



## Impact assessment of the Ahvaz sewage master plan on water quality of the Karun River using QUAL2Kw model

Fariba Khodabakhshi<sup>1</sup> | Hamed Mazandarani Zadeh<sup>2</sup>

1. Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [fariba.khodabakhshi@gmail.com](mailto:fariba.khodabakhshi@gmail.com)

2. Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. E-mail: [mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mazandaranzadeh@eng.ikiu.ac.ir)

---

### Article Info

**Article type:** Research Article

**Article history:**

**Received:** July. 18, 2024

**Revised:** Aug. 14, 2024

**Accepted:** Sep. 7, 2024

**Published online:** Dec. 2024

**Keywords:**

Karun River,  
Ahvaz Comprehensive Sewage  
Plan,  
Water Quality,  
QUAL2Kw Model.

---

### ABSTRACT

Despite its significant importance, the Karun River is under serious threat from pollution caused by urban and industrial wastewater. Given the river's critical role in supplying drinking water, supporting agriculture, and facilitating industrial activities, maintaining its water quality is of vital importance. This study investigates the impact of the Ahvaz comprehensive sewage plan on the water quality of the Karun River using qualitative modeling. In this research, the QUAL2Kw model was employed to simulate water quality changes along a 28-kilometer stretch of the river. After validating the model, various wastewater management scenarios were examined, including the current situation, the operation of the eastern treatment plant, the expansion of the western treatment plant, full implementation of the Ahvaz comprehensive sewage plan, and drainage control measures. The results showed that the full implementation of the Ahvaz comprehensive sewage plan significantly improves water quality by reducing pollutants such as BOD, ammonium, organic and inorganic phosphorus. For instance, BOD concentration decreased from 6.1 to 2.6 mg/L, organic nitrogen concentration from 425 to 234 µg/L, organic phosphorus concentration from 135 to 35 µg/L, inorganic phosphorus concentration from 251 to 0.23 µg/L, and dissolved oxygen concentration increased from 5.55 to 6.79 mg/L. Additionally, controlling agricultural drainage also had a positive effect by reducing nitrate concentrations, EC, and enhancing overall water quality. This study demonstrates that proper and comprehensive wastewater management, especially in densely populated urban areas, can significantly improve river water quality.

---

Cite this article: Khodabakhshi, F., & Mazandarani Zadeh, H. (2024) Impact Assessment of the Ahvaz sewage master plan on water quality of the Karun River using QUAL2Kw model, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 55 (10), 1761-1785. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379576.669757>

© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.



DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379576.669757>

---



## EXTENDED ABSTRACT

### Objective

The Karun River, located in southwestern Iran, is susceptible to pollution from urban and industrial wastewater. Given the vital role of the Karun River in providing drinking water, agricultural use, and industrial activities, its water quality is of critical importance. The aim of this research is to investigate the water quality of the Karun River and the impact of the comprehensive urban wastewater project in Ahvaz on its water quality parameters. This study focuses on assessing spatial variations in water quality trends under different scenarios of wastewater management, including current conditions, operation of the East wastewater treatment plant, completion of the West wastewater treatment plant capacity, full implementation of the comprehensive urban wastewater project in Ahvaz, and controlling drainage inputs.

### Methodology

In this study, the QUAL2Kw model, a one-dimensional computer model for simulating water quality in rivers, was employed to investigate the water quality of the Karoun River. Data on flow, depth, velocity, temperature, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), BOD, organic nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate, organic phosphorus, inorganic phosphorus, alkalinity, and pH were collected at four stations along the Karoun River. August 2018 data were used for model calibration and September 2018 data were used for model validation. The accuracy of the model was evaluated using the RMSE, MAPE, and PBIAS error indices. After confirming the validity and accuracy of the model in the calibration and validation stages, the developed model was used to investigate different scenarios in the Karoun River. Considering the construction of wastewater treatment plants and the possibility of eliminating wastewater inputs into the river, the water quality in the downstream reach of the river was examined under different wastewater input scenarios.

### Findings

The results indicated that the QUAL2Kw model satisfactorily simulated both hydraulic parameters (depth, velocity, flow rate) and quality parameters (EC, DO, BOD, organic nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate, alkalinity, pH). The water quality of the Karun River deteriorates for all parameters as it moves from upstream to downstream. The main factors affecting water quality are the discharge of urban and industrial wastewater, agricultural drainage, and agricultural activities. Additionally, the impact of the comprehensive wastewater plan for Ahvaz was examined under various scenarios, with results showing a significant improvement in river water quality upon full implementation of the plan.

### Conclusion

Based on the findings of this study, the QUAL2Kw model is an efficient tool for simulating the water quality of the Karun River. The results indicate that the water quality of the Karun River is in a poor state, necessitating effective measures to control and reduce pollutants entering the river. Implementing the comprehensive wastewater plan for Ahvaz and controlling drainage systems could significantly reduce the concentrations of pollutants such as BOD, nitrate, nitrite, ammonium, phosphorus, and heavy metals in the Karun River. Consequently, the implementation of this plan would improve water quality and mitigate environmental threats. Therefore, it is recommended that the implementation of this plan be pursued seriously and that necessary actions be taken to enhance the water quality of the Karun River.

### Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

### Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

### Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the financial support of the Iran National Science Foundation (INSF), Grant No. 4024661, and Imam Khomeini International University (IKU) for conducting this research.

### Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

### Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

## ارزیابی اثر طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از مدل QUAL2Kw

فریبا خدابخش<sup>۱</sup> | حامد مازندرانی زاده<sup>۲</sup> ✉<sup>۱</sup> گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [fariba.khodabakhshi@gmail.com](mailto:fariba.khodabakhshi@gmail.com)<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. رایانامه: [mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir](mailto:mazandaranizadeh@eng.ikiu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رودخانه کارون، با وجود اهمیت فراوان، در معرض تهدید جدی آلودگی ناشی از فاضلاب‌های شهری و صنعتی قرار دارد. با توجه به نقش حیاتی کارون در تأمین آب آشامیدنی، مصارف کشاورزی و فعالیت‌های صنعتی، کیفیت آب این رودخانه از اهمیتی حیاتی برخوردار است. این مطالعه به بررسی تأثیر طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از مدل‌سازی کیفی می‌پردازد. در این تحقیق، از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی تغییرات کیفی آب در ۲۸ کیلومتر از مسیر رودخانه استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی مدل، سناریوهای مختلف مدیریت فاضلاب شامل وضعیت فعلی، راه‌اندازی تصفیه‌خانه شرق، تکمیل ظرفیت تصفیه‌خانه غرب، اجرای کامل طرح جامع فاضلاب شهر اهواز، به‌طور چشمگیری کیفیت آب را با کاهش قابل توجه آلاینده‌هایی مانند BOD، آمونیوم، فسفر آلی و غیر آلی، بهبود می‌بخشد به‌طوری‌که غلظت BOD از مقدار ۶/۱ به ۲/۶ میلی‌گرم بر لیتر، غلظت پارامتر نیتروژن آلی از ۴۲۵ به ۲۳۴ میکروگرم بر لیتر، غلظت پارامتر فسفر آلی از ۱۳۵ به ۳۵ میکروگرم بر لیتر، غلظت پارامتر فسفر غیر آلی از ۲۵۱ به ۰/۲۳ میکروگرم بر لیتر و غلظت پارامتر اکسیژن محلول از ۵/۵۵ به ۶/۷۹ میلی‌گرم بر لیتر بهبود می‌یابد. همچنین، کنترل زه آب‌های کشاورزی نیز تأثیر مثبتی بر کاهش غلظت نترات، EC و ارتقای کیفیت آب دارد. در این مطالعه نشان داده شده است که مدیریت صحیح و جامع فاضلاب، به‌ویژه در مناطق شهری پرجمعیت، می‌تواند به‌طور قابل توجهی کیفیت آب رودخانه‌ها را بهبود بخشد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۸	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۵/۲۴	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۱۷	
تاریخ انتشار: دیماه ۱۴۰۳	
واژه‌های کلیدی: رودخانه کارون، طرح جامع فاضلاب شهر اهواز، کیفیت آب، مدل QUAL2Kw.	

استناد: خدابخش، فریبا، مازندرانی زاده؛ حامد، (۱۴۰۳) ارزیابی اثر طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از مدل QUAL2Kw، مجله

<https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379576.669757>، ۱۷۶۱-۱۷۸۵، (۱۰)، ۵۵

© نویسنده‌گان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2024.379576.669757>

## مقدمه

آب یکی از ضروری‌ترین منابع تداوم حیات است. حجم زیادی از پساب‌های کشاورزی، شهری و صنعتی به رودخانه‌های سرتاسر جهان تخلیه می‌شود. این تخلیه پساب‌های تجزیه‌پذیر در بدنه‌های آبی منجر به کاهش کیفیت آب می‌شود. با توجه به مسئله تخلیه فاضلاب، مدیریت کیفیت منابع آب و پیش‌بینی تأثیر آلاینده‌ها بر آن‌ها حائز اهمیت است. برای داشتن آبی باکیفیت مطلوب، ظرفیت پذیرش رودخانه‌ها باید در طول رودخانه در حد قابل قبول باقی بماند (Sarda & Sadgir, 2005). ظرفیت تحمل آلاینده‌ها در گذر زمان و مکان و همچنین با توجه به نوع و شدت آلاینده‌ها متفاوت است (Campolo, et al., 2002). با توجه به تنوع و تعدد منابع آلودگی و همچنین متغیر بودن توان خود پالایی رودخانه‌ها، اعمال استانداردهای تخلیه فاضلاب به‌تنهایی کافی نیست. در کنار این استانداردها، متناسب‌سازی میزان بارگذاری آلاینده‌ها با توان خود پالایی هر رودخانه بر اساس شرایط اقلیمی - هیدرولوژیکی، هندسی و همچنین ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و سیاسی، با در نظر گرفتن استانداردهای کیفیت آب و کاربری آن رودخانه، امری ضروری است (Moghimini Nezaad, et al., 2018).

از آنجاکه حفاظت کیفی رودخانه‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری‌های اضافی برای تصفیه پساب‌ها یا ایجاد سیستم‌های جمع‌آوری و کنترل زهاب‌ها دارد و همچنین ممکن است سبب محدود کردن توسعه فعالیت‌ها در حوضه رودخانه شود، آثار اقتصادی قابل توجهی می‌تواند داشته باشد؛ بنابراین وجود ابزاری مانند یک مدل ریاضی برای نشان دادن وضعیت موجود و محدودیت‌های لازم برای دستیابی به استانداردهای کیفی موردنظر، برای تصمیم‌گیران ضروری به نظر می‌رسد (Khan, et al., 2017). در این زمینه تحقیقات زیادی در کشورهای مختلف جهان صورت گرفته است. بررسی کیفیت آب در حوضه آبریز رودخانه Kaoping در تایوان با استفاده از مدل کیفیت آب WASP نشان داد که ذرات معلق به‌ویژه در بالادست حوضه و در فصل‌های پر بارش، نقش مهمی در شاخص کیفیت آب رودخانه دارند. فرسایش خاک فصل‌های پر بارش، باعث افزایش غلظت ذرات معلق می‌شود و جریان رودخانه نیز آلاینده‌ها و نیتروژن آمونیاکی را از منابع غیر نقطه‌ای در بالادست رودخانه حمل می‌کند. این مطالعه نشان داد که بین سرعت جریان رودخانه، کیفیت آب و شاخص آلودگی، ارتباط مستقیمی وجود دارد (Lai, et al., 2013).

بررسی کیفی رودخانه کرخه با استفاده از مدل QUAL2Kw با استفاده از شاخص WQI نشان داد در طول مسیر رودخانه به دلیل تخلیه آلاینده‌ها، کیفیت آب به‌شدت کاهش می‌یابد به‌نحوی که در فصل تابستان کیفیت آب تا رده متوسط نزول پیدا می‌کند و با حذف آلاینده‌ها می‌توان وضعیت رودخانه را تا حد چشمگیری بهبود بخشید (Abdolkhani, et al., 2015). ارزیابی کیفیت آب رودخانه کارون با استفاده از شاخص کیفیت آب WQI و مدل‌سازی سری زمانی بین سال‌های ۸۶ تا ۹۱ نشان داد با اتصال رودخانه دز، شاخص کیفیت آب کاهش پیدا می‌کند که می‌تواند بیانگر پایین بودن کیفیت آب رودخانه دز به دلیل ورود آلودگی به آن در پایین دست ایستگاه دزفول باشد و انجام اقدامات کنترلی را در این رودخانه ضروری می‌سازد (Moravej, et al., 2017). از دیگر پژوهش انجام شده می‌توان به مطالعه (Lusiana, et al., 2020) اشاره کرد که با استفاده از مدل QUAL2Kw به بررسی کیفی و همچنین تعیین سطح آلودگی با استفاده از شاخص آلاینده و ظرفیت بار آلودگی در رودخانه برانتاس<sup>۱</sup> پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۱۰ منطقه از ۱۲ منطقه نمونه‌برداری، سطح آلودگی پایینی تولید کرده‌اند، درحالی‌که بقیه دارای سطح آلودگی متوسط هستند. آلاینده‌ترین، آلاینده موجود در رودخانه برانتاس به ترتیب BOD، نترات، آمونیاک و فسفات بود. بررسی تغییرات کیفی رودخانه نکا در بازه ۸ کیلومتری با استفاده از مدل QUAL2Kw نشان داد که غلظت اکسیژن محلول به دلیل شرایط مناسب رودخانه برای هوادهی و وجود آبشارهای طبیعی و مصنوعی در سطح بالایی قرار دارد (Emami Ghara, et al., 2023). همچنین بندهای انحرافی و ماندابی آب در پشت آن‌ها، زمان تجزیه مواد آلی را افزایش داده و منجر به افزایش قلیایی و pH در آن منطقه شده است. به‌طور کلی تأثیر ورود هر ماده آلاینده به آب رودخانه بستگی مستقیم به مقدار غلظت آن پارامتر در پساب، دبی پساب خروجی و نیز شرایط فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و هیدرولیکی دارد (Jafarzadeh- Haghghi, et al., 2005).

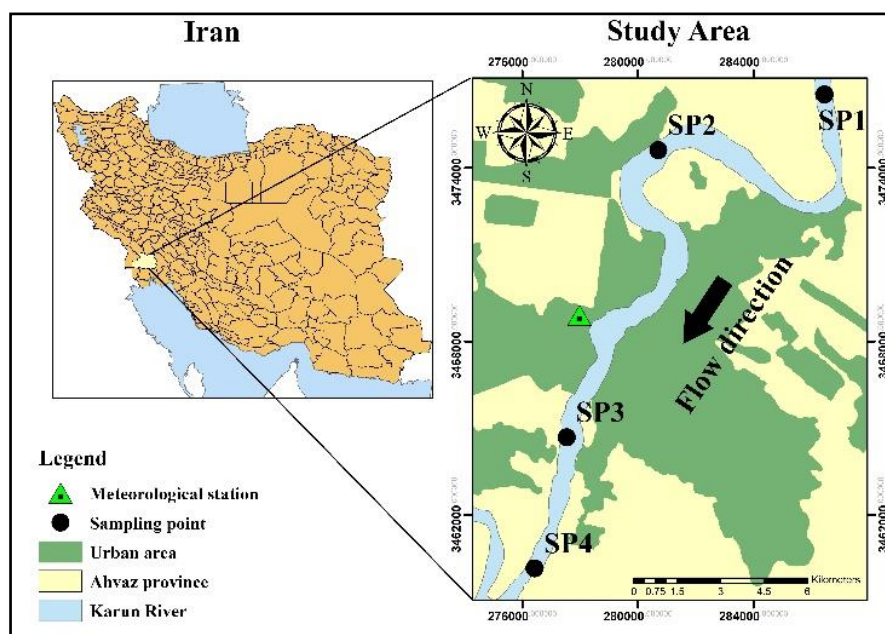
با توجه به نقش حیاتی رودخانه کارون در تأمین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعت شهر اهواز و درعین حال افزایش ورود فاضلاب‌های صنعتی و شهری و کشاورزی به این رودخانه، بررسی کیفیت رودخانه کارون به‌عنوان موضوع پژوهش حاضر انتخاب شده است. بررسی مطالعات گذشته نشان می‌دهد تاکنون مطالعات کیفی قابل قبولی بر روی رودخانه کارون انجام شده است، (Maddi-Niya, et al., 2014)، (Moravej, et al., 2017)، (Moghimini Nezaad, et al., 2018)، (Shafiee, et al., 2024) لیکن تأثیر طرح جامع فاضلاب

شهر اهواز بررسی نشده است. لذا هدف از این تحقیق، بررسی پارامترهای کیفی و همچنین آگاهی از روند تغییرات مکانی در صورت حذف آلاینده‌های ورودی در سناریوهای مختلف در طول رودخانه کارون است.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه کارون که در جنوب غربی ایران قرار دارد، بزرگ‌ترین حوضه آبریز کشور است. رودخانه کارون از کوه‌های زاگرس سرچشمه می‌گیرد، از دشت خوزستان عبور می‌کند و در نهایت به خلیج فارس می‌ریزد. (Afkhami, et al., 2007) رودخانه کارون در مسیر خود وظیفه تأمین آب شرب، آب صنعتی، آبیاری حدود ۱۶ شهر و ده‌ها روستا، هزاران هکتار زمین کشاورزی، تولید انرژی برق‌آبی، چندین مزرعه پرورش ماهی و کارخانه‌های صنعتی را دارد؛ اما آلودگی آب رودخانه کارون به دلیل افزایش برداشت آب و تخلیه فاضلاب، حیات آبریزان را تهدید می‌کند. منابع آلودگی رودخانه کارون به سه بخش اصلی شهری، صنعتی و کشاورزی تقسیم می‌شوند. سهم آلودگی آب از بخش صنعت حدود ۲۳ درصد است و این مقدار بسته به مکان و فصل‌های مختلف، بین ۱۲ تا ۶۰ درصد متغیر است. (Karamouz, et al., 2012). در این پژوهش قسمتی از رودخانه کارون به طول ۲۸ کیلومتری حفاصل ایستگاه زرگان تا کوت عبدالله که در محدود شهری اهواز قرارداد مورد مطالعه قرار گرفته است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی رودخانه کارون و محل ایستگاه‌های نمونه‌برداری نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی

رودخانه کارون شهر اهواز را به دو بخش شرقی و غربی تقسیم می‌کند. تخلیه فاضلاب به این رودخانه از طریق ۲۴ خروجی صورت می‌گیرد که ۱۲ خروجی در ساحل شرقی و ۱۲ خروجی دیگر در ساحل غربی قرار دارند. در بازه‌ای به طول ۲۶ کیلومتر از زرگان در شمال تا بقایی در جنوب اهواز است. طرح فاضلاب اهواز از سال ۱۳۶۹ (۳۳ سال پیش) آغاز و هنوز در حال اجراست، از ۳۰۰ هزار مترمکعب فاضلابی که روزانه در اهواز تولید می‌شود، ۱۸۵ هزار مترمکعب به صورت خام وارد کارون و مابقی به نهر مالخ (یکی از سیلاب‌برهای طبیعی کارون) و در ادامه به تالاب بین‌المللی شادگان می‌ریزد. با راه‌اندازی ایستگاه‌های پمپاژ فاضلاب ساخته شده و در حال ساخت، حذف ۱۲ ورودی فاضلاب به رودخانه کارون در مقطع شرق اهواز تا پایان سال ۱۴۰۲ انجام می‌شود تا شهریور سال ۱۴۰۳ نیز ۱۲ نقطه دیگر در غرب این کلان‌شهر حذف خواهند شد. (IRNA, 2023) طرح جامع فاضلاب شهر اهواز باهدف جمع‌آوری تمامی ورودی‌های فاضلاب به رودخانه برای مدت سه سال برنامه‌ریزی شده است. این طرح شامل مدیریت فاضلاب‌های مناطق شرق و غرب رودخانه می‌شود. در حال حاضر، تصفیه‌خانه غرب اهواز تنها ۲۰ درصد از فاضلاب منطقه غربی را پوشش می‌دهد و تصفیه‌خانه شرق هنوز به بهره‌برداری نرسیده است. (Vaelizadeh, 2023) پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی تأثیر طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون





انجام شده است. کاهش آبدهی رودخانه، افزایش آلودگی‌ها، افزایش استفاده از سموم کشاورزی در حاشیه رودخانه، وضعیت کیفی و زیستی رودخانه را به مخاطره افکنده است. لذا با توجه به نقش بسیار مهم رودخانه کارون در تأمین آب شرب، کشاورزی و صنعت، دانستن وضعیت کیفی آب این رودخانه امری ضروری است تا بتوان با تصمیم درست از این مشکلات جلوگیری به عمل آورد.

### اطلاعات کیفیت آب رودخانه

در پژوهش حاضر داده‌های کمی و کیفی آب مانند دبی، سرعت جریان، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی، هدایت الکتریکی، نیتروژن آلی، آمونیوم، نترات، فسفر آلی و غیر آلی، قلیائیت و همچنین pH رودخانه کارون در ۴ ایستگاه مطالعاتی طی ۲ دوره نمونه‌برداری ۱۰ مرداد ۱۳۹۷ و ۱۸ شهریور ۱۳۹۷ از سازمان حفاظت محیط‌زیست اخذ گردید. داده‌های کمی و کیفی مردادماه برای واسنجی و شهریورماه برای صحت سنجی مدل کیفی مورد استفاده قرار گرفتند. مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری در جدول (۱) و همچنین منابع آلاینده رودخانه کارون در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۱. ایستگاه‌های نمونه‌برداری رودخانه کارون (منبع: سازمان حفاظت محیط‌زیست)

ارتفاع از سطح دریا (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	فاصله از پایین دست (کیلومتر)	محل قرارگیری	ایستگاه نمونه‌برداری
۱۳	۴۸°۴۵'۱۳/۹۴"	۳۱°۲۴'۱۳/۶"	۲۸/۳	زرگان	SP1
۱۲	۴۸°۴۱'۳۷/۹۹"	۳۱°۲۳'۷/۴"	۱۷/۴	دغاغله	SP2
۶	۴۸°۳۹'۴۶/۳۱"	۳۱°۱۷'۴۳/۰۲"	۴/۶	روبه روی دانشگاه علوم پزشکی اهواز	SP3
۵	۴۸°۳۹'۷/۸۳"	۳۱°۱۵'۱۵/۱۳"	۰	کوت عبدالله	SP4

جدول ۲. منابع آلاینده رودخانه کارون (منبع: سازمان حفاظت محیط‌زیست)

ردیف	حروف اختصار	منبع آلودگی	فاصله از پایین دست (کیلومتر)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	حروف اختصار	منبع آلودگی	فاصله از پایین دست (کیلومتر)	دبی (مترمکعب بر ثانیه)	ردیف
۱	Agri_D6	زهکش ۶	۲۷/۶۸	۰/۰۴	Urban_K.P1	کیان پارس ۱	۱۱/۶۸	۰/۰۲	۱۶
۲	Agri_D5	زهکش ۵	۲۷/۲	۰/۰۸	Urban_K.K	خرم کوشک	۱۱/۲۵	۰/۰۰۵	۱۷
۳	Agri_D4	زهکش ۴	۲۶/۶	۰/۰۵	Urban_K.P2	کیان پارس ۲	۹/۵۲	۰/۱۸	۱۸
۴	Inds_Z	نیروگاه زرگان	۲۵/۱	۰/۱۵	Urban_K.P3	کیان پارس ۳ (پل سیاه)	۹/۳	۰/۰۰۵	۱۹
۵	Urbn_Z1	زرگان ۱	۲۴/۶۱	۰/۰۲۵	Urban_E.H	بیمارستان امام خمینی	۹/۱۷	۰/۲	۲۰
۶	Urbn_Z2	زرگان ۲	۲۴/۵۷	۰/۰۲۵	Urban_A1	امانیه ۱	۷/۵	۰/۰۰۴	۲۱
۷	Urbn_K1	کورش ۱	۲۳/۲۳	۰/۰۹	Urban_A2	امانیه ۲	۷/۳۹	۰/۰۰۸	۲۲
۸	Urbn_K2	کورش ۲	۲۲/۶۵	۰/۰۰۵	Urban_A3	امانیه ۳	۶/۹۸	۰/۳	۲۳
۹	Agri_D3	زهکش ۳	۲۲/۳۹	۰/۰۴	Urban_C.B	پل کابلی	۶/۹۳	۰/۱۸	۲۴
۱۰	Urbn_k3	کورش ۳	۲۲/۱۶	۰/۰۰۴	Urban_F.B	پل پنجم ۱	۶/۲۴	۰/۲۱	۲۵
۱۱	Agri_D2	زهکش ۲	۱۹/۱۴	۱/۱۵	Inds_F.B	پل پنجم ۲	۶/۲	۰/۱۹	۲۶
۱۲	Agri_D1	زهکش ۱	۱۸/۱۷	۲/۴	Urban_A.KH	آخر آسفالت	۴/۳۴	۰/۱۵	۲۷
۱۳	Urban_D	دغاغله	۱۷/۲۶	۰/۰۱	Urban_S.B	پل ششم	۱/۸۵	۰/۶	۲۸
۱۴	Urban_k.A	کیان‌آباد	۱۵	۱/۱	Urban_N.A	ناصرآباد	۰/۸۷۵	۰/۰۰۶	۲۹
۱۵	Urban_L.P	پارک لاله	۱۲/۵	۰/۰۶۹					

### اطلاعات هواشناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

برای تأمین داده‌های موردنیاز هواشناسی، از داده‌های روز نمونه‌برداری ثبت شده در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محدوده مطالعاتی یعنی ایستگاه اهواز استفاده شده است. (جدول ۳) برای تأمین داده‌های هیدرولیکی، اطلاعات مقاطع رودخانه در فواصل مکانی مختلف از سازمان آب و برق استان خوزستان که در سال ۱۳۹۶ اندازه‌گیری شده بود، اخذ گردید. این داده‌ها شامل اندازه‌گیری‌های دقیق از مقاطع

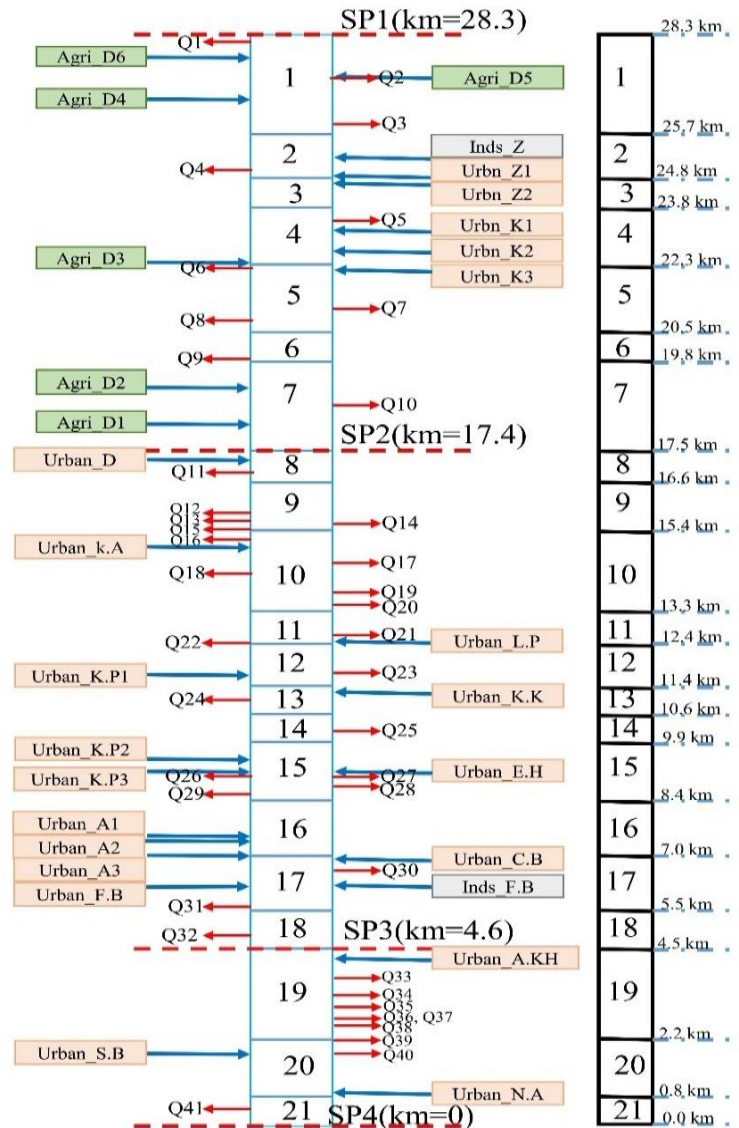
مختلف رودخانه بودند که به منظور شبیه‌سازی رفتار هیدرولیکی ۲۸ کیلومتر از طول رودخانه کارون مورد استفاده قرار گرفتند. در این شبیه‌سازی، اطلاعات ۱۱۰ مقطع از رودخانه به مدل Hec-Ras وارد شده است. در نهایت، از ضرایب دی-اشل و سرعت-اشل به دست آمده از ۲۲ مقطع که تغییرات محسوسی در عرض و عمق نسبت به مقاطع قبلی و بعدی داشتند، به عنوان ورودی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی رودخانه در مدل QUAL2Kw استفاده گردید. این مقاطع انتخابی به دلیل داشتن ویژگی‌های متمایز و تأثیرگذار بر جریان رودخانه، اهمیت ویژه‌ای در دقت نتایج شبیه‌سازی داشتند. در شکل (۲)، بازه بندی رودخانه کارون به همراه محل ورود آلاینده و محل برداشت آب از رودخانه نمایش داده شده است. همچنین، در جدول (۴)، میزان برداشت آب برای مصارف مختلف از رودخانه کارون آورده شده است. این جدول اطلاعاتی از نحوه استفاده از منابع آب رودخانه برای اهداف کشاورزی، صنعتی و شهری ارائه می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای هواشناسی ایستگاه اهواز (منبع: اداره هواشناسی خوزستان)

زمان نمونه برداری	دما (سلسیوس)	سرعت باد (متر بر ثانیه)	دمای نقطه شبنم (سلسیوس)
میانگین روزانه ۱۰ مرداد	۳۷/۸	۳/۶	۸/۴
میانگین روزانه ۱۸ شهریور	۳۶/۲	۱/۴	۱۵

جدول ۴. میزان برداشت آب برای مصارف مختلف از رودخانه کارون (منبع: سازمان آب و برق خوزستان)

ردیف	فاصله از پایین دست (کیلومتر)	میزان برداشت (مترمکعب بر ثانیه)	نوع مصرف	ردیف	فاصله از پایین دست (کیلومتر)	میزان برداشت (مترمکعب بر ثانیه)	نوع مصرف
۱	۲۸/۲	۰/۲	کشاورزی	۲۲	۱۲/۵	۰/۱	کشاورزی
۲	۲۷/۲	۰/۱۱	کشاورزی	۲۳	۱۱/۷	۰/۰۵۷	کشاورزی
۳	۲۶/۷	۰/۲۵	کشاورزی	۲۴	۱۱	۰/۱۵	کشاورزی
۴	۲۴/۸	۰/۰۷۴	کشاورزی	۲۵	۱۰/۲	۰/۱	کشاورزی
۵	۲۳/۵	۰/۱۵۳	صنعت	۲۶	۹/۲	۰/۱۶	شرب
۶	۲۲/۴	۰/۱۵	کشاورزی	۲۷	۹/۰۳	۰/۰۸۹	کشاورزی
۷	۲۱/۲	۰/۱۸	کشاورزی	۲۸	۸/۷۵	۰/۲	صنعت
۸	۲۰/۹	۰/۱۵۳	کشاورزی	۲۹	۸/۵۶	۰/۰۹۸	فضای سبز
۹	۱۹/۱۸	۰/۱۷	کشاورزی	۳۰	۶/۵۸	۰/۰۵۲	فضای سبز
۱۰	۱۸/۶	۰/۱۵	کشاورزی	۳۱	۵/۶۵	۰/۱۷۷	فضای سبز
۱۱	۱۶/۹	۰/۰۹	کشاورزی	۳۲	۴/۹	۰/۰۹۲	فضای سبز
۱۲	۱۵/۹	۰/۱۳	کشاورزی	۳۳	۳/۷۸	۰/۰۳۸	کشاورزی
۱۳	۱۵/۷	۰/۰۸۷	کشاورزی	۳۴	۳/۳۳	۰/۰۳۱	کشاورزی
۱۴	۱۵/۶	۰/۰۳۵	فضای سبز	۳۵	۳/۰۴	۰/۱۵	کشاورزی
۱۵	۱۵/۵	۰/۳۴	صنعت	۳۶	۲/۷۵	۰/۱۵	کشاورزی
۱۶	۱۵/۲	۰/۰۳	کشاورزی	۳۷	۲/۶۹	۰/۰۳۸	کشاورزی
۱۷	۱۴/۶	۰/۱۸۳	کشاورزی	۳۸	۲/۵۶	۰/۱۸	کشاورزی
۱۸	۱۴/۳	۰/۴	شرب	۳۹	۲/۱۸	۰/۸۷	صنعت
۱۹	۱۳/۸	۰/۱	کشاورزی	۴۰	۱/۸۵	۰/۰۶۷	فضای سبز
۲۰	۱۳/۵	۰/۱۸۴	فضای سبز	۴۱	۰/۴۲۳	۰/۱۲	کشاورزی
۲۱	۱۲/۷	۰/۳۵	شرب				



شکل ۲. شماتیک بازه بندی و جانمایی ورودی‌ها به رودخانه کارون

### مدل‌سازی

از بین مدل‌های رایج شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه مدل QUAL2Kw به منظور مدل‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه کارون انتخاب شده است. مدل QUAL2Kw مدل یک‌بعدی، شبیه‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه با جریان دائمی بوده که قادر است تغییرات کیفیت آب ۱۹ متغیر را به صورت روزانه و با گام زمانی کمتر از یک ساعت شبیه‌سازی نماید (Pelletier & Chapra, 2008). گام زمانی حل معادلات در این پژوهش برابر ۵/۶۲۵ دقیقه در نظر گرفته شده است. روش حل اولر و نیوتن رافسون به ترتیب برای حل معادلات انتقال جرم و شبیه‌سازی pH مورد استفاده قرار گرفت. زمان عبور جریان مورد نظر بر اساس خصوصیات جریان و طول مسیر بازه مورد مطالعه محاسبه گردیده و بر همین اساس مدت زمان اجرای مدل در این پژوهش برابر ۵ روز در نظر گرفته شده است. همچنین برای محاسبه نرخ هوادهی در رودخانه از الگوی Internal استفاده گردید.

### فرضیات مدل‌سازی

به دلیل عدم وجود برخی از اطلاعات و ساختار مدل، علاوه بر فرضیات اصلی مدل، فرضیات جانبی مدل‌سازی نیز در نظر گرفته شده است. پوشش جلبک کف برابر با ۳۰ درصد سطحی از بستر رودخانه در نظر گرفته شده است. از شبیه‌سازی SOD با توجه به در دسترس نبودن اطلاعاتی از میزان اکسیژن خواهی رسوبات و همچنین کفزی‌ها و بی‌مهرگان موجود در رسوبات صرف نظر شده است. همچنین با توجه به در دسترس نبودن اطلاعاتی از وضعیت کیفیت ناحیه هایپریک و همچنین ضخامت جریان این ناحیه از اثر ناحیه هایپریک در این پژوهش صرف نظر شده است. لازم به ذکر است که سایر محققین نیز در اکثر تحقیقات از این اثر صرف نظر نموده‌اند (Kannel, et al., 2007).



### ارزیابی دقت مدل در تخمین پارامترها

قبل از به کارگیری مدل برای شبیه سازی، لازم است که واسنجی و صحت سنجی مدل، انجام شود. در این مرحله، برای تعیین خطای بین داده های مشاهده شده و شبیه سازی شده در مراحل واسنجی و صحت سنجی، از شاخص های متداول محاسبه خطا مانند  $RMSE^1$ ،  $MAPE^2$  و  $PBIAS^3$  استفاده شده است. روابط ۱ تا ۳ به ترتیب این شاخص های خطا را نشان می دهند. در این روابط  $n$  تعداد کل داده ها،  $O_i^{obs}$  مقدار مشاهداتی متغیر کیفی در رودخانه و  $O_i^{sim}$  مقدار شبیه سازی شده ی متغیر کیفی است. هرچه مقادیر این شاخص ها کمتر باشد، دقت مدل در شبیه سازی شرایط واقعی بیشتر است. (Kannel, et al., 2007)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim})^2}{n}} \quad \text{رابطه (۱)}$$

$$MAPE = \frac{100}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |O_i^{obs} - O_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n O_i^{obs}}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$PBIAS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i^{obs}}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این فرمول ها  $O_i^{obs}$  نشان دهنده مقدار اندازه گیری شده،  $O_i^{sim}$  مقدار شبیه سازی شده توسط مدل QUAL2Kw است.  $RMSE$  به معنای ریشه میانگین مربع خطا است.  $RMSE$  نشان می دهد که به طور میانگین، مقادیر پیش بینی شده توسط مدل چقدر با مقادیر واقعی تفاوت دارند.  $RMSE$  کوچک تر نشان دهنده دقت بیشتر مدل است. به این معنی که مقادیر پیش بینی شده به طور میانگین به مقادیر واقعی نزدیک تر هستند.  $RMSE$  به خطاهای بزرگ تر حساس تر است، به این معنی که ممکن است تحت تأثیر مقادیر پرت (outliers) قرار بگیرد.  $MAPE$  به معنای میانگین درصد خطای مطلق است.  $MAPE$  نشان می دهد که به طور میانگین، پیش بینی های مدل چه درصدی با مقادیر واقعی تفاوت دارند.  $MAPE$  کوچک تر نشان دهنده دقت بیشتر مدل است.  $MAPE$  به خطاهای بزرگ به اندازه  $RMSE$  حساس نیست، به این معنی که کمتر تحت تأثیر مقادیر پرت (outliers) قرار می گیرد.  $PBIAS$  به معنای درصد سوگیری است.  $PBIAS$  نشان می دهد که به طور متوسط، پیش بینی های مدل چه درصدی از مقادیر واقعی انحراف دارند.  $PBIAS$  برابر با صفر نشان دهنده عدم وجود سوگیری در مدل است، اگر مثبت باشد نشان دهنده سوگیری مثبت و اگر منفی باشد نشان دهنده سوگیری منفی در مدل است. برای اکثر کاربردها،  $PBIAS$  عملکرد بسیار خوب، بین ۰ و ۱۰ درصد است. عملکرد خوب، بین ۱۰ تا ۱۵ درصد، عملکرد نامناسب بین ۱۵ تا ۲۵ درصد و عملکرد بسیار ضعیف زمانی است که  $PBIAS$  بیشتر از ۲۵ درصد باشد (Salis, et al., 2019).

### ارزیابی کیفی

در کشور ایران فقط استاندارد تخلیه فاضلاب وجود دارد و در موارد دیگر از توصیه های سازمان های معتبری چون سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان محیط زیست آمریکا (EPA) استفاده می شود. در جدول (۵)، غلظت های پیشنهادی برای متغیرهای کیفی مختلف آب رودخانه ها در چهار گروه مختلف ارائه شده است. در این دسته بندی، گروه ۱ نشان دهنده کیفیت مناسب آبی است که برای همه کاربردهای عمومی مناسب بوده و گروه ۴ نشان دهنده بدترین کیفیت آب است (karamouz & kerachian, 2018).

جدول ۵. استانداردهای کیفیت آب رودخانه ها (karamouz & kerachian, 2018)

پارامتر	واحد	طبقه بندی			
		A1	B2	۲	۳
T	(C°)	≤۲۰	۲۵-۲۰	۲۵-۲۲	۳۰-۲۵
pH	-	۸/۵-۶/۵	۸/۵-۶/۵	۸/۵-۶/۵	۸/۵-۵/۵
DO	mg/L	>۷	۷-۵	۵-۳	۳>
BOD	mg/L	≥۳	۵-۳	۱۰-۵	۲۰-۱۰
NH4	mg/L	۰/۱≥	۰/۵-۰/۱	۲-۰/۵	۸-۲
NO3	mg/L	-	۴۴≥	-	۱۰۰-۴۴
EC	μmohs/cm	۴۰۰≥	۷۵۰-۴۰۰	۱۵۰۰-۷۵۰	۳۰۰۰-۱۵۰۰

1 Root Mean Square Error

2 Mean Absolute Percentage Error

3 Percentage Bias

## نتایج و بحث

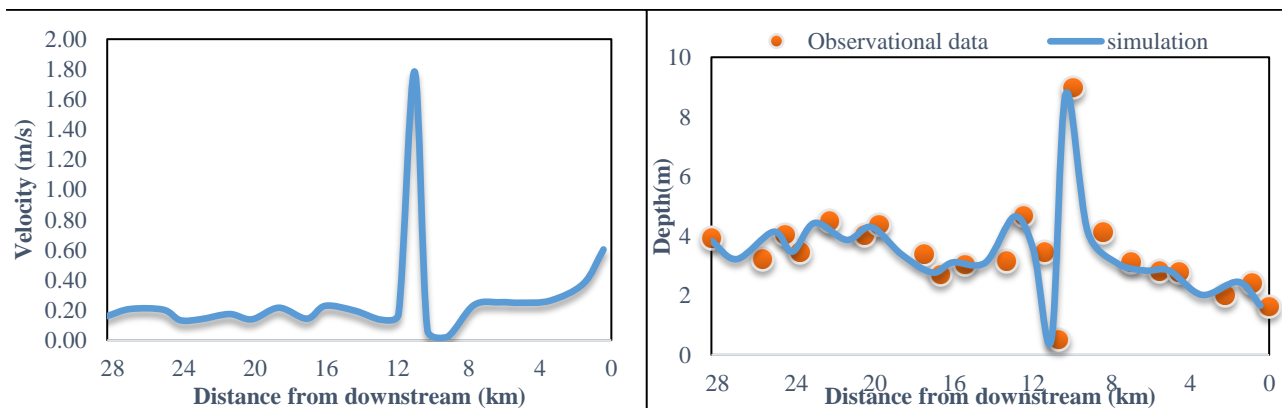
### نتایج واسنجی مدل

پس از ورود تمامی اطلاعات جمع‌آوری شده در مرحله واسنجی، مدل برای ماه مرداد ۱۳۹۷ اجرا شده است. سپس مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی مقایسه گردید. در نرم‌افزار QUAL2Kw واسنجی به دو صورت دستی و خودکار انجام می‌شود. در این پژوهش به منظور تغییر ضرایب سینتیکی جهت تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار به صورت خودکار انجام گرفت. اندازه جمعیت اولیه و تعداد نسل در الگوریتم ژنتیک با آنالیز حساسیت‌های متعدد، برابر با ۷۵ انتخاب گردیدند. ضرایب و نرخ‌های مختلف مدل که در مرحله واسنجی نهایی شدند در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶. مقادیر پارامترهای واسنجی شده مدل Qual2kw (منبع: یافته‌های تحقیق)

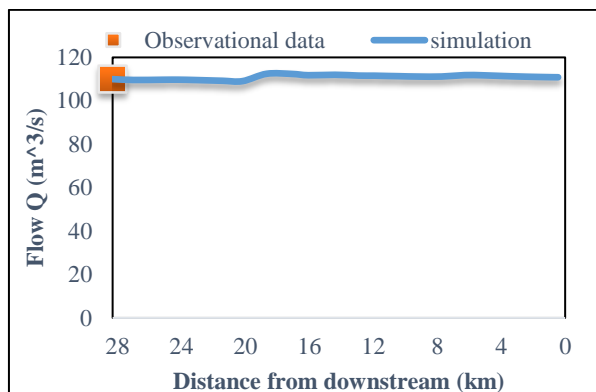
پارامتر	مقدار	واحد	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
rate Slow CBOD Hydrolysis	۴/۴۸	d/	۰	۵
rate Slow CBOD Oxidation	۰/۴۵	d/	۰	۰/۵
rate Fast CBOD Oxidation	۰/۵۶	d/	۰	۵
Organic N Hydrolysis	۰/۶۶	d/	۰	۵
velocity Organic N Settling	۰/۱۸	m/d	۰	۲
Ammonium Nitrification	۰/۲۷	d/	۰	۱۰
Organic P Hydrolysis	۰/۰۰۰۷	d/	۰	۵
velocity Organic P Settling	۰/۲۶	m/d	۰	۲
velocity Inorganic P Settling	۱/۷	m/d	۰	۲
attenuation half sat constant Sed P oxygen	۰/۲۳	L/mgO	۰	۲
Dissolution rate	۴/۷۲	d/	۰	۵
velocity Detritus Settling	۰/۷۹	m/d	۰	۵
Max Growth rate	۹۱/۵۵	d or /d <sup>۱</sup> gD/m	۰	۱۰۰
Basal respiration rate	۰/۰۶	d/	۰	۰/۳
Excretion rate	۰/۰۷	d/	۰	۰/۵
Death rate	۰/۴۹	d/	۰	۰/۵
Light constant	۸۹/۱۸	langleys/d	۱	۱۰۰
Ammonia preference	۹۳/۳۴	ugN/L	۱	۱۰۰

هدف از واسنجی، صرفاً یکی کردن نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری شده نیست، بلکه عملیات واسنجی باید با دید میدانی، دقت مهندسی و دلیل منطقی برای ایجاد تغییرات باشد. همچنین تأثیر تغییر پارامترها بر دیگر پارامترها مشخص می‌شود. غلظت آلاینده‌ای که وارد رودخانه می‌شود به دو دلیل در طول مسیر تغییر می‌کند: نخست به دلیل اختلاط با حجم زیاد آب رودخانه و ترکیب با دبی بیشتر (معادلات پخش-انتقال) و دوم به دلیل تعامل آلاینده‌ها با یکدیگر و محیط پذیرنده (معادلات کنش و واکنش اجزاء اصلی) (Turner, et al., 2009).



شکل ۴. شبیه‌سازی پارامتر سرعت در رودخانه کارون توسط مدل QUAL2Kw

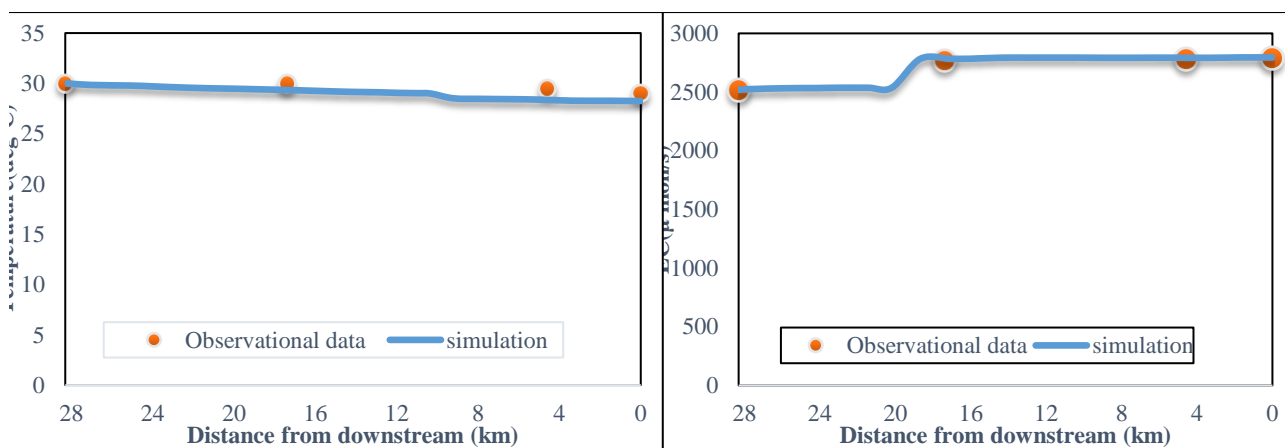
شکل ۳. شبیه‌سازی پارامتر عمق در رودخانه کارون توسط مدل QUAL2Kw



شکل ۵. شبیه‌سازی پارامتر دبی در رودخانه کارون توسط مدل QUAL2Kw

با توجه به نمودار عمق در شکل (۳)، مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده هم‌خوانی بسیار خوبی دارند که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی هیدرولیکی مدل است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، عمق رودخانه کارون از ابتدای مسیر تا ۱۱ کیلومتر تقریباً ثابت است و بین ۲/۷ متر تا ۴/۳ متر تغییر می‌کند. با این حال، در ۱۱ کیلومتر عمق به ۰/۵ متر کاهش می‌یابد که این نقطه دقیقاً در زیر پل سیاه قرار دارد. این پل بر روی بستر سنگی ساخته شده و این شرایط باعث کاهش عمق در این نقطه شده است. پس از این نقطه و عبور از بستر سنگی، به دلیل احتمال وقوع آب شستگی‌ها یا ویژگی‌های خاص توپوگرافی این مقطع، عمق رودخانه به‌طور چشمگیری افزایش یافته و به ۸ متر می‌رسد. این افزایش عمق به‌وضوح در نمودار مشاهده می‌شود و پس از این نقطه، عمق رودخانه به‌تدریج کاهش می‌یابد و این روند کاهشی تا انتهای مسیر ادامه دارد. در پژوهشی بر روی کیفیت آب رودخانه کارون به این نتیجه رسیدند که تغییرات فصلی اثر چندانی بر کیفیت آب در منطقه پل سیاه ندارد که علت آن وضعیت بستر رودخانه در این منطقه است. بستر سنگی و شیب‌دار آن موجب هوادهی طبیعی و در نتیجه خود پالایی آب می‌گردد (Maddi-Niya, et al., 2014).

شکل (۴) نمودار سرعت محاسبه شده توسط مدل QUAL2Kw بر اساس مشخصات هیدرولیکی را نشان می‌دهد. میانگین سرعت از ابتدای مسیر تا ۱۲ کیلومتر تقریباً ۰,۲ متر بر ثانیه است. با این حال، در ۱۱ کیلومتر به‌صورت مقطعی سرعت به‌طور چشمگیری افزایش یافته و به ۱,۸ متر بر ثانیه می‌رسد. همان‌طور که در نمودار جریان رودخانه مشاهده می‌شود (شکل ۵)، دبی جریان در طول مسیر افزایش یافته است. این افزایش دبی جریان به دلیل تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی در طول مسیر رودخانه است.

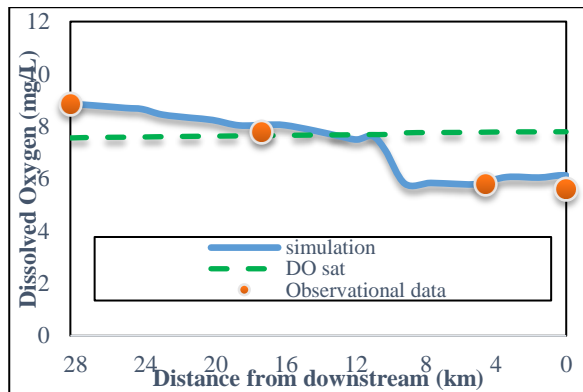


شکل ۶. شبیه‌سازی پارامتر دما در مرحله واسنجی

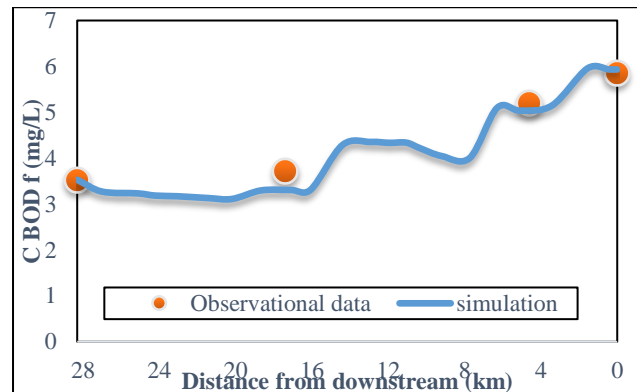
شکل ۷. شبیه‌سازی پارامتر هدایت الکتریکی در مرحله واسنجی

از آنجاکه همه واکنش‌های زیستی تحت تأثیر دما هستند، پارامتر دمای آب در مطالعات رودخانه اهمیت ویژه‌ای دارد. دمای آب به عواملی مانند دمای اولیه آب، دمای هوا، دمای آلاینده‌های ورودی به رودخانه، شدت نور، عمق جریان، سطح آب در تماس با هوا، طول ساعات آفتابی، وضعیت صاف یا ابری بودن هوا و درصد سطح رودخانه که در سایه قرار دارد، بستگی دارد. (Randall, et al., 1982). همان‌طور که از شکل (۶) پیداست، مقدار اندازه‌گیری شده و مدل شبیه‌سازی شده هم‌خوانی زیادی باهم دارند و شبیه‌سازی در پارامتر دما

به‌خوبی صورت گرفته است. در دو ایستگاه اول مقدار دما شبیه‌سازی شده با دما اندازه‌گیری شده دقیقاً برابر است و در دو ایستگاه انتهایی مسیر این اختلاف کمتر از نیم درجه است. شکل (۷) وضعیت شبیه‌سازی شده‌ی هدایت الکتریکی (EC) در طول مسیر رودخانه را نشان می‌دهد. در ابتدای مسیر، هدایت الکتریکی ۲۵۰۰ میکرو موس بر سانتی‌متر است و تا کیلومتر ۲۰ به همین میزان باقی می‌ماند. طبق جدول (۲)، در این مقطع، زهکش‌های Agri\_D1 و Agri\_D2 با دبی به ترتیب ۱/۱ و ۲/۴ مترمکعب بر ثانیه و با EC بالا به رودخانه می‌ریزند و باعث افزایش هدایت الکتریکی تا ۲۸۰۰ میکرو موس بر سانتی‌متر می‌شوند. از آنجا که هدایت الکتریکی یک پارامتر زوال‌ناپذیر است، پس‌از این افزایش، با شیب‌خطی تا انتهای مسیر مورد مطالعه ادامه می‌یابد.



شکل ۸. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول در مرحله واسنجی

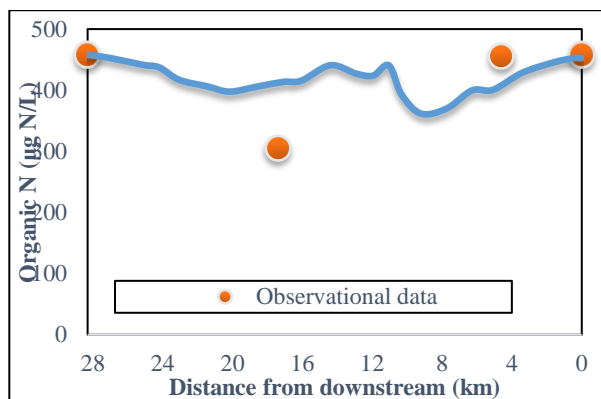


شکل ۹. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در مرحله واسنجی

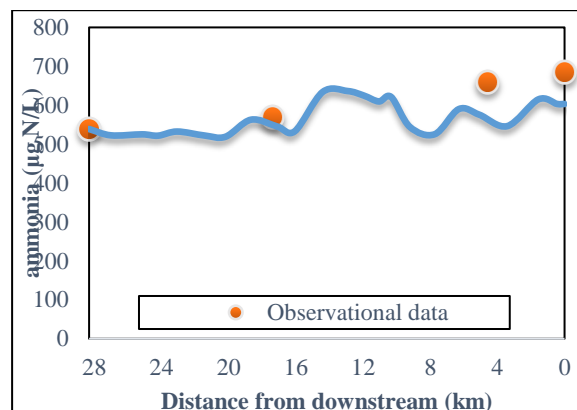
در شبیه‌سازی اکسیژن محلول (DO) که در شکل (۸) نشان داده شده است، اکسیژن محلول در ابتدای مسیر به حد اشباع رسیده است. این امر به دلیل وجود پایه‌های پل در ایستگاه اول و همچنین پوشش گیاهی است که با فتوسنتز باعث افزایش اکسیژن محلول آب می‌شود. در پژوهش دیگری که بر روی کیفیت آب رودخانه کارون انجام شد در مورد غلظت بالای DO علت را در درجه اول وجود جلبک و در مرحله بعد بازدمش بالای آبراهه دانستند (Jafarzadeh- Haghghi, et al., 2005). بیشترین میزان فاضلاب واریزی از کیلومتر ۲۰ رودخانه است که علاوه بر دو زهکش با دبی‌های زیاد، فاضلاب کیان‌آباد با دبی ۱/۱ مترمکعب بر ثانیه در ۱۵ کیلومتر کارون وارد می‌شود. در کیلومتر ۱۰ کاهش محسوسی در غلظت اکسیژن محلول آب مشاهده می‌شود که از دلایل این امر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: افزایش عمق و کاهش سرعت جریان که باعث کاهش نرخ هوادهی می‌شود. همچنین از کیلومتر ۱۰ تا انتها، فاضلاب بیمارستان‌های امام خمینی، بیمارستان مهر، بیمارستان فاطمه زهرا و همچنین صنایع شرکت کربن ایران و شرکت لوله‌سازی خوزستان و فاضلاب شهری مناطق ۱، ۶، ۸، ۵ و قسمتی از منطقه ۴ به رودخانه کارون می‌ریزد که باعث کاهش میزان اکسیژن محلول تا ۵/۶ گرم بر لیتر می‌شود.

اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های بررسی کیفیت آب رودخانه محسوب می‌شود. غلظت BOD در آب به‌طور مستقیم به میزان فعالیت میکروارگانیسم‌ها وابسته است؛ به‌طوری‌که هرچه فعالیت موجودات زنده و واکنش‌های شیمیایی در آب بیشتر باشد، مصرف اکسیژن محلول و BOD نیز افزایش می‌یابد. مقدار BOD اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در رودخانه کارون روند افزایشی دارد؛ (شکل ۹) از ۳/۵ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه اول شروع شده و به ۶ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه آخر می‌رسد. این افزایش نشان‌دهنده نامطلوب‌تر شدن کیفیت آب از بالادست به پایین‌دست رودخانه به دلیل ورود انواع آلاینده‌هاست. در کیلومتر ۱۶، BOD یک جهش دارد که به دلیل ورود فاضلاب کیان‌آباد از ساحل غربی رودخانه است. در کیلومتر ۸، BOD دوباره جهش دارد که این بار به دلیل ورود فاضلاب بیمارستان امام خمینی از ساحل شرق و فاضلاب کیان پارس از ساحل غربی است. در کیلومتر ۴ نیز جهش دیگری به دلیل ورود فاضلاب از ساحل شرق مشاهده می‌شود. اکسیژن خواهی بیوشیمیایی تند در فرآیند هیدرولیز تولید و در فرآیند اکسیداسیون مصرف می‌شود. همان‌طور که در جدول ۶ نشان داده شده است، مقدار هیدرولیز اکسیژن خواهی کند ۴/۴۸ و مقدار اکسیداسیون اکسیژن خواهی بیوشیمیایی تند ۰/۵۶ است. باینکه محدوده تغییرات برای هر دو پارامتر (۰-۵) است، این موضوع نشان‌دهنده انحلال بیشتر ریزه‌های آلی در اثر فرآیند هیدرولیز و تبدیل شدن به اکسیژن خواهی بیوشیمیایی تند است. پژوهشگران دیگری نیز در ارزیابی رودخانه کارون به این

نتیجه رسیدند که تخلیه متعدد فاضلاب‌های شهری و روستایی و صنعتی به صورت روزانه بر میزان CBOD می‌افزاید به صورتی که مقادیر اندازه‌گیری شده در بازه زرگان تا کوت امیر در سال ۱۳۹۲ از ۱/۶ تا ۵ میلی‌گرم بر لیتر نوسان داشته است ( Hoseini & Hoseini, 2017).



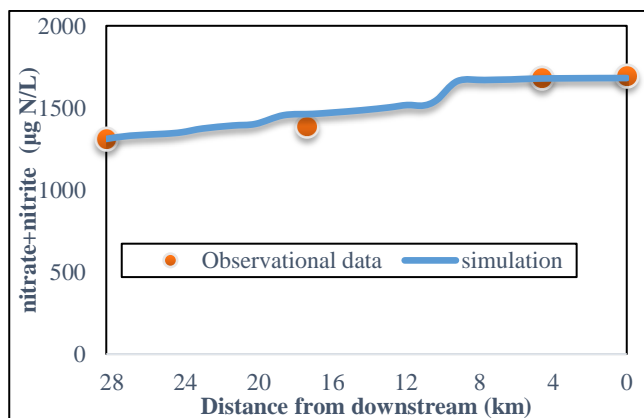
شکل ۱۰. شبیه‌سازی پارامتر نیتروژن آلی در مرحله واسنجی



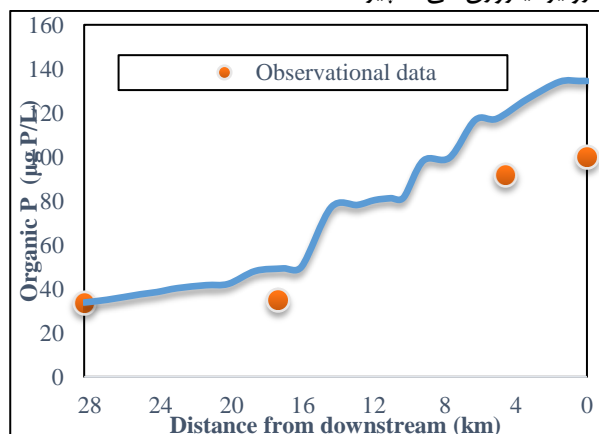
شکل ۱۱. شبیه‌سازی پارامتر آمونیاک در مرحله واسنجی

همان‌طور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده است بررسی روند تغییرات داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نیتروژن آلی نشان می‌دهد که مدل تقریباً به درستی روند را شبیه‌سازی کرده است، به جز در ایستگاه دوم. این تفاوت می‌تواند ناشی از خطاهای موجود در نمونه برداری و آزمایش‌ها باشد. بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده، مقدار نیتروژن آلی در ایستگاه اول ۴۵۸ میکروگرم بر لیتر و در ایستگاه‌های سوم و چهارم به ترتیب ۴۵۶ و ۴۵۸ میکروگرم بر لیتر است و روندی تقریباً ثابت دارد. با وجود این، مدل شبیه‌سازی شده روند ثابتی را برای نیتروژن آلی نشان نمی‌دهد. در برخی نقاط، غلظت شبیه‌سازی شده نیتروژن آلی کاهش و سپس افزایش می‌یابد. روند افزایشی نیتروژن به دلیل ورود منابع آلاینده حاوی ترکیبات نیتروژنی به رودخانه بوده و کاهش در برخی محدوده‌ها ناشی از مصرف نیتروژن توسط گیاهان و همچنین ته‌نشینی نیتروژن آلی در رودخانه است.

روند تغییرات پارامتر آمونیاک در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه‌های انتهایی کمتر از واقعیت برآورد شده است، اما به طور کلی تطابقی بین مقادیر پیش‌بینی شده مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود. مقدار اندازه‌گیری شده آمونیاک در ایستگاه اول ۵۳۹ میکروگرم بر لیتر است و در ایستگاه آخر به ۶۸۶ میکروگرم بر لیتر می‌رسد. در کیلومتر ۲۰، به دلیل ورود زه آب‌های زهکش شماره ۱ و ۲، افزایش قابل توجهی در مقدار آمونیاک مشاهده می‌شود. افزایش مقدار آمونیاک در کیلومتر ۱۶ ناشی از فاضلاب کیان‌آباد است و در کیلومترهای ۸ و ۴ نیز به دلیل ورود فاضلاب‌های مختلف از ساحل‌های شرق و غرب رودخانه کارون رخ داده است. نرخ هیدرولیز نیتروژن آلی برابر با ۰/۶۶ بر روز است که عدد کوچکی است و این امر بیانگر این است که تولید آمونیاک به واسطه‌ی هیدرولیز نیتروژن آلی، ناچیز است.



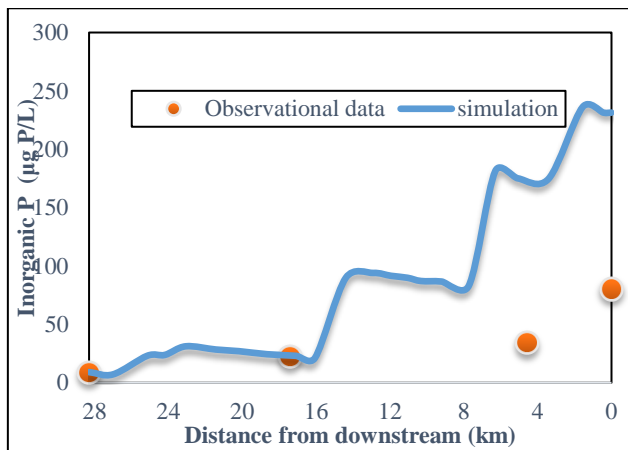
شکل ۱۲. شبیه‌سازی پارامتر نیترات+نیتريت در مرحله واسنجی



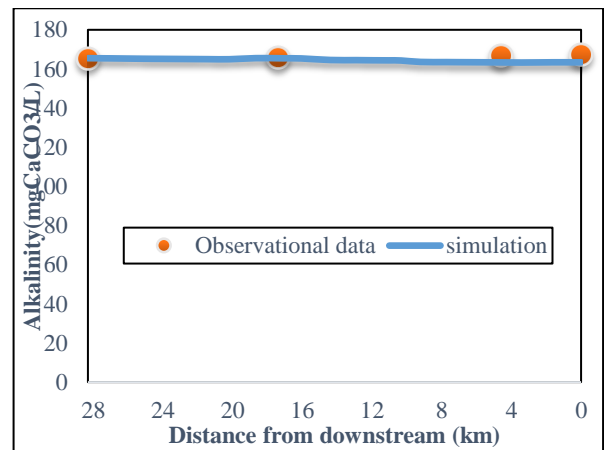
شکل ۱۳. شبیه‌سازی پارامتر فسفر آلی در مرحله واسنجی

همان‌طور که از شکل (۱۲) پیداست، مقدار اندازه‌گیری شده و مدل شبیه‌سازی شده در پارامتر نیتريت+نیترات هم‌خوانی زیادی باهم

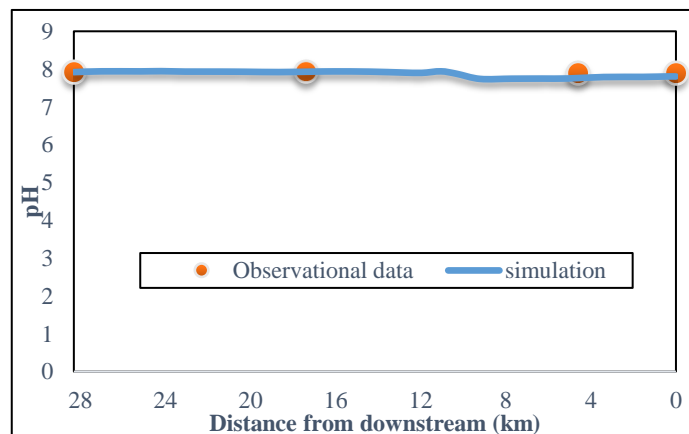
دارند و شبیه‌سازی در این پارامتر به‌خوبی صورت گرفته است. مقدار  $\text{NO}_3$  در ایستگاه اول ۱۳۰۰ میکروگرم بر لیتر است که این عدد در انتها به ۱۷۰۰ میکروگرم بر لیتر می‌رسد که روند افزایشی این پارامتر نشان از ورود آلاینده‌ها و بدتر شدن شرایط کیفی رودخانه است. البته مقدار غلظت نیترات نیز همانند BOD از کیلومتر ۱۰ به بعد (به سمت پایین‌دست رودخانه) جهش قابل‌توجهی دارد. بررسی مقدار نرخ نیتریفیکاسیون نشان می‌دهد که نرخ نیتریفیکاسیون در رودخانه بسیار کم و برابر با ۰/۲۷ بر روز است؛ بنابراین، غلظت آمونیوم موجود در آب خیلی به‌کندی توسط باکتری‌ها تجزیه و به نیترات تبدیل می‌شود. با توجه به عدم وقوع شرایط بی‌هوازی در رودخانه، نرخ دینیتریفیکاسیون در رودخانه برابر با صفر در نظر گرفته شده است، بنابراین تنها عامل کاهش غلظت نیترات، مصرف آن توسط گیاهان است. غلظت فسفر آلی با افزایش فاصله از نقطه شروع به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. (شکل ۱۳) این امر نشان می‌دهد که منابع فسفر آلی به‌طور مداوم در حال ورود به رودخانه کارون هستند. در کیلومتر ۲۰، افزایش مختصری در مقدار فسفر آلی دیده می‌شود که به دلیل ورود زهکش‌های شماره ۱ و ۲ است. در کیلومتر ۱۰، فاضلاب خرم کوشک از ساحل شرق و فاضلاب کیان پارس ۱ از ساحل غرب وارد می‌شود. در کیلومتر ۷/۵، فاضلاب امانیه ۱ و ۲ از سمت غرب رودخانه و در کیلومتر ۵، فاضلاب صنایع شرکت کربن و شرکت لوله‌سازی خوزستان از ساحل شرق و فاضلاب پل پنجم از ساحل غرب باعث افزایش مقدار فسفر آلی شده‌اند. بررسی روند تغییرات داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل به‌درستی روند را شبیه‌سازی کرده است، اما از ایستگاه دوم به بعد مقدار فسفر را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. عواملی که می‌توانند در ایجاد این اختلاف مؤثر باشند، تفاوت شرایط واقعی مانند دمای آب، دبی رودخانه و شرایط تعریف شده در مدل (که این مقادیر را از ابتدا تا انتهای بازه ثابت در نظر می‌گیرد) هستند. همچنین، ورود منابع ناشناخته آلاینده به رودخانه نیز در ایجاد این اختلاف نقش دارد.



شکل ۱۴. شبیه‌سازی پارامتر فسفر غیر آلی در مرحله واسنجی



شکل ۱۵. شبیه‌سازی پارامتر قلیانیت در مرحله واسنجی



شکل ۱۶. شبیه‌سازی پارامتر pH در مرحله واسنجی

نمودار شبیه‌سازی تغییرات فسفر غیر آلی در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که غلظت فسفر غیر آلی به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است.



در منحنی شبیه‌سازی شده، غلظت فسفر غیر آلی به تدریج در طول رودخانه افزایش می‌یابد و این افزایش در نقاط مختلف رودخانه با شیب‌های متفاوتی رخ می‌دهد که به دلیل ورود فاضلاب‌ها در هر مقطع است، همان‌طور که در بخش فسفر آلی توضیح داده شد. شکل (۱۴) نشان می‌دهد که در دو ایستگاه آخر، همانند نمودار شبیه‌سازی فسفر آلی، بین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده اختلاف قابل توجهی وجود دارد. این اختلاف ممکن است به دلیل وجود یک منبع کاهنده فسفر غیر آلی در واقعیت باشد که در مشاهدات میدانی ثبت نشده است یا اینکه مقدار اندازه‌گیری شده اشتباه گزارش شده است. کلیت رودخانه‌ها ظرفیت آن‌ها برای خنثی کردن اسیدها را نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، میزان مقاومت آب در برابر تغییرات pH را می‌سنجد. کلیت بالا به معنای ثبات بیشتر pH آب و اسیدی شدن کمتر آن است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود، روند شبیه‌سازی شده توسط مدل QUAL2Kw به خوبی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت دارد. این نشان می‌دهد که مدل QUAL2Kw می‌تواند به‌طور قابل اعتمادی برای پیش‌بینی کلیت رودخانه کارون در آینده استفاده شود. همچنین تغییرات کلیت بسیار کم و در طول رودخانه کارون تقریباً ثابت است.

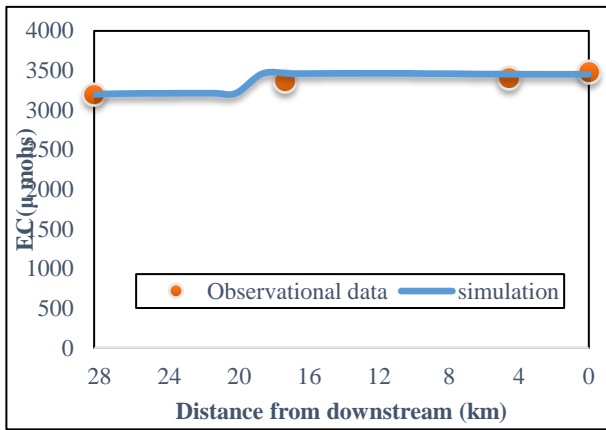
نتایج شبیه‌سازی pH در شکل (۱۶) نشان می‌دهد که مقادیر این پارامتر روند یکنواخت و مشابهی را دنبال می‌کنند و تفاوت قابل توجهی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. مدل دقت بالایی در شبیه‌سازی پارامتر pH نشان داده است. تغییرات غلظت pH از ابتدای مسیر به سمت پایین دست رودخانه کاهش یافته است که نشان می‌دهد کارگاه‌های صنعتی در حاشیه رودخانه پساب‌های اسیدی خود را به رودخانه رها می‌کنند. با این حال، این کاهش اندک بوده و حدود ۰/۳ واحد است. در آب‌های سطحی، مقدار pH تغییر زیادی نخواهد کرد زیرا در طول مسیر با کربنات‌ها و بی‌کربنات‌ها واکنش داده و به تعادل می‌رسد. این نتایج، با نتایج (Hoseini, et al., 2016) و (Khonok, et al., 2022) مطابقت دارد. بررسی کیفیت آب رودخانه در طول مسیر آن نشان می‌دهد که به‌طور کلی، با حرکت از بالادست به سمت پایین دست، شرایط کیفی در تمامی پارامترها نامطلوب‌تر می‌شود. این نتایج مشابه با نتایج پژوهشی بر روی رودخانه کارون است که نشان دادند شاخص کیفیت آب از ایستگاه اول تا ایستگاه چهارم به تدریج کاهش می‌یابد. در پایین دست ایستگاه کوت عبدالله به علت تجمع فاضلاب‌ها، به ویژه فاضلاب‌های بیمارستانی، بدترین شرایط و در بالادست ایستگاه کیان آباد بهترین شرایط را داشته است (Maddi-Niya, et al., 2014).

### نتایج صحت‌سنجی مدل

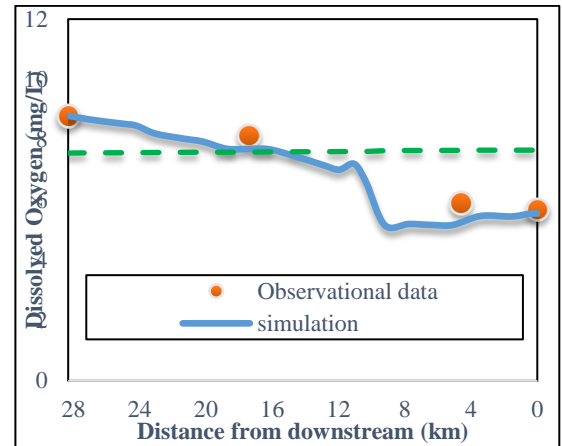
صحت‌سنجی مدل کیفی، مرحله‌ای کلیدی در فرآیند شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه است. این فرآیند شامل ارزیابی توانایی مدل واسنجی شده در پیش‌بینی دقیق غلظت آلاینده‌ها و سایر پارامترهای کیفی آب در شرایط مختلف است. به منظور صحت‌سنجی نتایج مدل، تمامی پارامترهای کالیبره شده ثابت نگه‌داشته شده و مدل برای داده‌های شهر یورما سال ۱۳۹۷ اجرا گردید.

جدول ۶. مقدار شاخص‌های خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (منبع: یافته‌های تحقیق)

صحت‌سنجی			واسنجی			پارامتر کیفی
PBIAS	MAPE	RMSE	PBIAS	MAPE	RMSE	
۴/۵۳	۱۵/۰۹	۰/۵	-۳/۶	۱۲/۰۱	۰/۳۴	DO(mg/l)
۵/۸۷	۱۹/۵۷	۰/۶۹	۳/۵۸	۱۳/۲۱	۰/۲۶	(mg/l) CBOD <sub>f</sub>
-۱/۸۲	۷/۳۴	۶۱/۳۸	-۱/۰۶	۳/۵۲	۱۰/۶۹	EC (μm/cm)
-۴/۱۳	۱۳/۷۵	۰/۱۱	-۲/۰۵	۸/۵۶	۰/۰۴	NO3(mg N/l)
۶/۷۶	۲۲/۵۲	۰/۱۳	۵/۴	۱۸	۰/۰۷	NH4(mg N/l)
-۴/۴۷	۱۵/۹۱	۰/۰۳	-۴/۷۲	۲۳/۳۲	۰/۰۷	Organic N (mg N/l)
-۱/۶۶	۹/۳۱	۰/۰۹	۱/۳۴	۱۳/۲۶	۰/۱۴	TN(mg N/l)
-۱۱/۴۲	۳۸/۰۸	۰/۰۳	-۱۰/۰۹	۳/۶۲	۰/۰۶	Organic P (mg P/l)
-۳۰/۷۸	۱۰۲/۵۹	۰/۱۵	-۲۴/۳۸	۸۱/۲۶	۰/۱۲	Inorganic P (mg P/l)
-۱۹/۹۳	۶۶/۴۵	۰/۱۸	-۹/۱۷	۳۰/۵۷	۰/۰۶	TP(mg P/l)
۲/۱۶	۷/۱۹	۰/۱۲	۱/۷۸	۵/۹۳	۰/۱	pH
۱/۶	۵/۳۲	۱/۶۴	۲/۲۳	۷/۴۳	۳/۱۸	ALK(mg caco3/l)

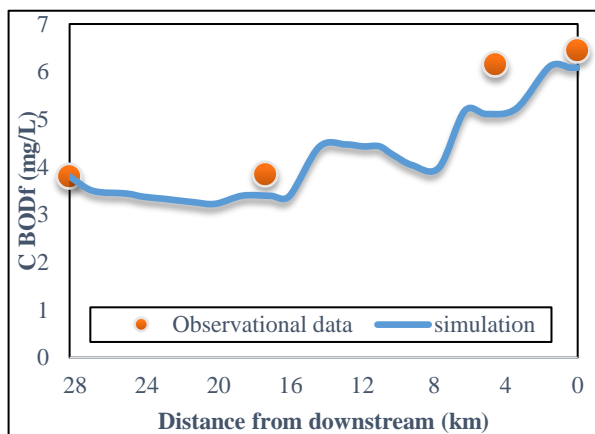


شکل ۱۷. شبیه‌سازی پارامتر هدایت الکتریکی در مرحله صحت‌سنجی

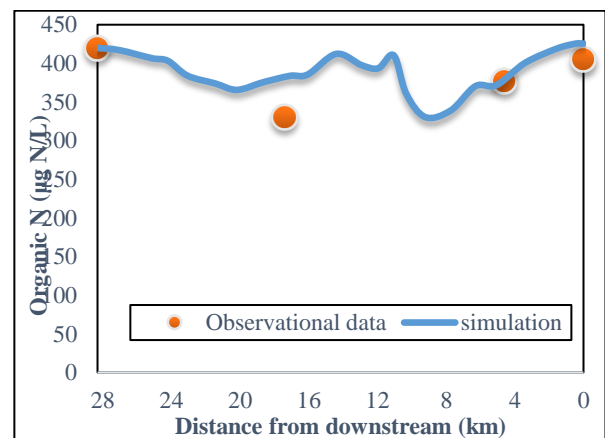


شکل ۱۸. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول در مرحله صحت‌سنجی

شبیه‌سازی EC در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۱۷) نشان داده شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله واسنجی نسبت به مرحله صحت‌سنجی هم‌خوانی بهتری دارند. در مرحله صحت‌سنجی، مقدار EC در ایستگاه دوم کمتر از مقدار واقعی برآورد شده است و از آنجا که RMSE به داده‌های پرت حساسیت بیشتری دارد، مقدار این شاخص در مرحله صحت‌سنجی ۶۱ و در مرحله واسنجی ۱۰ گزارش شده است، اما در شاخص PBIAS اختلاف کمی دیده می‌شود. همچنین، مقدار MAPE در مرحله واسنجی ۳/۵۲ بود که در مرحله صحت‌سنجی به ۷/۳۴ افزایش یافت. با توجه به جدول ۵، مقدار EC در رودخانه کارون در گروه ۴ که دارای بدترین کیفیت است، قرار دارد. در شبیه‌سازی اکسیژن محلول در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۱۸)، مشاهده می‌شود که اکسیژن محلول در ابتدای مسیر به بیش از حد اشباع رسیده است. همان‌طور که در جدول ۶ آمده است، مقدار RMSE در مرحله واسنجی از ۰/۳۴ به ۰/۵ در مرحله صحت‌سنجی افزایش یافته است. همچنین، در مرحله واسنجی مقدار MAPE کمتری به دست آمد. در رابطه با PBIAS، در مرحله واسنجی این شاخص منفی شد که نشان‌دهنده سوگیری منفی در مدل است، به این معنی که مدل به‌طور کلی مقادیر را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده است؛ اما این شاخص در مرحله صحت‌سنجی مثبت شد.



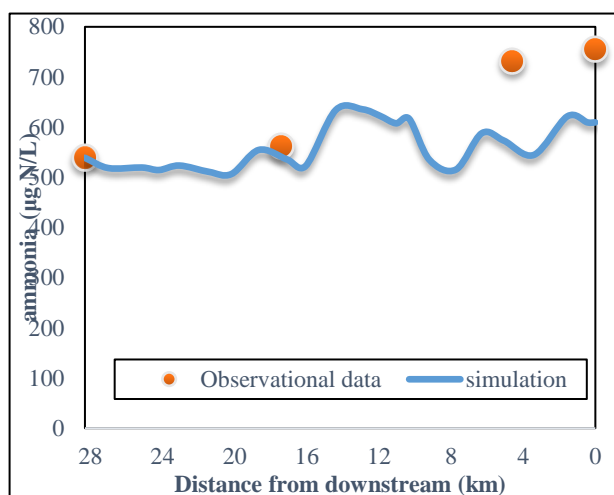
شکل ۱۹. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در مرحله صحت‌سنجی



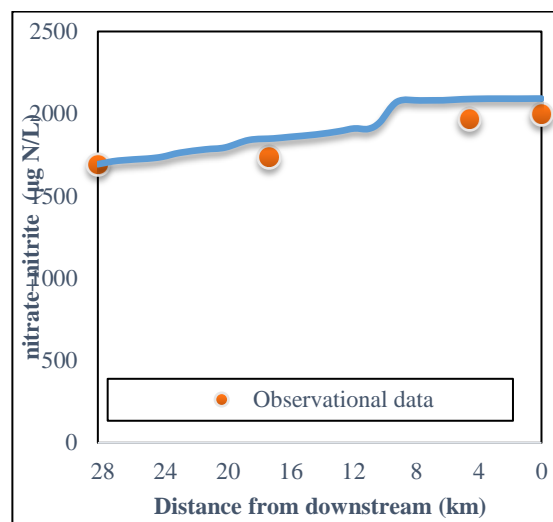
شکل ۲۰. شبیه‌سازی پارامتر نیتروژن آلی در مرحله صحت‌سنجی

روند شبیه‌سازی اکسیژن خواهی بیولوژیکی تند در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۱۹) به‌طور کلی مشابه مرحله واسنجی است. تفاوت اصلی در این است که در ایستگاه سوم، اختلاف بیشتری بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده می‌شود. با توجه به شاخص‌های ارزیابی دقت، می‌توان دریافت که شبیه‌سازی در مرحله واسنجی با دقت بیشتری انجام شده است. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده در مرحله صحت‌سنجی نیز در محدوده قابل‌قبول قرار دارند و می‌توان به آن‌ها اطمینان کرد. با مقایسه شبیه‌سازی نیتروژن آلی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان دریافت که مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله واسنجی در ایستگاه‌های دوم و سوم تفاوت داشته‌اند. با این حال، در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۲۰)، هم‌خوانی بهتری

بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده شده است. مقدار RMSE در مرحله واسنجی برابر با ۰/۰۷ بوده که در مرحله صحت‌سنجی بهبودیافته و به ۰/۰۳ رسیده است. همچنین، مقدار MAPE در مرحله واسنجی ۲۳/۳۲ بوده که در مرحله صحت‌سنجی به ۱۵/۹۱ کاهش یافته است. شاخص PBIAS نیز در هر دو مرحله منفی بوده، اما در مرحله صحت‌سنجی کمی کاهش یافته است. این اعداد و نتایج نشان می‌دهند که مدل در مرحله صحت‌سنجی تطابق بهتری داشته و به مقادیر واقعی نزدیک‌تر شده است.



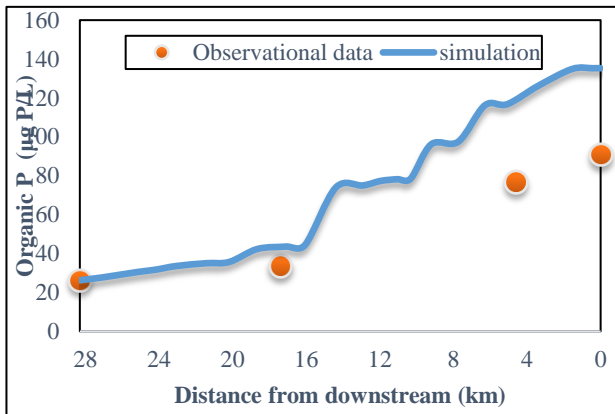
شکل ۲۱. شبیه‌سازی پارامتر آمونیوم در مرحله صحت‌سنجی



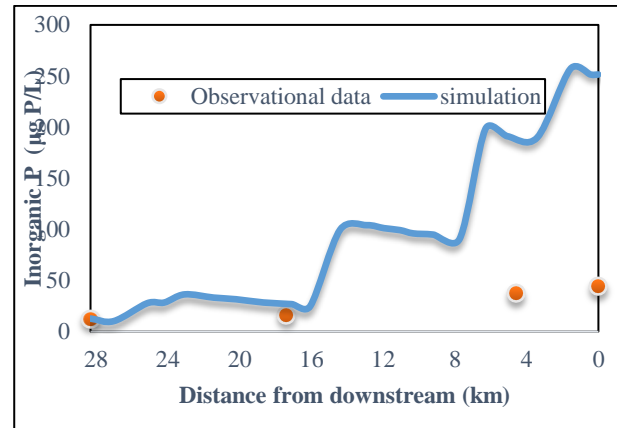
شکل ۲۲. شبیه‌سازی پارامتر نیتريت+نیترات در مرحله صحت‌سنجی

شبیه‌سازی آمونیوم در مرحله صحت‌سنجی در شکل (۲۱) نشان داده شده است. مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل نشان می‌دهد که هم‌خوانی بهتری بین این مقادیر در مرحله واسنجی نسبت به مرحله صحت‌سنجی وجود دارد. با توجه به جدول ۵، مقدار آمونیوم در رودخانه کارون در گروه ۲ قرار می‌گیرد، یعنی غلظت آمونیوم بین ۰/۵ تا ۲ میلی‌گرم بر لیتر است. در اکثر نقاط این رودخانه، غلظت آمونیوم بالاتر از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر مشاهده می‌شود. این در حالی است که سازمان بهداشت جهانی توصیه می‌کند غلظت آمونیوم در آب آشامیدنی نباید از ۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر تجاوز کند. مقدار شاخص PBIAS نیز در هر دو مرحله مثبت بوده است که نشان‌دهنده سوگیری مثبت مدل است؛ به این معنا که مدل به‌طور کلی مقادیر آمونیوم را کمتر از مقادیر واقعی شبیه‌سازی کرده است. مقدار PBIAS از ۵/۴ در مرحله واسنجی به ۶/۷۶ در مرحله صحت‌سنجی افزایش یافته است. برای اکثر کاربردها، PBIAS مطلوب بین -۱۰ و +۱۰ درصد است.

روند شبیه‌سازی نیترات در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۲۲) به‌طور کلی مشابه مرحله واسنجی است. با این حال، در مرحله صحت‌سنجی دقت شبیه‌سازی به‌اندازه مرحله واسنجی نبوده و مقادیر شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده اختلاف جزئی دارند. به‌طور کلی، مقدار نیترات در آب رودخانه کارون در حد مجاز است. بر اساس جدول ۵، حداکثر مقدار مجاز نیترات در آب رودخانه برای اکثر کاربردها ۴۴ میلی‌گرم بر لیتر است، در حالی که بیشترین مقدار نیترات اندازه‌گیری شده در رودخانه کارون ۲ میلی‌گرم بر لیتر است. همچنین، بر اساس استاندارد ملی ایران (ISIRI 1053)، حداکثر مجاز غلظت نیترات در آب آشامیدنی ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر و حداکثر مجاز غلظت نیتريت در آب آشامیدنی ۳ میلی‌گرم بر لیتر تعیین شده است. مقدار کم RMSE (جدول ۶) نیز دقت شبیه‌سازی مدل QUAL2KW در شبیه‌سازی نیتريت و نیترات را تأیید می‌کند. مقدار MAPE در مرحله واسنجی ۸/۵۶ و در مرحله صحت‌سنجی ۱۳/۷۵ است. همچنین، شاخص PBIAS در هر دو مرحله منفی است که به این معناست که مدل به‌طور کلی مقادیر را بیشتر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده است.



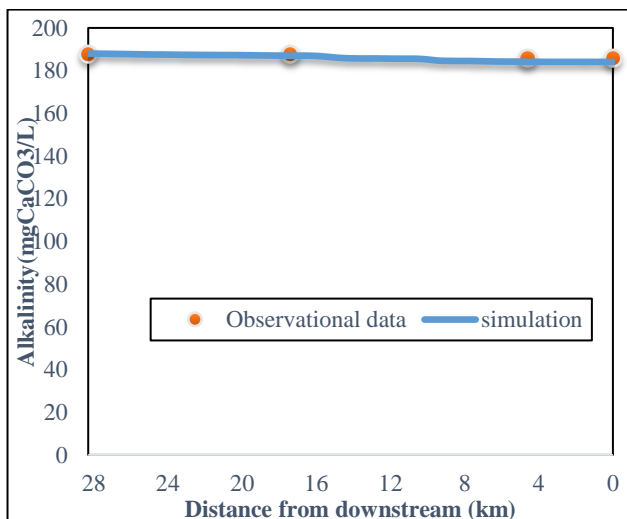
شکل ۲۳. شبیه‌سازی پارامتر فسفر آلی در مرحله صحت‌سنجی



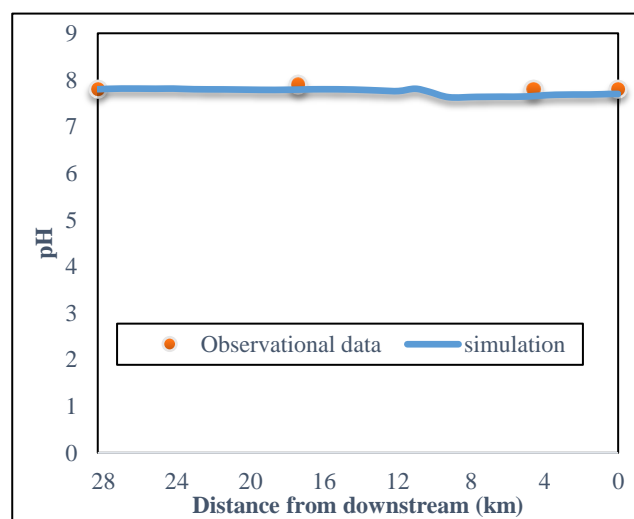
شکل ۲۴. شبیه‌سازی پارامتر فسفر غیر آلی در مرحله صحت‌سنجی

همان‌طور که در شکل (۲۳) مشاهده می‌شود، انطباق مناسبی بین نمودار داده‌های مشاهداتی و نمودار شبیه‌سازی مدل برای پارامتر فسفر آلی وجود ندارد. مدل مقدار فسفر آلی را بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده تخمین زده است. بر اساس استانداردهای ملی ایران برای کیفیت آب، مقدار مجاز فسفر (شامل فسفر آلی و غیر آلی) در آب‌های سطحی به منظور جلوگیری از تغذیه گرایبی و حفظ کیفیت آب، برای مصارف آشامیدنی حداکثر ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر و برای مصارف کشاورزی و صنعتی حداکثر ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر تعیین شده است. در ایستگاه‌های انتهایی رودخانه کارون، مقدار فسفر کل بیشتر از ۰/۲ میلی‌گرم در لیتر است و در محدوده غیرمجاز قرار دارد. با توجه به جدول ۶، مقادیر RMSE، MAPE و PBIAS نشان می‌دهند که دقت مدل در مرحله واسنجی بهتر از مرحله صحت‌سنجی بوده است. مقدار RMSE در هر دو مرحله یکسان و برابر با ۰/۰۳ است. مقدار MAPE در مرحله واسنجی ۳۳/۶۲ و در مرحله صحت‌سنجی ۳۸/۰۲ است که نشان‌دهنده دقت بهتر شبیه‌سازی در مرحله واسنجی است. مقدار PBIAS در مرحله واسنجی ۱۰/۰۹- و در مرحله صحت‌سنجی ۱۱/۴۲- است که مقدار قابل‌توجهی است.

مشابه با شبیه‌سازی فسفر آلی، تفاوت چشمگیری میان داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های شبیه‌سازی شده وجود دارد (شکل ۲۴). مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل نیز این عدم تطابق را تأیید می‌کنند. مقدار RMSE در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۱۲ و ۰/۱۵ است که شاید در نگاه اول شرایط خوبی را نشان دهد، اما با نگاهی به شاخص‌های دیگر درمی‌یابیم که مقدار MAPE در مرحله واسنجی ۸۱/۲۶ است و در مرحله صحت‌سنجی شرایط شبیه‌سازی بدتر شده و به ۱۰۲/۵۹ رسیده است. این نشان می‌دهد که مدل در مرحله صحت‌سنجی عملکرد ضعیف‌تری داشته است. علاوه بر این، مقدار PBIAS در مرحله واسنجی ۲۴/۳۸- و در مرحله صحت‌سنجی ۳۰/۷۸- است. مقدار PBIAS بالاتر از ۱۰ نشان‌دهنده سوگیری قابل‌توجهی در مدل است، به طوری که مقادیر منفی PBIAS نشان می‌دهند مدل مقادیر فسفر را به طور سیستماتیک کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است.



شکل ۲۵. شبیه‌سازی پارامتر قلیائیت در مرحله صحت‌سنجی

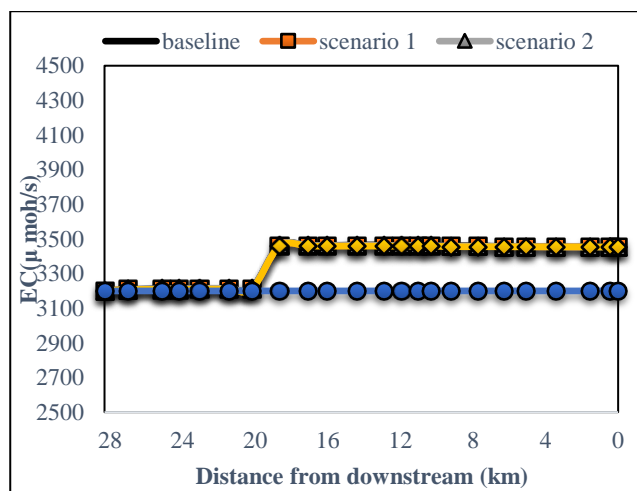


شکل ۲۶. شبیه‌سازی پارامتر pH در مرحله صحت‌سنجی

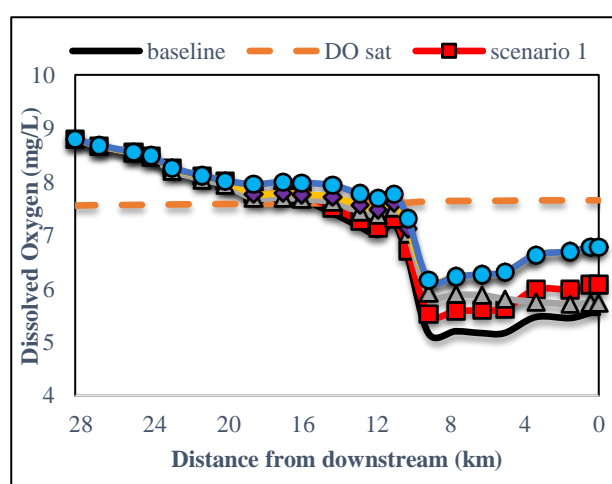
با مقایسه شبیه‌سازی قلیائیت در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی می‌توان دریافت که مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل در مرحله واسنجی در ایستگاه‌های سوم و چهارم تفاوت جزئی داشته‌اند. باین‌حال، در مرحله صحت‌سنجی (شکل ۲۵) هم‌خوانی بهتری بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده مشاهده شده است. با توجه به جدول ۶، مقادیر RMSE، MAPE و PBIAS نشان می‌دهند که دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی بهتر از مرحله واسنجی بوده است. مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در پارامتر pH در مرحله صحت‌سنجی هم‌خوانی خوبی داشته است که این به معنی شبیه‌سازی نسبتاً خوب مدل برای این پارامتر است (شکل ۲۶). روند تغییرات غلظت pH در کل طول مسیر رودخانه تقریباً یکنواخت و ثابت است و مقدار غلظت پارامتر مذکور در ایستگاه‌های مطالعاتی از ۸/۵ بالاتر نرفته است و در حد استاندارد باقی‌مانده است. در مرحله صحت‌سنجی، مدل با داده‌های جدید و مستقل آزمایش می‌شود تا اعتبار و عمومی سازی آن بررسی شود. اگرچه در این مرحله ممکن است اختلافاتی بین نتایج شبیه‌سازی و مقادیر اندازه‌گیری شده مشاهده شود، این اختلافات معمولاً در محدوده‌ای قرار دارند که نشان‌دهنده اعتبار کلی مدل است. اختلاف اندک بین داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای موردبررسی و سطوح شبیه‌سازی شده به‌وسیله مدل Qual2kw نشانگر در نظر گرفتن تمامی آلاینده‌های ورودی به مدل است. درنهایت نتایج شبیه‌سازی شده نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی شده انطباق خوبی باهم داشته است که نشان از دقت خوب مدل در شبیه‌سازی کیفی است. سایر محققین نیز در پژوهش‌های خود به کارایی مناسب این مدل اشاره کرده‌اند (Khonok, et al., 2021)، (Arianejad, et al., 2020) و (Hoseini & Hoseini, 2017).

#### سناریوهای طرح جامع فاضلاب شهر اهواز

با تأیید صحت و دقت مدل شبیه‌سازی کیفی در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، اکنون می‌توان از مدل ساخته‌شده برای بررسی سناریوهای مختلف در رودخانه کارون استفاده کرد. با توجه به احداث تصفیه‌خانه‌ها و امکان حذف فاضلاب‌های ورودی به رودخانه، در این مطالعه به بررسی کیفیت آب در پایین‌دست رودخانه با تغییر ورودی‌های فاضلاب پرداخته می‌شود. طرح جامع فاضلاب شهر اهواز شامل احداث شبکه فاضلاب در تمام مناطق شهر، احداث تصفیه‌خانه‌های جدید و ارتقای تصفیه‌خانه‌های موجود است. اجرای این طرح به‌طور کامل، می‌تواند فاضلاب تمامی مناطق اهواز را جمع‌آوری و تصفیه کند و از ورود هرگونه فاضلاب به رودخانه کارون جلوگیری نماید. این مطالعه به بررسی اثرات اجرای سناریوهای مختلف طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون می‌پردازد. سناریوهای موردبررسی شامل وضعیت فعلی و چندین حالت پیشنهادی است که به ترتیب عبارت‌اند از: سناریوی پایه که شبیه‌سازی کیفیت آب در وضعیت فعلی است؛ سناریوی اول که به شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در صورت راه‌اندازی تصفیه‌خانه شرق اهواز و حذف تمامی ورودی‌های فاضلاب در ساحل شرق رودخانه می‌پردازد؛ سناریوی دوم که تکمیل ۸۰ درصد ظرفیت تصفیه‌خانه غرب و حذف تمامی ورودی‌های فاضلاب در ساحل غرب را شبیه‌سازی می‌کند؛ سناریوی سوم که اجرای کامل طرح جامع فاضلاب شهر اهواز و حذف تمامی ورودی‌های فاضلاب به‌جز زهکش‌ها را بررسی می‌کند؛ و درنهایت سناریوی چهارم که اجرای کامل طرح جامع فاضلاب و همچنین کنترل زهکش‌ها را مدنظر قرار می‌دهد. در ادامه این مطالعه، به‌تفصیل به بررسی هر یک از سناریوها و نتایج شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه کارون در هر یک از آن‌ها پرداخته شده است.

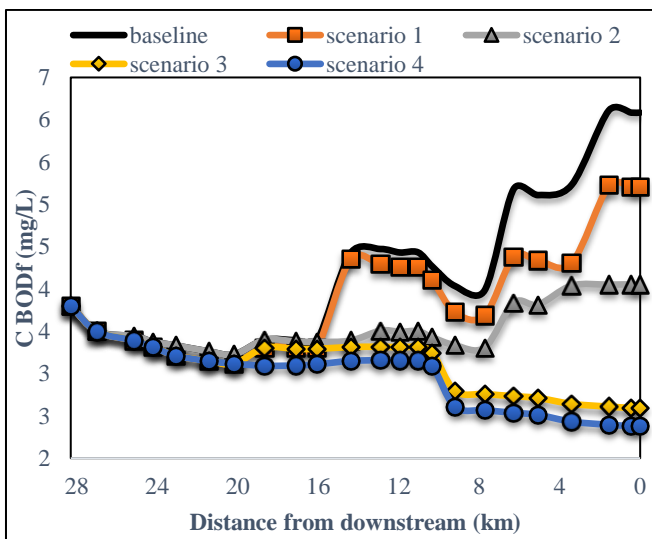


شکل ۲۷. شبیه‌سازی پارامتر هدایت الکتریکی در سناریوهای مختلف

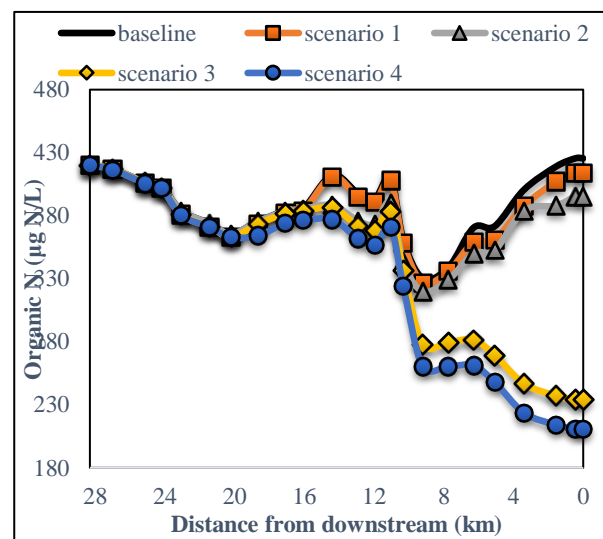


شکل ۲۸. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول در سناریوهای مختلف

نمودار نشان داده‌شده در شکل (۲۷)، تغییرات هدایت الکتریکی را برحسب فاصله از پایین‌دست در چهار سناریوی طرح جامع فاضلاب شهر اهواز و وضعیت فعلی را نشان می‌دهد. وضعیت فعلی که با خط ساده سیاه‌رنگ نمایش داده‌شده است، مقدار هدایت الکتریکی تقریباً ثابت و در حدود ۳۳۵۰ میکرو موس دارد. در سه سناریوی (سناریوهای ۱، ۲ و ۳)، مقدار هدایت الکتریکی مشابه وضعیت فعلی بوده و با کمی نوسان در حدود ۳۳۵۰ میکرو موس است. در سناریوی چهارم که در آن کنترل ورود زهکش‌ها اعمال می‌گردد، مقدار هدایت الکتریکی به‌طور محسوسی کمتر است و در حدود ۳۱۰۰ میکرو موس قرار دارد. شبیه‌سازی اکسیژن محلول در شکل (۲۸) نشان داده‌شده است. در سناریوی اول، شاهد کمی افزایش در میزان اکسیژن محلول هستیم که این افزایش پس از ۹ کیلومتر ۹، جایی که ورود فاضلاب بیمارستان امام خمینی به رودخانه کارون قطع می‌شود، بیشتر مشهود است. سناریوی دوم تأثیر بیشتری نسبت به سناریوی اول بر اکسیژن محلول دارد، اما پس از ۴ کیلومتر به دلیل ورود فاضلاب منطقه آخر آسفالت در ساحل شرقی، از سناریوی اول کمتر می‌شود. سناریوی سوم، اجرای کامل طرح حذف ورودی فاضلاب از هر دو ساحل شرقی و غربی، تأثیر قابل‌توجهی بر اکسیژن محلول می‌گذارد. در ایستگاه آخر، اکسیژن محلول از ۵/۵ به ۶/۸ افزایش می‌یابد. در سناریوی چهارم، تأثیر مقطعی کنترل زهکش‌ها از ۲۰ کیلومتر مشاهده می‌شود، اما در نهایت نتایج آن مشابه سناریوی سوم است.



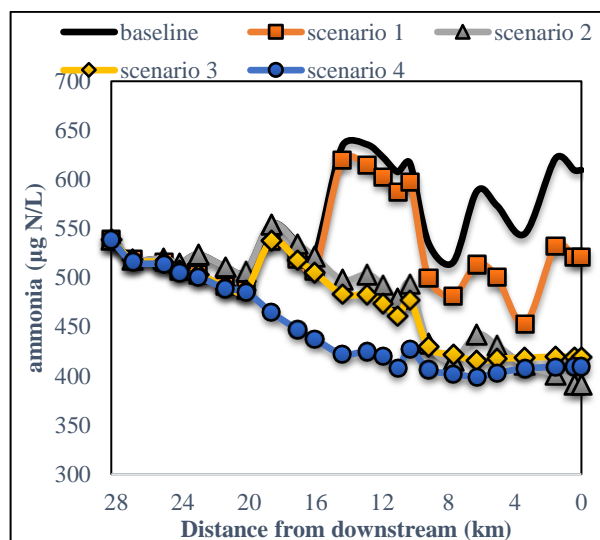
شکل ۲۹. شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی در سناریوهای مختلف



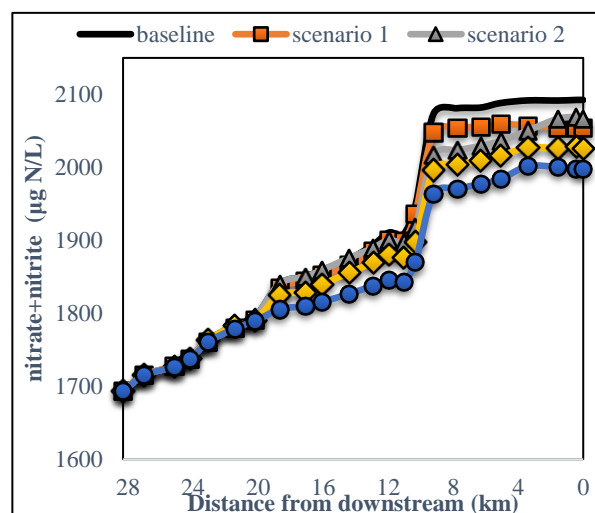
شکل ۳۰. شبیه‌سازی پارامتر نیتروژن آلی در سناریوهای مختلف

نمودار نشان داده‌شده در شکل (۲۹) تغییرات اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی تند (BODf) را در سه سناریوی و وضعیت فعلی نشان می‌دهد. در وضعیت فعلی، افزایش تدریجی و قابل‌توجهی در غلظت BODf از بالادست به پایین‌دست مشاهده می‌شود. در سناریوی اول که به راه‌اندازی تصفیه‌خانه شرق مربوط است، کمی کاهش نسبت به وضعیت فعلی دیده می‌شود و در نهایت غلظت از ۶ میلی‌گرم بر لیتر به ۵/۲۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. در سناریوی دوم که شامل استفاده از تمام ظرفیت تصفیه‌خانه‌های غرب است، تأثیر بیشتری بر کاهش BODf مشاهده می‌شود. در سناریوی سوم که طرح جامع فاضلاب شهر اهواز را شامل می‌شود و تمامی آلاینده‌ها کنترل می‌شوند، مقدار BODf روند کاملاً نزولی دارد و در بهترین حالت، مقدار BODf از ۴ به ۲/۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. این نتایج با نتایج تحقیق (Shafiee et al., 2024) مطابقت دارد که پارامتر اکسیژن‌خواهی را در دو حالت سناریوی موجود و رعایت استاندارد تخلیه پساب به آب‌های سطحی در رودخانه کارون بررسی کردند. نتایج نشان داد میزان اکسیژن‌خواهی در طول رودخانه تغییرات زیادی داشته و روند کاهشی داشته است، به طوری که در ۱۸ کیلومتر حدود ۴۸ درصد کاهش یافته و این روند کاهشی تا پایین‌دست ادامه دارد. تغییرات نیتروژن آلی در شکل (۳۰) نشان داده‌شده است. وضعیت فعلی و سناریوهای ۱ و ۲ مقدار و الگوی نیتروژن آلی مشابهی دارند. در سناریوهای ۳ و ۴، روند تغییرات نیتروژن آلی کاملاً نزولی است. سناریوی ۴ دارای کمترین مقدار نیتروژن آلی است، به طوری که مقدار نیتروژن آلی در پایین‌دست تقریباً نصف مقدار آن در بالادست است که نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه کیفیت آب است.



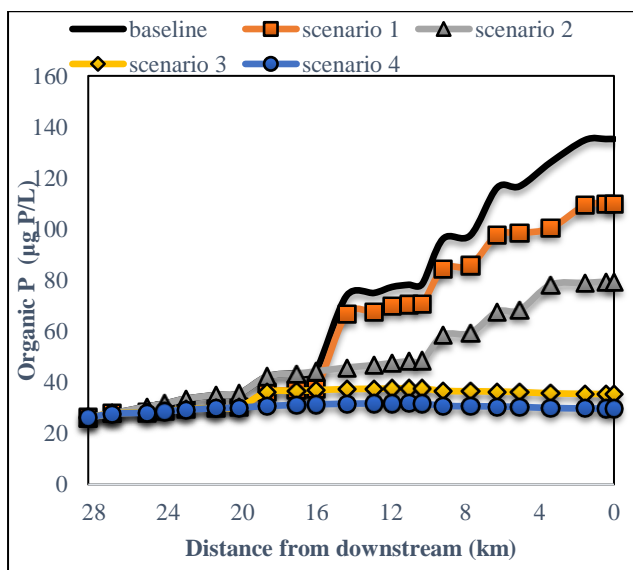


شکل ۳۱. شبیه‌سازی پارامتر آمونیوم در سناریوهای مختلف

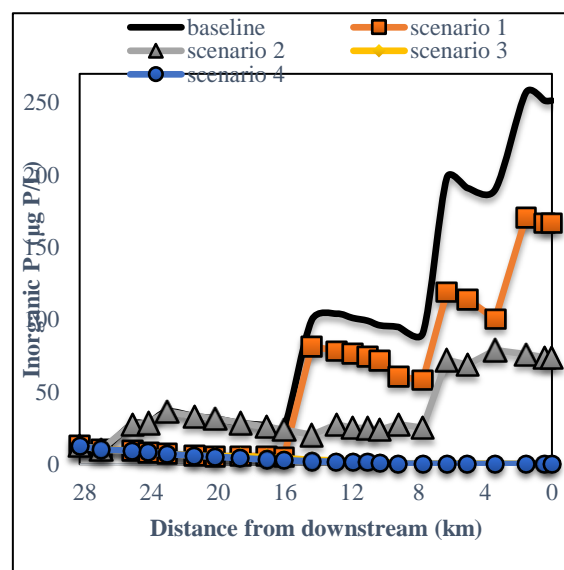


شکل ۳۲. شبیه‌سازی پارامتر نیترات+ نیتريت در سناریوهای مختلف

نمودار شکل (۳۱) تغییرات آمونیوم را در سه سناریوی و وضعیت فعلی نمایش می‌دهد. در سناریوی اول، روند تغییرات آمونیوم تقریباً مشابه وضعیت فعلی است ولی با کمی کاهش. در سناریوی دوم، از کیلومتر ۱۶ به بعد کاهش چشمگیری مشاهده می‌شود که احتمالاً به دلیل حذف فاضلاب کیان‌آباد با دبی ۱/۱ مترمکعب بر ثانیه است و پس از کیلومتر ۱۶ این روند کاملاً کاهشی می‌شود. این نمودار نشان می‌دهد که راه‌اندازی تصفیه‌خانه‌های غرب اهواز چقدر در کاهش میزان آمونیوم مؤثر است. روند تغییرات در سناریوی سوم تقریباً مشابه سناریوی دوم است و از کیلومتر ۲۰ به بعد، جایی که زهکش ۱ و ۲ کنترل می‌شوند، میزان آمونیوم به شدت کاهش می‌یابد. تحلیل شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سناریوی دوم در مقایسه با سناریوی اول، افت قابل توجه‌تری در غلظت نیترات و نیتريت رودخانه ایجاد می‌کند. (شکل ۳۲) این اثرگذاری در سناریوی سوم که ترکیبی از سناریوهای اول و دوم است، تشدید می‌شود و بیشترین کاهش نیترات را به ارمغان می‌آورد. در سناریوی چهارم که به کنترل زهکش‌ها می‌پردازد، از کیلومتر ۲۰ به بعد شاهد افت چشمگیری در غلظت نیترات هستیم. این یافته‌ها نشان‌دهنده نقش مؤثر کنترل زه آب‌های کشاورزی در کاهش آلودگی نیترات و ارتقای کیفیت آب رودخانه کارون است.



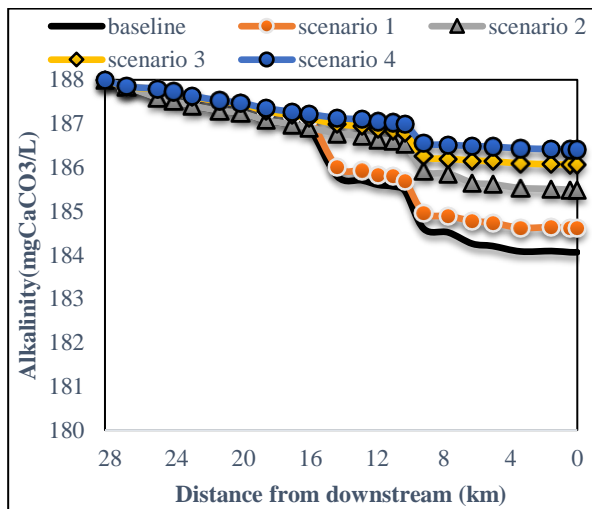
شکل ۳۳. شبیه‌سازی پارامتر فسفر آلی در سناریوهای مختلف



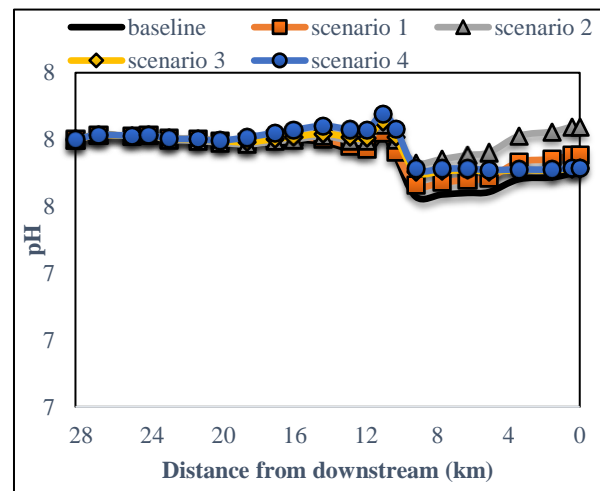
شکل ۳۴. شبیه‌سازی پارامتر فسفر غیر آلی در سناریوهای مختلف

روند تغییرات فسفر آلی (شکل ۳۳) در سناریوی اول با کمی کاهش مشابه وضعیت فعلی است. در سناریوی دوم، این مقدار کاهش بیشتری دارد اما در کیلومتر ۸ افزایش می‌یابد که به دلیل ورود فاضلاب‌های ساحل شرقی به رودخانه کارون است. در سناریوی سوم که اجرای کامل طرح جامع فاضلاب شهر اهواز را شامل می‌شود، روند تغییرات کاملاً کاهشی است. در سناریوی چهارم می‌توان دریافت که

کنترل زهکش‌ها تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر کاهش غلظت فسفر آلی ندارد. وضعیت فعلی فسفر غیر آلی نشان‌دهنده یک وضعیت بحرانی در نزدیکی پایین‌دست رودخانه کارون است (شکل ۳۴). سناریوی اول کاهش نسبی آلودگی را نسبت به وضعیت فعلی نشان می‌دهد، اما همچنان افزایش قابل توجهی در نزدیکی پایین‌دست مشاهده می‌شود. سناریوی دوم به‌طور قابل ملاحظه‌ای مؤثر بوده است؛ در کیلومتر ۱۶ که فاضلاب کیان‌آباد حذف شده، روند افزایشی فسفر غیر آلی متوقف گردیده است؛ اما در کیلومتر ۸، جایی که فاضلاب بیمارستان امام خمینی و در ادامه فاضلاب بیمارستان مهر وارد می‌شود، دوباره روند افزایشی دیده می‌شود. سناریوی سوم و چهارم بهترین نتایج را نشان می‌دهند، زیرا میزان فسفر غیر آلی در حد بسیار پایینی نگه‌داشته شده است. همانند فسفر آلی، کنترل زهکش‌ها تأثیر چندانی در کاهش آلودگی ناشی از فسفر غیر آلی نداشته است.



شکل ۳۵. شبیه‌سازی پارامتر قلیائیت در سناریوهای مختلف



شکل ۳۶. شبیه‌سازی پارامتر pH در سناریوهای مختلف

در شکل (۳۵) وضعیت فعلی نشان‌دهنده کاهش قلیائیت در نزدیکی پایین‌دست است که ناشی از ورود آلودگی است. سناریوهای اول بهبود نسبی در میزان قلیائیت را نشان می‌دهند، اما همچنان کاهش قلیائیت در نزدیکی پایین‌دست مشاهده می‌شود. سناریوی دوم بهبود قابل ملاحظه‌ای در میزان قلیائیت داشته است. سناریوهای سوم و چهارم وضعیت بهتری را ایجاد می‌کنند و سناریوی چهارم بهترین نتایج را نشان می‌دهد، زیرا میزان قلیائیت در حد بالایی نگه‌داشته شده است. با این حال، کنترل زهکش‌ها در سناریوی چهارم نسبت به سناریوی سوم تغییر قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد. شکل (۳۶) تغییرات pH در طول رودخانه را نشان می‌دهد. در سناریوی اول، روند تغییرات با کمی کاهش مشابه وضعیت فعلی است. در سناریوی دوم، مقدار pH در پایین‌دست از ۷/۷۱ به ۷/۸۴ افزایش یافته است. همچنین، مقدار pH در سناریوی سوم که شامل حذف تمام ورودی‌های فاضلاب است، کمتر از سناریوی دوم است که فقط شامل حذف ورودی فاضلاب‌های ساحل غرب است. سناریوی چهارم نیز مشابه سناریوی سوم است.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه، با استفاده از مدل‌سازی کیفی، اثرات اجرای طرح جامع فاضلاب شهر اهواز بر کیفیت آب رودخانه کارون بررسی شده است. پنج سناریوی مورد بررسی قرار گرفت: وضعیت فعلی، راه‌اندازی تصفیه‌خانه شرق، تکمیل تصفیه‌خانه غرب، اجرای کامل طرح جامع فاضلاب و اجرای کامل طرح جامع فاضلاب به همراه کنترل زهکش‌ها. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفی آب رودخانه کارون دقت قابل قبولی دارد. تغییرات کیفیت آب در سناریوهای مختلف شبیه‌سازی شده، عمدتاً از کیلومتر ۲۰ به بعد مشهود است، چراکه دبی ورودی فاضلاب‌ها قبل از این نقطه کم است. اجرای طرح جامع فاضلاب شهر اهواز و کنترل زهکش‌ها، می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در غلظت آلاینده‌هایی مانند BOD، نیترات، نیتريت، آمونیوم، فسفر و فلزات سنگین در رودخانه کارون شود. در این میان، سناریوی چهارم که شامل اجرای کامل طرح جامع فاضلاب و کنترل زهکش‌ها است، بهترین نتیجه را به ارمغان می‌آورد و کیفیت آب رودخانه را در تمام پارامترهای مورد بررسی، به جز فسفر آلی، به حد استاندارد می‌رساند. با توجه به یافته‌های این مطالعه، می‌توان دریافت راه‌اندازی تصفیه‌خانه‌های فاضلاب شهر اهواز به‌منظور بهبود افزایش بازدهی

سیستم تصفیه و انجام فعالیت‌های مدیریتی در زمینه کنترل کیفیت پساب‌های ورودی به رودخانه کارون و اعمال اقدامات کنترل‌کننده، تشویقی و تنبیهی به فراخور اقدامات انجام‌شده به‌منظور کاهش آلودگی رودخانه کارون دارای اهمیت بسزایی است. با توجه به یافته‌های این مطالعه، به مسئولان ذی‌ربط توصیه می‌شود که اجرای طرح جامع فاضلاب شهر اهواز را به‌طور کامل و با جدیت پیگیری کنند. همچنین، پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آینده، تأثیر فصول مختلف سال و تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب رودخانه کارون و بازدهی تصفیه‌خانه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. علاوه بر این، مطالعات آتی می‌توانند به ارزیابی تأثیرات اقتصادی و اجتماعی اجرای طرح جامع فاضلاب و کنترل زهکش‌ها بر جامعه محلی بپردازند تا مزایا و چالش‌های اجرای چنین طرح‌هایی بهتر درک شود.

## قدردانی و تشکر

نویسندگان از حمایت مالی بنیاد ملی علم ایران (گرات شماره ۴۰۲۴۶۶۱) و دانشگاه بین‌المللی امام خمینی<sup>(۵)</sup> برای انجام این تحقیق تشکر می‌کنند.

## "هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## منابع

- آریایی نژاد، رزیتا؛ سرائی تبریزی، مهدی و بابازاده، حسین. (۱۳۹۸). مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2Kw (مطالعه موردی: رودخانه شاهرود). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*, ۲۱(۷), ۱-۱۳.
- امامی قرا، فائزه؛ فضل اولی، رامین و خوش روش، مجتبی. (۱۴۰۲). بررسی روند تغییرات کیفی رودخانه نکا با استفاده از مدل QUAL2Kw در پایین دست سد گلورد. *نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران*, ۱۴(۱), ۲۶۶-۲۸۳.
- ایرنا. (۱۴۰۲). طرح جمع‌آوری ۱۲ نقطه ورود فاضلاب به کارون تا پایان امسال به اتمام می‌رسد. تهران: ایرنا.
- جعفر زاده حقیقی، نعمت‌الله؛ توسلی، محمد و باروتکوب، علی. (۱۳۸۴). بررسی تغییرات کیفیت آب رودخانه کارون با کاربرد برنامه Qual2E. *تحقیقات منابع آب ایران*, ۱(۲), ۸۵-۹۶.
- حسینی، پگاه و حسینی، یاسر. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات توان خودپالایی رودخانه کارون در سال‌های ۸۷ و ۹۲ با استفاده از مدل QUAL2KW در محدوده شهر اهواز. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*, ۴۹(۱), ۳۵-۴۶.
- حسینی، پگاه؛ ایلدرومی، علی رضا و حسینی، یاسر. (۱۳۹۵). بررسی کارایی مدل Qual2kw در خودپالایی رودخانه (مطالعه موردی رودخانه کارون در بازه زرگان - کوت‌امیر). *علوم و تکنولوژی محیط زیست*, ۱۸(۴), ۱۰۳-۱۲۲.
- خنک، آرش؛ سرائی تبریزی، مهدی؛ بابازاده، حسین؛ صارمی، علی و محمدی قلعه‌نی، مهدی. (۱۴۰۰). مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استفاده از نرم‌افزار Qual2kw. *مجله پژوهش آب ایران*, ۱۵(۱), ۱۲۱-۱۳۱.
- شفیعی، مهسا؛ عزیزی پور، محمد؛ ساسانی، حسین و تکدستان، افشین. (۱۴۰۳). ارزیابی کیفیت آب رودخانه کارون در محدوده شهر اهواز براساس استانداردهای موجود. *مجله علمی - پژوهشی مهندسی عمران مدرس*, ۲۴(۱), ۱۲۵-۱۱۳.
- عبدالخانی، علی؛ نیکبخت شهبازی، علیرضا و ظهراپی، نرگس. (۱۳۹۴). مدل‌سازی کیفی رودخانه کرخه در بالادست و پایین دست شهرستان شوش با بکارگیری نرم‌افزار Qual2k. *دوفصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب*, ۵(۱۲), ۵۱-۶۷.
- کارآموز محمد و کراچیان رضا. (۱۳۹۱). *برنامه ریزی و مدیریت کیفی سیستم‌های منابع آب*. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- مروج، مجتبی؛ کریمی راد، ایمان و ابراهیمی، کیومرث. (۱۳۹۶). ارزیابی وضعیت کیفی رودخانه کارون بر اساس شاخص کیفیت آب و استفاده از GIS. *نشریه اکوهیدرولوژی*, ۴(۱), ۲۵۵-۲۳۵.
- مقیمی نژاد، سمیه؛ ابراهیمی، کیومرث و کراچیان، رضا. (۱۳۹۶). مطالعه تغییرات فصلی خودپالایی رودخانه کارون. *نشریه مهندسی عمران امیرکبیر*, ۴۹(۴), ۶۲۱-۶۳.
- وائلی زاده نادره. (۱۴۰۲). *کارون، قربانی طرح‌های نیمه تمام*. تهران: روزنامه اعتماد.

## REFERENCES

- Abdolkhani, A., Nikbakht Shahbazi, A., & Zohrabi, N. (2015). Determination and Simulation of Water Quality in Karkheh River Using QUAL2K Model. *Journal of Water Science & Engineering*, 5(12), 51-67. (In Persian)
- Afkhami, M., Shariat, M., Jaafarzadeh, N., & Ghadiri, H. (2007). DEVELOPING A WATER QUALITY



- MANAGEMENT MODEL FOR KARUN AND DEZ RIVERS. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 4(2), 99-106.
- Arianejad, R., Sarai Tabrizi, M., & Babazadeh, H. (2020). River water quality modeling using the QUAL2Kw model (case study: Shahroud River). *Iranian Journal of Environmental Science and Technology*, 21(7), 1-13. (In Persian)
- Campolo, m., andreussi, p., & soldati, a. (2002). Water quality control in the river Arno. *Water Research*, 36(10), 2673-2680.
- Emami Ghara, F., Fazluola, R., & Khoshravesh, M. (2023). Investigating Trends of Qualitative Changes of Neka River Using the QUAL2Kw in the Downstream of Gelevar Dam. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 53(1), 266-283. (In Persian)
- Hoseini, P., & Hoseini, Y. (2017). Changes in Self-Purification Capacity of the Ahvaz Karun River in 2008 and 2014 using QUAL2Kw Model. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(1), 35-46. (In Persian)
- Hoseini, P., Ildrmi, A., & Hoseini, Y. (2016). Investigating the efficiency of the Qual2kw model in self-purification of the river (a case study of the Karun River in the Zargan-Kut Amir area). *Environmental Science and Technology*, 18(4), 103-122. (In Persian)
- IRNA. (2023). The plan to collect 12 sewage entry points in Karun will be completed by the end of this year. Khuzestan province: IRNA. (In Persian)
- Jafarzadeh- Haghighi, N., Tavasoli, M., & Barootkoob, A. (2005). Investigation of Karoon River Water Quality Variations Using Qual2E Program. *Iran-Water Resources Research*, 1(2), 85-96. (In Persian)
- Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y.-S., Kanel, S., & Pelletier, G. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Journal of Ecological Modelling*, 202(3), 503-517.
- Karamouz, m., & kerachian, r. (2018). *Planning and quality management of water resources systems* (Seventh Edition ed.). Tehran: Amirkabir University of Technology Publications. (In Persian)
- Karamouz, M., Zahraie, B., & Kerachian, R. (2012). Development of a Master Plan for Water Pollution Control using MCDM Techniques: A Case Study. *Water International*, 28(4), 478-490.
- Khan, M. A., Gani, K. M., & Chakrapani, G. J. (2017). Spatial and temporal variations of physicochemical and heavy metal pollution in Ramganga River—a tributary of River Ganges, India. *Environmental Earth Sciences*, 76(231).
- Khonok, A., Sarai Tabrizi, M., Babazadeh, H., Saremi, A., & mohammadi Ghaleni, M. (2021). Modeling Water Quality of Sefidroud River Using Qual2kw. *Iranian Water Researches Journal*, 15(1), 121-131. (In Persian)
- Khonok, A., Tabrizi, M., Babazadeh, H., Saremi, A., & Ghaleni, M. (2022). Sensitivity analysis of water quality parameters related to flow changes in regulated rivers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(4), 3001-3014.
- Lai, Y., Tu, Y., Yang, C., Surampalli, R., & Kao, C. (2013). Development of a water quality modeling system for river pollution index and suspended solid loading evaluation. *Journal of Hydrology*, 478, 89-101.
- Lusiana, N., Sulianto, A. A., Devianto, L. A., & Sabina, S. (2020). Penentuan Indeks Pencemaran Air dan Daya Tampung Beban Pencemaran Menggunakan Software QUAL2Kw (Studi Kasus Sungai Brantas Kota Malang). *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 8(2), 161-176.
- Maddi-Niya, M., Manouri, M., Karbasi, A., Baghernaboi, M., & Rajabzadeh, E. (2014). Water quality investigation of Karun river in Ahvaz using water quality index. *Environmental Science and Technology*, 16(1), 49-60.
- Moghimi Nezaad, s., Ebrahimi, K., & Kerachian, r. (2018). Investigation of Seasonal Self-purification Variations of Karun River, Iran. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 49(4), 193-196. (In Persian)
- Moravej, M., Karimirad, I., & Ebrahimi, K. (2017). Evaluation of Karun River water quality status based on Water Quality Index and involving GIS environment. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(1), 225-235. (In Persian)
- Pelletier, G., & Chapra, S. (2008). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). *A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality* (Vols. 98504-7710). Washington: Environmental Assessment Program.
- Randall, C., Benefield, L., & Buth, D. (1982). The Effects of Temperature on the Biochemical Reaction Rates of the Activated Sludge Process. *Water Sci Technol*, 14(2), 413-430.
- Salis, H., da Costa, A., Vianna, J., Schuler, A., Künne, A., Fernandes, L., & Pacheco, F. (2019). Hydrologic Modeling for Sustainable Water Resources Management in Urbanized Karst Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(14), 1-19.

- Sarda, P., & Sadgir, P. (2005). Water Quality Modeling and Management of Surface Water using Soft Tool. *Environmental Science, Engineering*, 4(9), 2980-2992.
- Shafiee, M., Azizpour, M., Sasani, H., & Takdastan, A. (2024). Assessment of Water Quality in the Karun River of Ahvaz City According to Existing Standards. *Modares Civil Engineering journal*, 24(1), 113-125. (In Persian)
- Turner, D., Pelletier, G., & Kasper, B. (2009). Dissolved Oxygen and pH Modeling of a Periphyton Dominated, Nutrient Enriched River. *Journal of Environmental Engineering*, 135(8), 642-652.
- Vaelizadeh, N. (2023). *karoun, the victim of half-finished plans*. Ahvaz: Etemad Newspaper. (In Persian)