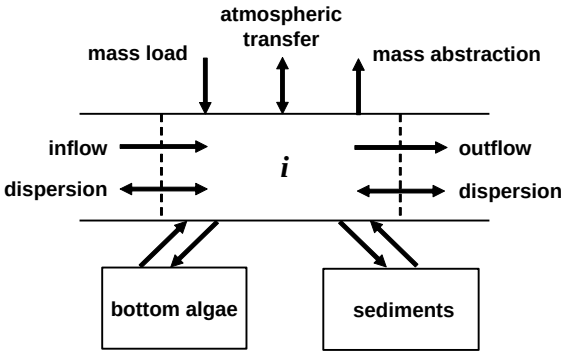
شکل (۲): نحوه قطعه‌بندی مسیر رودخانه عباس‌آباد همدان

موازنه جریان رودخانه:

معادله اصلی که مدل مذکور به حل عددی آن می‌پردازد، معادله جابجایی/پخش یک بعدی است. با توجه به‌شکل ۳ رابطه بیلان جرم برای بازه iام از رودخانه، در مدل QUAL2KW به‌صورت رابطه ۸ تعریف می‌شود (Pelletier et al., 2008).

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}c_i - \frac{Q_{ab.i}}{V_i}c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i}(c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i + \frac{E'_{hyp.i}}{V_i}(c_{2.i} - c_i) \quad (8)$$

C_i: غلظت پارامتر کیفی در المان i بر حسب g/m^3، V_i: حجم المان i بر حسب m^3/d، t: زمان بر حسب d، E_i': ضریب انتشار بین المان i و i+1، Q_i: دبی جریان المان i بر حسب m^3/d، W_i: بارگذاری خارجی پارامتر کیفی به المان i بر حسب g/d، S_i: تولید و مصرف پارامتر کیفی در اثر واکنش‌ها و مکانیسم‌های انتقال جرم در المان i بر حسب $g/m^3/d$، $c_{2,i}$ غلظت جزء کیفی در منطقه رسوب هایپرهئیک و $Q_{ab,i}$ دبی آلاینده خروجی از بازه iام بر حسب m^3/d که مجموع آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای را شامل می‌شود.



شکل (۳): ساختار توازن جرمی رودخانه (Pelletier et al., 2008)

نتایج و بحث

به‌منظور واسنجی مدل QUAL2KW از داده‌های اردیبهشت ماه سال ۱۴۰۱ استفاده گردید که نتایج مربوطه، در شکل ۴ اریه شده است. در مرحله صحت-سنجی مدل، از داده‌های مربوط به سال ۱۴۰۲ استفاده گردید که نتایج این صحت‌سنجی برای اردیبهشت ماه نیز در شکل ۴ ارایه گردیده است. بر اساس این نتایج، میزان اختلاف (درصد) بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده، برای پارامترهای مورد بررسی در جدول ۱ ارایه شده است. همچنین مقادیر برآورد خطا (mg/l) برای واسنجی و صحت‌سنجی نیز در جدول ۲ ارایه شده است.

جدول (۱): میزان اختلاف (درصد) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل QUAL2KW برای پارامترهای DO، BOD و COD

پارامتر	اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در واسنجی	اختلاف مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در صحت‌صنجی
DO	۰/۳۷	۰/۵۷
BOD	۱/۱۶	۲/۰۹
COD	۱/۵۵	۲/۰۴

جدول (۲): مقادیر برآورد خطا (mg/l) برای واسنجی و صحت‌سنجی

COD		BOD		DO		
صحت‌صنجی	واسنجی	صحت‌صنجی	واسنجی	صحت‌سنجی	واسنجی	ماه
۱۴۰۲	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۱	
R^2						
۰/۷۷	۰/۹۱	۰/۸۰	۰/۹۶	۰/۸۷	۰/۷۹	اردیبهشت
SE						
۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۱۵	۰/۰۸	۰/۰۴	۰/۰۳۳	اردیبهشت
RMSE						
۲/۶۲	۲/۳۶	۱/۸۲	۱/۱۷	۰/۲۶	۰/۲۳	اردیبهشت
NRMSE						
۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۶	۰/۱۰	۱/۷۶	۰/۲۴	اردیبهشت

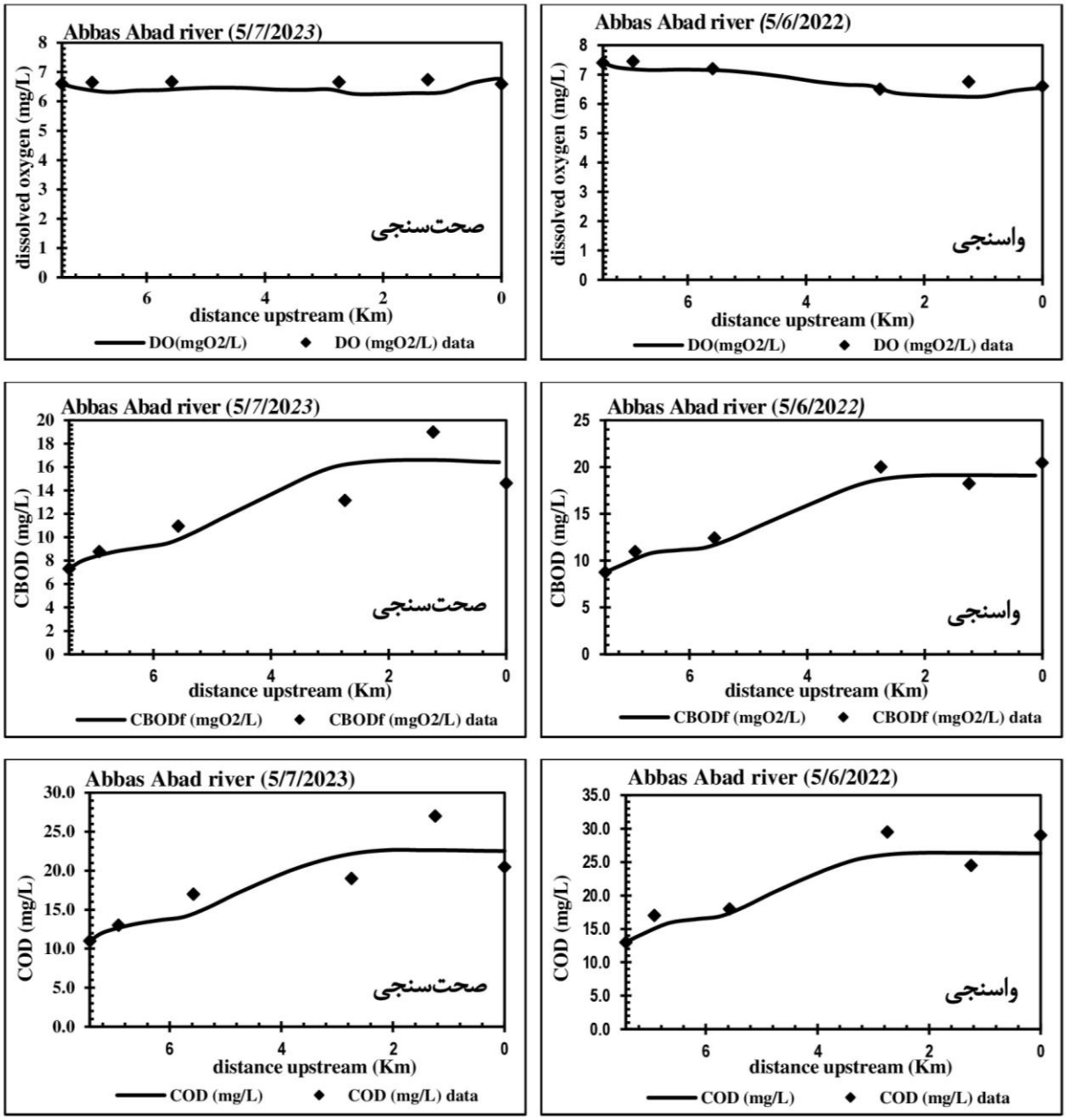
DO: نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2KW برای پارامتر DO نشان می‌دهد، شیب تند و سرعت بالای آب سبب هوادهی مناسب رودخانه شده است به‌طوری که روند تغییرات DO تقریبا یکنواخت بوده و به شکل خطی است و در حالت کلی کاهشی بوده ولی تغییرات زیادی ندارد. به‌عنوان نمونه مطابق قسمت صحت‌سنجی در شکل ۴ غلظت آن از مقدار ۶/۶۰ (در ابتدای مسیر رودخانه) به ۶/۴۶ میلی‌گرم در لیتر (در کیلومتر ۶/۹۲) تنزل پیدا کرده که به‌طور متوسط به‌میزان ۲/۱۲- درصد کاهش داشته است. از کیلومتر ۶/۹۲ تا محل تقسیم آب یک (در کیلومتر ۵/۵۸) اکسیژن محلول به‌میزان ۱/۱۱- درصد کاهش داشته که قابل‌ملاحظه نمی‌باشد، این‌امر می‌تواند به‌دلیل اضافه شدن آب شاخه فرعی تاریک‌دره در کیلومتر ۶/۹۲ به این رودخانه باشد که سبب افزایش دبی رودخانه شده است. در ادامه مسیر و تا کیلومتر ۲/۷۵ میزان اکسیژن به‌میزان ۰/۳۷ درصد افزایش یافته است که با توجه به شیب رودخانه در نقاط بالادست نشان‌دهنده هوادهی مناسب در رودخانه می‌باشد. اما مجددا از این نقطه تا محل تقسیم آب دو (در کیلومتر ۱/۲۵) این میزان به مقدار ۲/۰۲- درصد کاهشی بوده است. از این نقطه تا انتهای مسیر همان‌گونه که از شکل پیدا است به‌طور متوسط به‌میزان ۷/۷۱ درصد اکسیژن محلول افزایش داشته است. در حالت کلی می‌توان بیان نمود میزان اکسیژن محلول در بازه اول به‌میزان ۳/۲۱- درصد و در بازه دوم به‌میزان ۱/۶۶- درصد کاهش داشته است. درصد اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی برابر ۰/۳۷ و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۰/۵۷ است (جدول ۱). همچنین مقادیر R^2، SE، RMSE و NRMSE برای این پارامتر در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰.۷۹، ۰/۰۳۳، ۰/۲۳ و ۰/۲۴ است. برای مرحله صحت‌سنجی نیز این مقادیر به‌ترتیب ۰/۸۷، ۰/۰۴، ۰/۲۶ و ۱/۷۶ می‌باشد (جدول ۲). نتایج پژوهش‌های Sharma et al (2017)، Rafiee et al (2014) و ونائی و همکاران (۱۴۰۱) نیز نشان داد که این مدل قادر به شبیه‌سازی مجموعه گسترده‌ای از داده‌ها با خطاهای کم برای این پارامتر است.

BOD : در مورد BOD روند تغییرات متفاوت بوده و از مقدار حداقل به سمت مقادیر حداکثر تغییر نموده است. به‌عنوان نمونه مطابق قسمت صحت‌سنجی در شکل ۴ غلظت مربوطه از مقدار ۷/۳۰ (در ابتدای مسیر رودخانه) تا ۸/۰۶ میلی‌گرم در لیتر (در کیلومتر ۶/۹۲)، تغییر پیدا کرده است. که به‌طور متوسط به‌میزان ۱۰/۳۵ درصد افزایش داشته است. در ادامه مسیر با اضافه شدن آب شاخه فرعی تاریک‌دره وضعیت کیفی رودخانه به‌نسبت بهبود یافته و مانع افزایش سریع غلظت این پارامتر شده است. به‌طوری‌که از کیلومتر ۶/۹۲ (محل اضافه شدن آب شاخه فرعی تاریک‌دره) تا محل تقسیم آب یک (در کیلومتر ۵/۵۸) مقدار BOD به‌میزان ۱۷/۹۳ درصد

افزایش داشته که در مقایسه با ادامه مسیر رقم شاخصی نمی‌باشد. علت این امر را نیز می‌توان ورود کمتر آلودگی و همچنین دبی بیشتر رودخانه در فصل بهار دانست. از کیلومتر ۵/۵۸ (محل تقسیم آب ۱) به بعد، به‌دلیل برداشت آب و اضافه شدن فاضلاب در طول مسیر رودخانه، غلظت BOD در طی مسیر روند افزایشی به‌طور متوسط به‌میزان ۶۸/۸۴ درصد داشته است که تا کیلومتر ۲/۷۵ ادامه می‌یابد. مجدداً از این نقطه به بعد تا محل تقسیم آب دو (در کیلومتر ۱/۲۵)، غلظت BOD در فصل بهار افزایش اندکی به‌میزان ۳/۵۵ درصد داشته است. علت این امر نیز به‌دلیل آن است که اولا از این نقطه به بعد، هیچ‌گونه آلاینده نقطه‌ای وارد رودخانه نمی‌شود، ثانیاً دبی رودخانه در فصل تر قابل توجه می‌باشد که نشان از توان خودپالایی رودخانه دارد. از این نقطه تا انتهای مسیر همان‌گونه که از قسمت صحت‌سنجی شکل ۴ پیدا است به‌طور متوسط به‌میزان ۱/۱۷- درصد نیز غلظت این پارامتر کاهش داشته است. در حالت کلی می‌توان بیان نمود میزان غلظت BOD در بازه اول به‌میزان ۳۰/۱۳ درصد و در بازه دوم به‌میزان ۷۰/۸۴ درصد افزایش داشته است. درصد اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی برابر ۱/۱۶ و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۲/۰۹ است (جدول ۱). همچنین مقادیر R^2، SE، RMSE و NRMSE برای این پارامتر مورد بررسی در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۹۶، ۰/۰۸، ۱/۱۷ و ۰/۱۰ است. برای مرحله صحت‌سنجی نیز این مقادیر به‌ترتیب ۰/۸۰، ۰/۱۵، ۱/۸۲ و ۰/۱۶ می‌باشد (جدول ۲). نتایج فوق نشان می‌دهد شبیه‌سازی BOD توسط مدل، رضایت‌بخش بوده است. نتایج این پژوهش هم راستا با نتایج Kalburgi et al (2015) می‌باشد.

COD : به‌طور کلی میزان تغییرات COD و BOD نسبتاً مشابه بوده و نسبت به تغییرات DO بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر می‌باشد و از یک مقدار کمینه به مقدار بیشینه‌ای که چند برابر اولیه بوده است، ارتقاء می‌یابد. به‌عنوان نمونه در شکل ۵ غلظت COD از مقدار ۱۱ میلی‌گرم درلیتر (در ابتدای مسیر رودخانه) تا ۱۲/۱۲ میلی‌گرم در لیتر (در کیلومتر ۶/۹۲)، تغییر پیدا کرده است که به‌طور متوسط به‌میزان ۱۰/۱۹ درصد افزایش داشته است. نتایج تحقیقات حسین و همکاران (۲۰۱۴)، نیز نشان داد که افزایش مقدار COD به‌دلیل افزایش ورود آلاینده‌های صنعتی به رودخانه تونگاک است. همچنین نتایج قسمت صحت‌سنجی شکل ۴ نشان می‌دهد تغییرات غلظت COD مشابه تغییرات غلظت BOD می‌باشد. بدین صورت که در فصل تر از ابتدای مسیر تا کیلومتر ۶/۹۲، مقدار آن افزایش یافته است. در این نقطه اضافه شدن آب شاخه فرعی تاریک‌دره مانع افزایش قابل ملاحظه غلظت این پارامتر می‌گردد. به‌طوری‌که از کیلومتر ۶/۹۲ (محل اضافه شدن آب شاخه فرعی تاریک‌دره) تا محل تقسیم آب یک (در کیلومتر ۵/۵۸) مقدار BOD به‌میزان ۱۶/۱۱ درصد افزایش داشته است. کوهستانی بودن منطقه، شیب تند رودخانه، تغییرات دبی و درجه حرارت پایین از جمله عواملی است که باعث هوادهی مناسب رودخانه در فصول بهار شده است و با وجود تمرکز بیشتر منابع آلاینده در ابتدای مسیر، رودخانه دارای ظرفیت خودپالایی مناسبی می‌باشد. از کیلومتر ۵/۵۸ (محل تقسیم آب ۱) به بعد، به‌دلیل برداشت آب و اضافه شدن فاضلاب در طول مسیر رودخانه، غلظت COD تا کیلومتر ۲/۷۵ روند افزایشی به‌میزان ۵۵/۸۴ درصد داشته است. مجدداً از این نقطه به بعد تا محل تقسیم آب دو (در کیلومتر ۱/۲۵)، غلظت COD در فصل بهار به‌میزان ۳/۵۵ درصد افزایش داشته که قابل ملاحظه نمی‌باشد. از این نقطه تا انتهای مسیر همانگونه که از قسمت صحت‌سنجی شکل ۴ مشخص است به‌میزان ۰/۴۶- درصد غلظت این پارامتر کاهش داشته است که مقدار شاخصی نمی‌باشد. در حالت کلی می‌توان عنوان نمود میزان غلظت COD در بازه اول به‌میزان ۲۷/۹۴ درصد و در بازه دوم به‌میزان ۶۰/۸۱ درصد افزایش داشته است. درصد اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی برابر ۱/۵۵ و در مرحله صحت‌سنجی برابر ۲/۰۴ است (جدول ۱). همچنین مقادیر R^2، SE، RMSE و NRMSE برای این پارامتر مورد بررسی در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۰/۹۱، ۰/۱۱، ۲/۳۶ و ۰/۱۴ است. برای مرحله صحت‌سنجی نیز این مقادیر به‌ترتیب ۰/۷۷، ۰/۱۵، ۲/۶۲ و ۰/۱۶ می‌باشد

(جدول ۲). نتایج فوق نشان می‌دهد شبیه‌سازی COD توسط مدل، رضایت‌بخش بوده است. این نتایج نشان-دهنده شبیه‌سازی مناسب پارامتر COD توسط مدل است. نتایج این پژوهش با نتایج حسین و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد.



شکل (۴): واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2KW برای پارامترهای DO، BOD و COD (میلی‌گرم در لیتر) در رودخانه عباس‌آباد همدان

ظرفیت خودپالایی:

به‌منظور تعیین میزان خودپالایی، میزان بار ورودی تعیین گردید. به همین منظور بار ورودی تا زمانی که استاندارد تعریف شده جهت استفاده مورد نظر نقض نشود، افزایش می‌یابد. در مواردی که بار ورودی بیش از مقدار تعیین شده (براساس استاندارد مورد نظر باشد)، مقدار آن براساس استاندارد کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه در بازه‌های مربوطه در رودخانه در جدول ۳ ارایه شده است. براساس نتایج ارایه شده در این جدول، برای مصارف شرب، مقادیر BOD و COD نه تنها امکان افزایش بار ورودی وجود ندارد بلکه به‌ترتیب تا میزان ۴۹ درصد و ۳۲ درصد نیز باید کاهش یابند تا هنوز از نظر استانداردهای شرب قابل قبول باشند. لازم به ذکر است که این امر با توجه به موقعیت و محل برداشت آب از رودخانه جهت مصارف شرب (بازه اول) می‌باشد. چنانچه در آینده محل برداشت آب شرب تغییر یابد، این ارزیابی معتبر نخواهد بود. همچنین از نظر مصارف کشاورزی، چنانچه مقادیر BOD و COD به‌ترتیب تا میزان ۳/۴۵ و ۵/۸۶ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای کشاورزی قابل قبول خواهند بود. همانگونه که قبلاً نیز بیان شد این امر با توجه به موقعیت و محل برداشت آب از رودخانه جهت مصارف کشاورزی (بازه دوم) معتبر می‌باشد. نتایج این پژوهش با نتایج (Irsanda et al., 2014; Salvai and Bezdan, 2008) همراستا می‌باشد. در مجموع می‌توان ذکر کرد که این رودخانه برای مقادیر BOD و COD به‌ترتیب توان پذیرش ۲۲۲۹/۰۶ کیلوگرم در روز و ۴۴۴۷/۸۹ کیلوگرم در روز بار آلودگی می‌باشد.

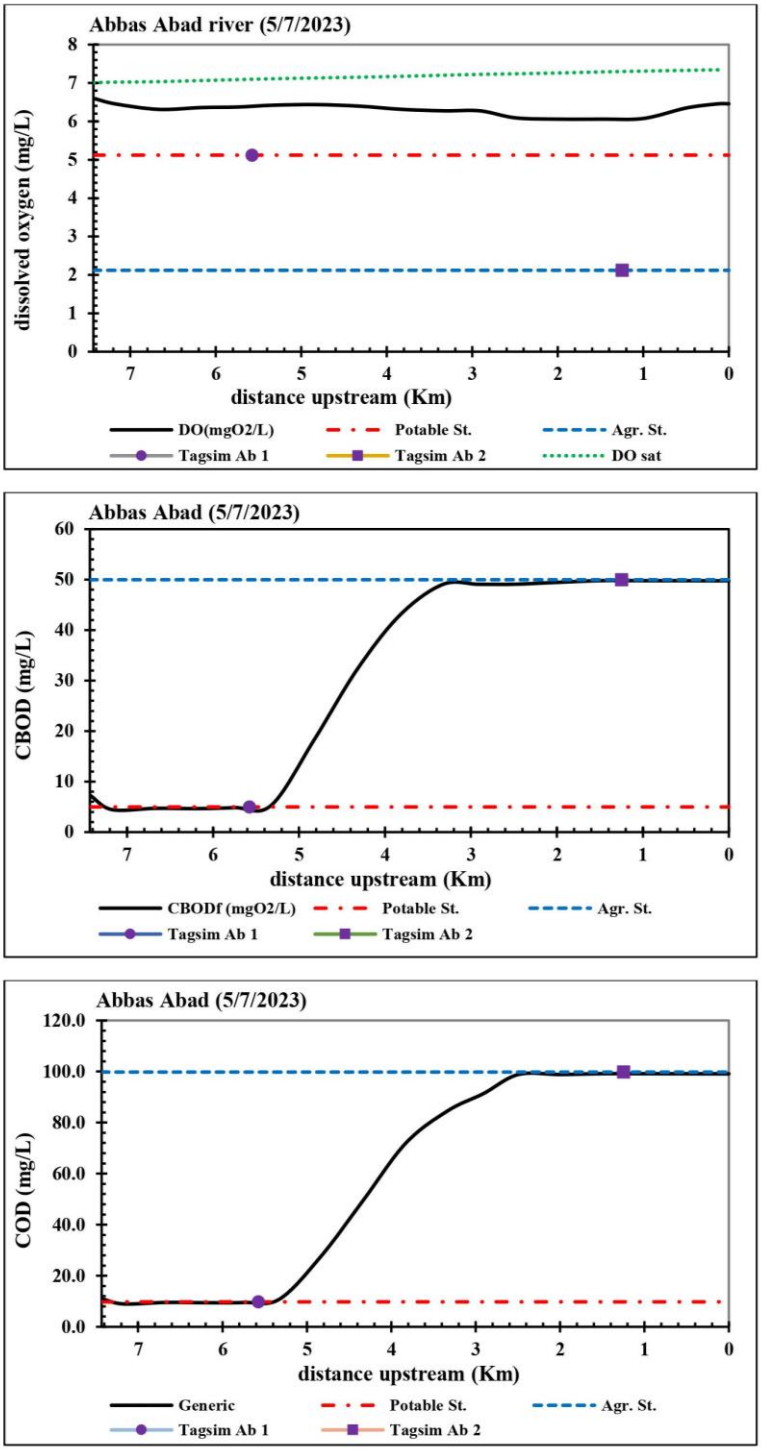
جدول (۳): تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه(kg/day)

COD	BOD	*بازه اول
۶۶۸/۳۰	۴۵۱/۰۴	بارگذاری فعلی
-۲۱۵/۲۵	-۲۲۰/۸۷	ظرفیت مازاد
۴۵۳/۰۵	۲۳۰/۱۷	ظرفیت خودپالایی
COD	**BOD**	**بازه دوم**
۵۸۲/۶۰	۴۴۹/۴۳	بارگذاری فعلی
۳۴۱۲/۲۴	۱۵۴۹/۴۵	ظرفیت مازاد
۳۹۹۴/۸۴	۱۹۸۸/۸۹	ظرفیت خودپالایی
COD	**BOD**	**کل رودخانه**
۱۲۵۰/۹۰	۹۰۰/۴۷	بارگذاری فعلی
۳۱۹۶/۹۹	۱۳۲۸/۵۸	ظرفیت مازاد
۴۴۴۷/۸۹	۲۲۲۹/۰۶	ظرفیت خودپالایی

* بازه اول محل برداشت آب جهت شرب، ** بازه دوم محل برداشت آب جهت مصارف کشاورزی

مطابق با شکل ۵، نمودارهای آستانه مجاز پارامترهای مورد بررسی در دو بازه شرب و کشاورزی در طول رودخانه، ترسیم شده‌اند. براساس این نمودارها و با توجه به افزایش میزان غلظت آلاینده‌ها در محل ورود به رودخانه، به‌منظور محاسبه توان خودپالایی آن، به‌دلیل کوهستانی بودن منطقه و شیب مناسب رودخانه، هوادهی به‌خوبی انجام یافته است، به‌نحوی که نمودار اکسیژن محلول در بازه شرب، به‌جهت کاهش غلظت آلاینده‌ها تغییر محسوسی نداشته، همچنین در ادامه مسیر نیز با وجود کاهش شیب رودخانه و برداشت آب در محل تقسیم آب یک، برای مصارف شرب، میزان اکسیژن محلول به‌میزان اندکی روند کاهشی پیدا نموده است. درخصوص پارامترهای BOD و COD در بازه شرب با کاهش بار آلاینده نقطه‌ای، مشخص شد که پارامترهای کیفی آب رودخانه تا حد زیادی قابل کنترل است، این نتایج همراستا با نتایج Goodarzi et al (2023) و Patel and

Jariwala (2023) می‌باشد. همچنین برای پارامتر BOD و COD بیشترین بار وارده براساس استاندارد کشاورزی در محل تقسیم آب دو، به‌میزان ۴۹/۸۰ میلی‌گرم در لیتر و ۹۹/۱۵ میلی گرم در لیتر در کیلومتر ۱/۵ محاسبه شد.



شکل (۵): نمودارهای بررسی آستانه مجاز پارامترهای مورد بررسی در طول رودخانه

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر معیارهای کیفی آب شامل اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و شیمیایی در رودخانه عباس‌آباد همدان که رودخانه‌ای کوهستانی شیب‌دار می‌باشد، توسط مدل QUAL2KW مورد بررسی قرار گرفت. هدف بررسی حداکثر توان رودخانه در پذیرش آلودگی با رعایت استانداردها و معیارهای کیفی و آلودگی برای پارامترهای DO، BOD و COD بوده است. بر اساس نتایج روند تغییرات اکسیژن محلول در طول مسیر تقریبا یکنواخت بوده و به‌صورت خطی است و نوسانات اندکی دارد که می‌تواند به‌دلیل شیب زیاد و هوادهی مناسب رودخانه باشد. تغییرات BOD و COD نسبتاً مشابه هم بوده و نسبت به تغییرات اکسیژن محلول به‌طور قابل توجه‌ای بیشتر می‌باشد به‌نحوی‌که از یک مقدار مینیمم به مقدار ماکزیمم که چند برابر مقدار اولیه بوده افزایش می‌یابد. نتایج ونائی و همکاران (۱۴۰۱) نیز موید این مورد می‌باشد. همچنین برای تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه و حداکثر بار کل روزانه از فرایند TMDL استفاده شد. براساس نتایج، برای مصارف شرب، نه تنها امکان افزایش بار ورودی برای مقادیر BOD و COD امکان‌پذیر نمی‌باشد بلکه این مقادیر می‌بایست به‌ترتیب به میزان ۴۹ درصد و ۳۲ درصد نیز کاهش یابند تا از نظر استانداردهای شرب قابل قبول باشند. اما از نظر مصارف کشاورزی این این روند متفاوت بوده و چنانچه مقادیر BOD و COD به‌ترتیب تا میزان ۳/۴۵ و ۵/۸۶ برابر افزایش یابند، هنوز از نظر استانداردهای کشاورزی قابل قبول خواهند بود. همچنین این مدل می-تواند جهت تعریف سناریوهای مدیریتی برای منطقه مورد مطالعه در آینده با موفقیت استفاده شود. نتایج مدل‌سازی برای رسیدن به اهداف مدیریتی بویژه در مناطقی که به‌طور معمول رودخانه‌ها با کمبود شدید داده مواجه می¬باشند، کاملا قابل قبول می‌باشد. نتایج تحقیقات ونائی و همکاران (۱۳۹۶، الف) نیز هم راستا با این نتایج می‌باشد. با این حال می‌توان، نتایج بهتری از طریق نظارت دقیق با افزایش تعداد نمونه‌برداری‌ها در طول روز، ایجاد ایستگاه‌های پایش مداوم در برنامه نظارت و اضافه کردن متغیرهای ورودی مختلف در طول زمان و همچنین کنترل تخلیه آلاینده‌ها به‌دست آورد.

منابع

رفیعی، غ. ر.، ف. معزی، ه. پورباقر، ک. رضایی توابع و م. ع. نعمت‌اللهی. ۱۴۰۲. ارزیابی شاخص‌های کیفیت آب و تعیین ظرفیت خودپالایی در رودخانه‌های بالیقلی‌چای و قره‌سو با بکارگیری مدل QUAL2Kw. نشریه محیط زیست و مهندسی آب، سال نهم، شماره ۳، ص ۳۳۵-۳۵۱.

سازمان حفاظت محیط زیست. ۱۳۹۰. استاندارد کیفیت آب‌های ایران. ۱۴صفحه.

شکری، س.، ع. هوشمند و ه. معاضد. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی کیفی آمونیوم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدل QUAL2KW. فصلنامه علمی پژوهشی اکوبیولوژی تالاب- دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز، سال هفتم، شماره ۲۳، ص ۶۸-۵۷.

عظیمی، م.م.، ا. غواصیه، س. ح. هاشمی و س. برکتین. ۱۳۸۹. ارزیابی قدرت خودپالایی رودخانه به کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیفی (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)، همایش ملی آب با رویکرد آب پاک. دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباس پور).

علی‌پور نصیرمحله، ف و م. رادفر. ۱۴۰۲. مدل‌سازی و بررسی روند آلودگی سالیانه نیترات رودخانه تجن با QUAL2Kw و HEC-RA. علوم و مهندسی آبیاری، DOI: 10.22055/JISE.2023.43193.2060

فلاح، م.، م. زلقی، ع. افروس و غ.ر. میرزاوند. ۱۴۰۲. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه سالند با استفاده مدلQUAL2K. فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب، سال دوازدهم، شماره ۳۷، ص ۴۷-۶۳.

نوشادی، م و م. ر. حاتمی‌زاده. ۱۳۸۹. اندازه‌گیری و شبیه‌سازی کیفی رودخانه کر با استفاده از مدل QUAL2K. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، سال چهارم، شماره ۳، ص ۳۳۸-۳۴۹.

وزارت نیرو. ۱۳۸۴. مطالعات نیمه‌تفصیلی منابع آب دشت همدان – بهار، گزارش هیدرولوژی، شرکت سهامی آب منطقه‌ای همدان.

ونائی، ع و ص. معروفی. ۱۳۹۶. ب. بررسی خودپالایی و شبیه سازی تغییرات نیتروژن و فسفر در طول رودخانه عباس آباد همدان با استفاده از نرم افزار QUAL2KW. مهندسی آبیاری و آب ایران، سال هشتم، شماره ۳۰، ص ۱۷۲-۱۸۶.

ونائی، ع.، ص. معروفی و آ. آذری. ۱۳۹۶. الف. بررسی خودپالایی بازه کوهستانی رودخانه عباس آباد همدان، مجله محیط شناسی. سال چهل و سوم، شماره ۴، ص ۷۴۲-۷۲۷.

ونائی، ع.، ص. معروفی و آ. آذری. ۱۴۰۱. شبیه‌سازی آلودگی در رودخانه‌های پرشیب کوهستانی با استفاده از مدل QUAL2KW. علوم و مهندسی آبیاری، سال چهل و پنجم، شماره ۱، ص ۱۹-۳۴.

Ain, C., S. Rudiyanti and H.P. Sari. 2019. Purification capacity and oxygen sag in Sringin River, Semarang. International Journal of Applied Environmental Sciences, 14(1): 1-16.

Akpen, G.D., E.J. Ekanem and J.C. Agunwamba. 2016. The Effects of Sewage Effluent Discharges on the Water Quality of Wupa River in Abuja, Nigeria. Journal of Science and Technology, 36(2): 86-95.

Angello, Z.A., B.M. Behailu and J. Tränckner. 2021. Selection of optimum pollution load reduction and water quality improvement approaches using scenario-based water quality modeling in little Akaki River. Ethiopia. Water, 13(5): 584.

Areeyaenezhad, R., M. Sarai Tabrizi and H. Babazadeh. 2019. Modeling water quality of rivers using QUAL2Kw model (case study: Shahroud River). Journal of Environmental Science and Technology, 21(7): 1-13.

Cox, B.A. 2003. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. Science of the total environment, 314: 335-377.

Fan, C., K.H. Chen and Y.Z. Huang. 2021. Model-based carrying capacity investigation and its application to total maximum daily load (TMDL) establishment for river water quality management: A case study in Taiwan. Journal of Cleaner Production, 291: p.125251.

Farkhani, S. 2021. Investigating the Quality Status of Haraz River Using Numerical Modeling. Iran-Water Resources Research, 17(1): 262-276. (In Persian)

Goodarzi, M.R., Niknam, A.R.R, S.H. Rahmati and A. Fatehifar. 2023. Evaluation of the effects of climate change and pollution discharge scenario on the quality of Dez River using the QUAL2Kw model. Environmental Earth Sciences, 82(20):.479.

Haider, H., W. Al and S. Haydar. 2013. A review of dissolved oxygen and biochemical oxygen demand models for large rivers. Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences, 9(12): 127-142.

Hoseini, Y. 2019. Study the self purification Capacity and Water quality of Qarahsoo River Using Qual2kw and NSFWQI Models. Journal of Wetland Ecobiology, 11(3): 41-60. (In Persian).

Hossain, M.A., Sujaul, I.M. and M.A. Nasly. 2014. Application of QUAL2Kw for water quality modeling in the Tunggak River, Kuantan, Pahang, Malaysia. Research Journal of Recent Sciences, 3(6): 6-14.

International Water Management Institute (IWMI). 2004. IWMI Annual report 2003-2004. Colombo, Sri Lanka. International Water Management Institute (IWMI), 49p.

Irsanda, P.G.R., N. Karnaningroem and D. Bambang. 2014. Analisis Daya Tampung Beban Pencemaran Kali PelayaranKabupaten Sidoarjo Dengan Metode Qual2kw. Jurnal Teknik ITS, 3(1): D47-D52.

Juwana, I., A. Sodri, N. Muttil, R.R. Hikmat, A.L. Indira and A.D. Sutadian 2024. Potential Pollution Loads of the Cikembar Sub-Watershed to the Cicatih River, West Java, Indonesia. Water, 16(2): 256.

Kalburgi, P.B., R.N. Shareefa and U.B. Deshannavar .2015. Development and evaluation of BOD–DO Model for River Ghataprabha near Mudhol (India), using QUAL2K. I.J Engineering and Manufacturing, 5(1): 15-25.

Khalili, R., M. Parvinnia and H. Motaghi. 2020. Evaluation of Bashar River water quality using CCME water quality index. Journal of Environmental Science Studies, 5(3): 2807-2814.

Lindenschmidt, K.E. 2006. The effect of complexity on parameter sensitivity and model uncertainty in river water quality modelling. Ecological Modelling, 190(1-2): 72-86.

Mahamah, D.S. 1998. Simplifying assumptions in water quality modeling. Ecological modelling, 109(3): 295-300.

Ng, A.W.M., B.J.C. Perera and D.H. Tran. 2006. Improvement of river water quality through a seasonal effluent discharge program (SEDP). Water, air, and soil pollution, 176:113-137.

Nikakhtar, M., S. Rahmati and Massah A. Bovani. 2020. Simulating of Surface Water Quality Using QUAL2KW (Ardak River, Khorasan Razavi Province). Journal of Environmental Science and Technology, 21(11 (90)): 93-105. (In Persian).

Nufutomo, T.K., B.S. Muntalif, H.D. Ariesyady and A. Sudradjat. 2023. Water Quality Analysis Using QUAL2Kw Model During the Rainy Season and Dry Season in Upper Citarum Watershed, West Java, Indonesia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1239(1): 012008.

Patel, H.B. and N.D. Jariwala. 2023. Analysis of Pollutant Load Carrying Capacity of the River Tapi Using QUAL2Kw for Surat City. Journal of Environmental Protection, 14(2): 96-107.

Rafiee, M., A.M. Akhond Ali, H. Moazed, S.W. Lyon, N. Jaafarzadeh and B. Zahraie. 2014. A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. Journal of hydraulic structures, 1(2): pp.10-22. (In Persian).

Rosgen, D.L. 1996. Applied river morphologe. Printed in the United States of America, 378 p.

Salvai, A and A. Bezdan. 2008. Water quality model QUAL2K in TMDL development. Balwois Ohrid, Republic of Macedonia, 27: 1-8.

Setiawan, A.D., M. Widyastuti and M.P. Hadi. 2018. Water quality modeling for pollutant carrying capacity assessment using Qual2Kw in Bedog river. The Indonesian Journal of Geography, 50(1): 49-56.

Sharma, D., A. Kansal and G. Pelletier. 2017. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. Applied Water Science, 7: 1535-1559.

Tharme, R.E. 2003. A global perspective on environmental flow assessment: emerging trends in the development and application of environmental flow methodologies for rivers. River research and applications, 19(5-6): 397-441.

Ye, H., S. Guo, F. Li and Li. G. 2013. Water quality evaluation in tidal river reaches of Liaohe River estuary, China using a revised QUAL2K model. Chinese Geographical Science, 23: 301-311.

Zhang, H.X. and L.A. Fillmore. 2003. Is the TMDL on targer? Water Environ Technol, 15:27–31.

Zhang, Y., H. Yang and Z. Wang. 2016. Simulating water quality of Wei River with QUAL2K model, a case study of Hai River Basin in China. In MATEC Web of Conferences, 68: 14005. EDP Sciences.