Journal of Environmental Research
Vol. 13, No. 25, Spring & Summer 2022

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Print ISSN: 2008-9597 Online ISSN 2008-9590

Modeling of Water Quality Parameters of Karaj River Using CE-QUAL-W2 Model

Document Type
Research Paper

Received
2018/12/22

Accepted
2022/07/11

Sahar Saeidi[1]; Seyed Hamed Mirkarimi[2*]; Motahareh Saadatpour [3]

1 PhD Candidate of Environmental Sciences - Water Resources, MATE University, Hungary
2 Associate Professor, Department of Environmental Sciences, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran
3 Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

DOI: 10.22034/eiap.2022.158571

Abstract
Nowadays, due to the expansion of societies and consequently increased use of water resources, abnormalities in rivers have increased and eventually led to changes in water quality conditions. Therefore, it is essential try to develop a management system to predict the pollutants behavior and also prevent excessive environmental pollution. The aim of this research is to model the changes of water quality parameters of Karaj River using CE-QUAL-W2 model. In order to achieve the research goal, hydrodynamics of the system (water velocity) and river quality parameters including nitrate, phosphate, algae, ammonium, dissolved oxygen, biological oxygen demand were calibrated and then verified. The results show a suitable matching with observed data. Moreover comparing the results of simulated concentration of DO and BOD with the standard level of these parameters for surface water is an evident for the health of the river. Considering the accurate predictions of the model, it can be concluded that utilizing of appropriate mathematical models with spending less time and cost compared to field monitoring and laboratory observations for qualitative simulation and representing management scenarios would be a very useful tool in water resource management and would help the planners and managers as a decision support tool to achieve the goals of sustainable development.

Keywords: Modeling, Water quality, Hydrodynamic, Karaj River, CE-QUAL-W2

* Corresponding author Email: mirkarimi@gau.ac.ir

Extended abstract

Introduction

Water resources are key factors of sustainable development. Rapid population growth in recent years has led to increasing water demands. Unsustainable development pathways and governance failures have affected the quality, quantity and availability of water resources (Kundu et al., 2017).

It should be considered that the amount of contaminants of surface water resources is associated with the surrounding land-uses. So, Modelling and developing a management system in order to predict the water resource reactions and prevent excessive environmental pollution, based on a continuous monitoring and evaluation system is essential (Rui et al., 2015). In this regard, Mathematical models are useful tools to determine the expected reaction of streamflow by influx of pollutants. These models that are able to simulate the concentration and distribution of pollutants and predict their behavior under different conditions of pollutant discharge, climate change and eutrophication could significantly help managers and authorities as a decision support system by introducing different scenarios of land allocation by comparing the present land-uses and ecological land capabilities (Torres et al., 2016).

The aim of this research is to model the changes of water quality parameters of Karaj River using CE-QUAL-W2 model. In order to achieve the research goal, hydrodynamics of the system and river quality parameters were calibrated and then verified.

Materials and methods

- Case study area

The study area of this research is upstream of the Karaj River, which has an area of 146 square kilometers and is located between the eastern geographic latitudes of 51° 3' to 51° 36' and northern geographic latitudes of 35° 53' to 36° 11' (Figure 1).

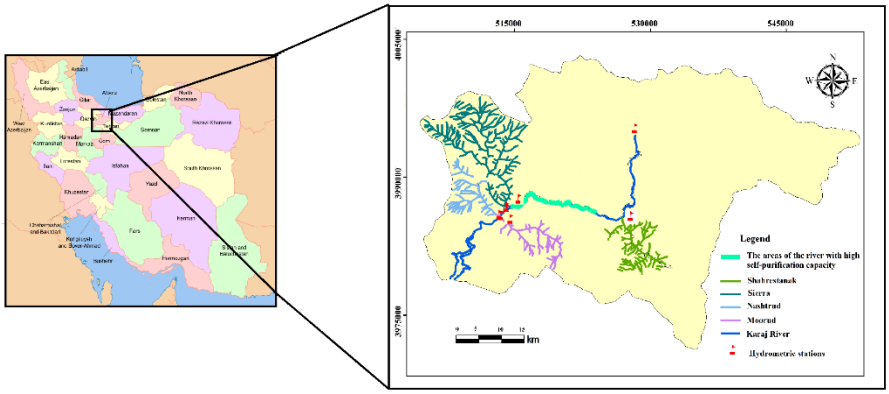


Figure (1): Geographical Location of Amir Kabir Dam basin in Alborz Province in Iran

- Methodology

This research employs the CE-QUAL-W2 model and available field data to establish, calibrate, and validate a eutrophication model for the Karaj River.

This research is done in three different phases:

Phase 1: Data collecting and model development

In this study, the model-required data are divided into quantitative and qualitative components.

- Quantitative data: these data are divided into two parts: hydrology and meteorology. The hydrological data includes flow rate, velocity and level of the water level, which were obtained from the hydrometric stations of Nishtrod, Shahristan, Sira, Gachsar, Morud and Pol Khab (Regional Water Company of Alborz Province, 2015) and the required meteorological data from the General Directorate of Meteorology.
- Qualitative data: Two series of data including the initial conditions of the model (information about the level of water, temperature, and water quality on the first day of simulation) and the boundary conditions of the model (flow rate of inlet streams, the concentration of water quality parameters including ammonium, phosphate, nitrate, algae, dissolved oxygen and Biochemical oxygen demand streams and inlet water temperature).

Phase 2: Model calibration

The model was calibrated in two steps: calibration of river flow speed and concentration of water quality parameters including ammonium, phosphate, nitrate, algae, dissolved oxygen, and Biochemical oxygen demand.

Phase 3: Model verification

To validate the model, data from May to August 2014 were used to calibrate the model and determine the appropriate coefficient values affecting the flow rate and concentration of water quality parameters upstream of the Karaj River. Notably, the results of the model in segment 36, which is one of the river's end segments, were compared with the quality data of Pul Khab station (the closest station to segment 36).

Result and discussion:

In order to achieve the research goal, hydrodynamics of the system (water velocity) and river quality parameters including nitrate, phosphate, algae, ammonium, dissolved oxygen, biological oxygen demand were calibrated and then verified. The results show a suitable matching with observed data. Moreover comparing the results of simulated concentration of DO and BOD with the standard level of these parameters for surface water is an evident for the health of the river. Considering the accurate predictions of the model, it can be concluded that utilizing of appropriate mathematical models with spending less time and cost compared to field monitoring and laboratory observations for qualitative simulation and representing management scenarios would be a very useful tool in water resource management and would help the planners and managers as a decision support tool to achieve the goals of sustainable development.

پژوهش‌های محیط‌زیست، سال ۱۳، شماره ۲۵، بهار و تابستان ۱۴۰۱، از صفحه ۳ تا ۱۸

مدل‌سازی تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه کرج با استفاده از مدل CE-QUAL-W2

سحر سعیدی[۱]، سید حامد میرکریمی*[۲]، مطهره سعادت پور[۳]

۱ دانشجوی دکتری علوم محیط زیست گرایش منابع آب، دانشگاه میت مجارستان
۲ دانشیار گروه محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ایران
۳ استادیار گروه عمران آب، دانشگاه علم و صنعت ایران، ایران

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۲۰

چکیده

امروزه با توجه به گسترش جوامع و به تبع آن افزایش استفاده از منابع آبی، دخل و تصرف غیرطبیعی در رودخانه‌ها افزایش یافته و در نهایت منجر به تغییر شرایط کیفی آب شده است. از این رو تهیه و ارایه یک سیستم مدیریتی برای پیش‌بینی رفتار و جلوگیری از آلودگی بیش از حد محیط ضروری به نظر می‌رسد. در این مطالعه هدف مدل‌سازی تغییرات پارامترهای کیفی رودخانه کرج با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 است. در راستای دستیابی به هدف تحقیق، هیدرودینامیک سیستم (سرعت آب) و پارامترهای کیفی رودخانه (نیترات، فسفات، جلبک، آمونیوم، اکسیژن محلول، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی) کالیبره و صحت‌سنجی شدند. نتایج مدل تطابق نسبتا مناسبی با داده‌های مشاهداتی را نشان می‌دهد. علاوه بر این مقایسه نتایج شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی با استانداردهای کیفیت آب سطحی بیانگر سلامت رودخانه است. با توجه به پیش‌بینی‌های دقیق مدل می‌توان نتیجه گرفت بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی مناسب ضمن صرف وقت و هزینه کمتر در مقایسه با پایش‌های میدانی و آزمایشگاهی جهت شبیه‌سازی کیفی و پیشنهاد سناریوهای مدیریتی در مدیریت منابع آب بسیار راهگشا خواهد بود و می‌تواند به عنوان یک ابزار تصمیم یار برای برنامه‌ریزان و مدیران راهگشای دستیابی به اهداف توسعه پایدار باشد.

کلید واژه‌ها: مدل‌سازی، کیفیت آب، هیدرودینامیک، رودخانه کرج، CE-QUAL-W2

* نویسندهٔ مسئول: Email: mirkarimi@gau.ac.ir
DOI: 10.22034/eiap.2022.158571
DOR: 20.1001.1.20089597.1401.13.25.1.2

سرآغاز

کمبود آب یکی از چالش‌ها و محدودیت‌های اساسی توسعه و آبادانی کشور در سطوح ملی، منطقه‌ای و محلی، عرصه‌های حیات اجتماعی و فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌شود. علاوه برکمبود منابع آب که خود معضل اساسی جوامع در عصر حاضر است، آلودگی آب‌های قابل استحصال نیز مشکلات مربوط به آب را دو چندان کرده است (Ghasemi, 2007). مشکل آلودگی رودخانه‌ها به عنوان یکی از مهمترین منابع آب در دسترس بشر در زمینه‌های شرب، کشاورزی و صنعت، همواره به عنوان یکی از سرفصل‌های مهم تحقیقاتی و مطالعاتی به منظور شناخت و کنترل آلودگی‌ها قرار داشته است. با توجه به محدودیت منابع آب، جلوگیری از فعالیت‌های انسانی که موجب آلودگی آب می‌شود، بسیار ضروری است (Fatai, 2011). بحران آب و مسایل مربوط به آن سبب شده است مباحث مدیریت کیفی منابع آب در کنار مدیریت کمی آن، از موضوعات مهم و حیاتی برای جوامع امروزی باشند. در طی چند دهه اخیر، مدل‌های نرم‌افزاری متعددی به منظور پیش‌بینی وضعیت تغذیه‌گرایی در مخازن و مدل‌سازی شاخص‌های کیفی موجود در پیکره‌های آبی توسعه یافته است (Saadatpour & Hervey, 2015). در این راستا، تحقیقات مختلفی نیز در داخل و خارج از کشور با استفاده از این مدل‌ها به بررسی و مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها و مخازن پرداخته‌اند، به‌عنوان مثال (Torabi-Mibdi & Bodaghpour., 2013)، تغییرات کیفی رودخانه قره‌سو را با استفاده از مدل QUAL2K شبیه‌سازی نمودند، نتایج واسنجی و به خصوص صحت‌سنجی رودخانه نشان‌دهنده این مطلب بود که میزان اکسیژن محلول[۱] در پایین‌دست رودخانه قره‌سو به شدت کاهش و میزان نیتروژن و فسفر به علت ورود فاضلاب شهری و آلاینده‌های گسترده مراتع به شدت افزایش یافته است. (Hamzah & Rezaportbari, 2013)، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی رفتار کیفی مخزن سد کرج در صورت تزریق ناگهانی بار آلاینده پرداختند، نتایج تحقیقشان حاکی از این بود که محل ورود بار آلاینده تاثیر زیادی در میزان بیشینه غلظت آلودگی خروجی از سد و دوره بحران ناشی از آن دارد. (Mohammad Nejad et al., 2013)، با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن سد مهاباد پرداختند، طبق تحلیل حساسیت مدل بر پایه دما و پارامترهای کیفی، نتایج نشان‌دهنده‌ی انطباق خوب داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بود. همچنین نتایج تحقیقشان نشان دادند که شرایط خطرناکی بر مخزن سد مهاباد حاکم است. (Bostani et al., 2013)، با استفاده از نرم‌افزار QUAL2K کیفیت آب رود بشار در محدوده شهر یاسوج را بررسی کردند. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده با داده‌های واقعی نشان داد که کیفیت آب رود بشار در پایین دست پل مختار در ماه شهریور بدترین وضعیت را داشته است. (Serkan & Evine, 2009)، تغییرات اکسیژن محلول را در رودخانه هرسیت[۲] بررسی نموده و با استفاده از معادله آلاینده نقطه‌ای استریتر- فلپس[۳]، پارامترهای دما و اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی[۴] را به عنوان متغیرهای موثر در پروفیل تغییرات اکسیژن محلول تعیین کردند. (Zhang et al., 2015)، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 فرایندهای ته‌نشینی کف‌زیان و رسوبات آب را شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در تحقیقشان قابلیت مدل CE-QUAL-W2 را با SedFlux و CE-QUAL-ICM در مناطق مطالعاتی مختلف دارای شرایط محیطی و رسوب‌گذاری مختلف مقایسه کردند. نتایج تحقیقشان حاکی از برتری مدل CE-QUAL-W2 در مناطق مطالعاتی مختلف بود. (Aloui et al., 2015)، به منظور مدیریت کیفیت آب مخزن سِجنان در تونس از مدل CE-QUAL-W2 و تکنیک برداشت انتخابی استفاده نمودند. بر اساس بررسی‌های انجام شده در این مخزن، برداشت از لایه‌های بالایی مخزن در ماه‌های سرد و برداشت از لایه‌های میانی و تحتانی مخزن در ماه‌های گرم سال سبب بهبود کیفیت مخزن شده است. (Torres et al., 2016)، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی تغییرات اکسیژن در نتیجه اکسیداسیون Fe^{2+} در مخزن سانچوی اسپانیا که تحت تاثیر زهکشی اسیدی معدن قرار گرفته بود، پرداختند. نتایج نشان داد که اکسیداسیون آهن عامل اصلی کاهش اکسیژن در مخزن سد سانچو بوده است. (Afshar et al., 2017)، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 ارتقا یافته به پیش‌بینی نقل و انتقالات ترکیبات آلی فرار در سد قشلاق استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد که با کاهش دما، افزایش سرعت باد و افزایش سرعت جریان ورودی، پاکسازی مخزن از ترکیبات آلی فرار سریع‌تر اتفاق می‌افتد.

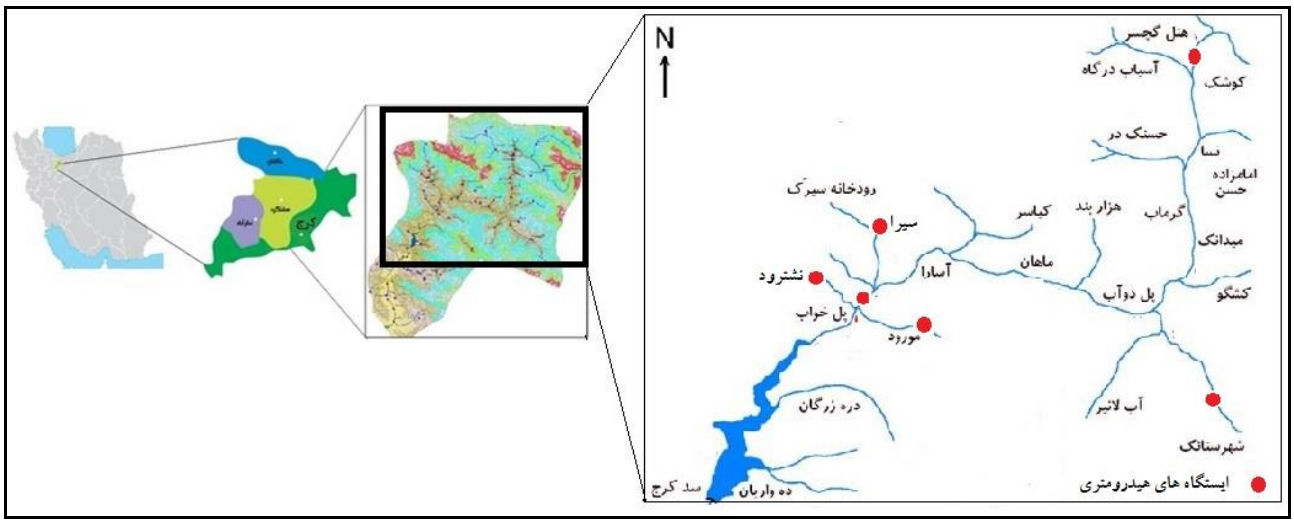
مـرور منابع فـوق نشان‌دهنده افـزایش روزافـزون علاقه‌مندی به

پژوهش در زمینه‌ی مدل‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای موثر بر کیفیت منابع آبی در مناطق مختلف است. بنابراین، در این تحقیق به منظور مدل‌سازی تغییرات زمانی- مکانی پارامترهای کیفی رودخانه کرج از مدل CE-QUAL-W2 با قابلیت ویژه در زمینه‌ی شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب در شرایط غیر دایمی و غیر یکنواخت، افزودن و یا کاستن شاخه‌های فرعی در طول جریان رودخانه و ارزیابی پاسخ‌های کیفی رودخانه به سناریوهای احتمالی استفاده شد. در ادامه در بخش مواد و روش کار چگونگی استفاده و اجرای این مدل شرح داده می‌شود.

مواد و روش کار

منطقه مورد مطالعه

رودخـانه کـرج در بخش مرکزی شمال کشور و در استان البـرز، شهرستان کرج بین طول‌های جغرافیایی ′۰۳-°۵۱ و ′۳۶-°۵۱ شرقی و عرض‌های جغرافیایی ′۵۳-°۳۵ و ′۱۱-°۳۶ شمالی قرار گرفته و تامین‌کننده بخشی از نیاز آب شرب شهرهای تهران و کرج و همچنین نیاز آبیاری ۲۱۰۰۰ هکتار از زمین‌های کشاورزی شهریار و کرج است (Mohammad-Ali, 2017). این رودخانه در مسیر خود دارای شاخه‌های متعددی است که از شاخه‌های اصلی آن می‌توان به ولایت‌رود، شهرستانک، نشتارود، مورود و سیرا اشاره کرد. در این پژوهش بالادست رودخانه کرج جهت شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در سطح کشور و استان البرز را نمایش می‌دهد.



شکل(۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز سد امیرکبیر در استان البرز و ایران

روش کار

روش انجام کار و اجرای مدل در پنج مرحله به شـرح زیـر ارایـه می‌شود:

- **جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز**

در این پژوهش داده‌های مورد نیاز مدل به دو بخش کمی و کیفی تقسیم می‌شوند.

- داده‌های کمی: این داده‌ها به دو بخش هیدرولوژی و هواشناسی تفکیک می‌شوند. داده‌های هیدرولوژی شامل دبی، سرعت و تراز سطح آب است که از ایستگاه‌های هیدرومتری گچسر، شهرستانک، سیرا، نشترود، مورود و پل خواب تهیه شد و داده‌های هواشناسی مورد نیاز نیز از اداره کل هواشناسی استان البرز تهیه شدند.
- داده‌های کیفی: به طور کلی جهت بررسی عکس‌العمل رودخانه در برابر ورود آلاینده‌های تصادفی و عموما برای هرگونه مدل‌سازی کیفی، دو سری داده شامل شرایط اولیه مدل (اطلاعات مربوط به تراز سطح آب، دما و کیفیت پیکره آبی در اولین روز شبیه‌سازی در قطعه‌های محاسباتی مدل) و شرایط مرزی مدل (دبی جریان‌های ورودی، غلظت پارامترهای کیفی آمونیوم، فسفات، نیترات، جلبک، اکسیژن محلول و

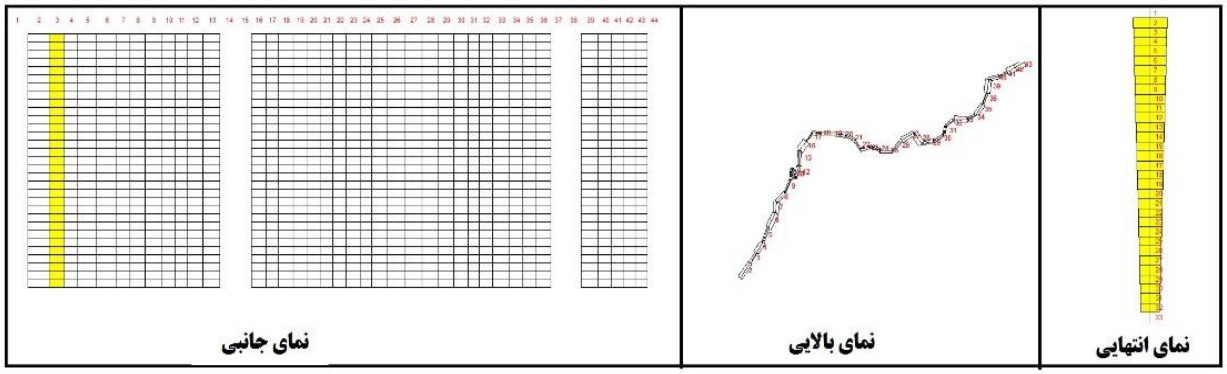
اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی جریان‌های ورودی و دمای آب ورودی) مورد نیاز است که این اطلاعات از اداره کل حفاظت محیط‌زیست استان البرز، شرکت آب منطقه‌ای استان البرز و تهران، اداره آب و فاضلاب استان تهران تهیه شدند.

- مدت زمان شبیه‌سازی: دوره مدل‌سازی، از ۱۰مرداد سال ۱۳۹۳ (سی و یکم ژوئیه ۲۰۱۴) تا ۱۳ اسفند سال ۱۳۹۳ (چهارم مارس ۲۰۱۵) به مدت ۲۱۲ روز در نظر گرفته شد و از داده‌های ۲۸ اردیبهشت ۱۳۹۴ (هجدهم می ۲۰۱۵) تا ۵ مرداد سال ۱۳۹۴ (بیست و هفتم جولای ۲۰۱۵) به منظور تایید شبیه‌سازی استفاده شد.

- **تهیه فایل‌های ورودی مدل**

اطلاعات ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت رودخانه کرج عبارتند از: هندسه پیکره آبی، داده‌های هواشناسی (درجه حرارت هوا، نقطه شبنم، سرعت و جهت باد و پوشش ابر)، اطلاعات مربوط به شرایط مرزی و شرایط اولیه مدل، اطلاعات جانبی (ضرایب پوشش گیاهی منطقه و ضرایب اصلاح باد برای مقاطع مختلف طولی رودخانه) در مدت زمان شبیه‌سازی.

فایل هندسه سیستم، اولین فایل ورودی به مدل است که در آن ژئومتری سیستم برای مدل تعریف می‌شود. برای تعریف ژئومتری سیستم ابتدا باید تعداد پیکره‌های آبی (رودخانه، مخزن و خور) و شاخه‌های آبی تعیین شود. شکستن سیستم به شاخه‌های متعدد بستگی به نفوذ یا تغذیه آب‌های زیرزمینی، تغییرات شیب کف در مسیر رودخانه، شکل‌گیری رودخانه از اتصال شاخه‌های غیر هم امتداد، دارد. در این تحقیق، سیستم مورد مطالعه به یک پیکره آبی (با ماهیت رودخانه‌ای) با سه شاخه تعریف شد، طول رودخانه به ۴۴ قطعه هر یک به طول حدود ۸۰۰ متر و بعد قائم آن به ۳۳ لایه هر یک به عمق ۱ متر تقسیم شدند. طول قطعات به دقت مکانی موردنظر مدیران و تصمیم‌گیرندگان، تغییرات طولی هیدرودینامیکی و کیفی در مسیر رودخانه (متاثر از عوامل انتقال و واکنش آلاینده‌ها) بستگی دارد. جهت اعمال دقت مکانی بالاتر، تغییرات در بازه‌های طولی کمتر سنجیده می‌شوند. علاوه بر این هر چه تغییرات طولی کیفیت و یا سرعت در رودخانه شدیدتر باشد، نیاز به قطعه‌بندی کوچکتر و تعداد قطعات بیشتر است. شکل (۲) پلان شبیه‌سازی شده بالادست رودخانه کرج را نشان می‌دهد.



شکل (۲): پلان شبیه‌سازی شده بالادست رودخانه کرج

- **رفع خطاها و اجرای مدل**

پس از وارد کردن فایل‌های ورودی و رفع خطاها، مدل اجرا شد و در مرحله بعد بر اساس نتایج آن، کالیبراسیون مدل صورت گرفت.

- **کالیبراسیون**

مرحله کالیبراسیون جهت مطابقت هر چه کامل‌تر مدل با شرایط حاضر رودخانه صورت می‌گیرد، در این رابطه ابتدا داده‌های موجود و قطعی به مدل وارد شدند و سپس با تغییر در ضرایب مختلف در دامنه تعریف شده برای هر پارامتر، مقادیر خروجی مطابق با وضعیت موجود از مدل دریافت شد.

کالیبراسیون مدل در دو گام کالیبراسیون سرعت جریان رودخانه و غلظت پارامترهای کیفی آمونیوم، فسفات، نیترات، جلبک، اکسیژن محلول و اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی انجام شد. کالیبراسیون سرعت جریان با استفاده از تطبیق سرعت جریان

حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های واقعی رودخانه کرج صورت پذیرفت. در کالیبراسیون سرعت ابتدا با آنالیز حساسیت روی پارامترهای درگیر در مدل‌سازی سرعت رودخانه (معادله محاسبه ضریب زبری کف (شزی یا مانینگ) و مقدار آن در قطعه‌های طولی رودخانه)، مهم‌ترین پارامتر مشخص شد، سپس با تغییر در آن به یکسان‌سازی نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات پرداخته شد. جهت کالیبراسیون غلظت پارامترهای کیفی، آنالیز حساسیت روی پارامترهای درگیر در مدل‌سازی کیفیت رودخانه (ضریب نیتریفیکاسیون، ضریب رشد جلبکی، ضریب مرگ و میر جلبکی، ضریب زوال و ته‌نشینی اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی، معادله هواگیری اکسیژن، نیاز اکسیژن خواهی رسوبات کف) صورت گرفت و مهم‌ترین پارامترها مشخص شدند، سپس با تغییر در آن‌ها به یکسان‌سازی نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات پرداخته شد. رویکرد اصلی در کالیبراسیون کیفیت آب، به گونه‌ای بود که در بیشتر موارد سعی شد که از مقادیر پارامترهای موجود در پیش‌فرض مدل یا مقادیر نزدیک به آن‌ها استفاده شود. در صورتی که در طول فرایند کالیبراسیون ترکیب خاصی از مقادیر پارامترهای مدل پاسخ‌های منطقی ارایه نمی‌کردند، از مقادیر پارامترهای موجود در کارهای انجام شده قبلی یا مقادیر نزدیک به آن‌ها استفاده شد.

- **صحت‌سنجی مدل**

با انجام کالیبراسیون مدل و تعیین مقادیر مناسب برای ضرایب موثر بر سرعت جریان و غلظت پارامترهای کیفی بالادست رودخانه کرج به منظور تایید مدل، از داده‌های مربوط به اردیبهشت تا مرداد سال ۱۳۹۴ استفاده شد. لازم به ذکر است که نتایج مدل در قطعه ۳۶ که جز قطعه‌های انتهایی رودخانه است با داده‌های کیفیت ایستگاه پل خواب (نزدیک‌ترین ایستگاه به قطعه ۳۶) مقایسه شدند.

در مدل‌های شبیه‌سازی برای مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی از پارامترهای آماری مختلفی استفاده می‌شود که خطای میانگین مطلق (AME) و درصد خطای نسبی (RE) از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل به شمار می‌روند. AME، مقدار متوسط خطاها را در مجموعه پیش‌بینی‌ها بدون در نظر گرفتن جهت آن‌ها اندازه‌گیری می‌کند و از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |ei|}{n}$$

رابطه (۱)

RE برای بیان تفاوت ما بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده در مدل به کار می‌رود و معیار مناسبی برای درک کارایی مدل است که مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$RE = \frac{|O_i - P_i|}{O_i} \times 100$$

رابطه (۲)

در معادلات بالا، Oi مقدار مشاهده شده، Pi مقدار پیش‌بینی شده و n تعداد مشاهدات است. هر چه مقادیر AME و RE حاصل از این مقایسه در طول دوره شبیه‌سازی به صفر نزدیک‌تر باشد، دقت شبیه‌سازی بالاتر است.

نتایج

در این بخش نتایج مربوط به مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل ارایه می‌شوند. نتایج مربوط به کالیبراسیون مدل در دو بخش سرعت جریان آب و غلظت پارامترهای کیفی در ادامه به صورت مجزا ارایه شده است.

- **کالیبراسیون سرعت جریان رودخانه**

پارامتر موثر در کالیبراسیون سرعت، انتخاب معادله شزی/مانینگ و ضریب متناظر با آن در مدل است. نتایج مربوط به کالیبراسیون سرعت جریان در مقطع انتهای رودخانه، قطعه ۳۶ در شکل (۳) و میانگین خطای محاسبه شده در جدول (۱) ارایه شده است. در شکل (۳)، داده‌های مربوط به روز ۲۱۳ میلادی (مصادف با ۱۰ مرداد سال ۱۳۹۳؛ ۲۱۳ روز پس از ۱ ژانویه) تا ۴۲۵ (مصادف با ۱۳ اسفند سال ۱۳۹۳) به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی هیدرودینامیک مدل و داده‌های واقعی ارایه گردیده‌اند.

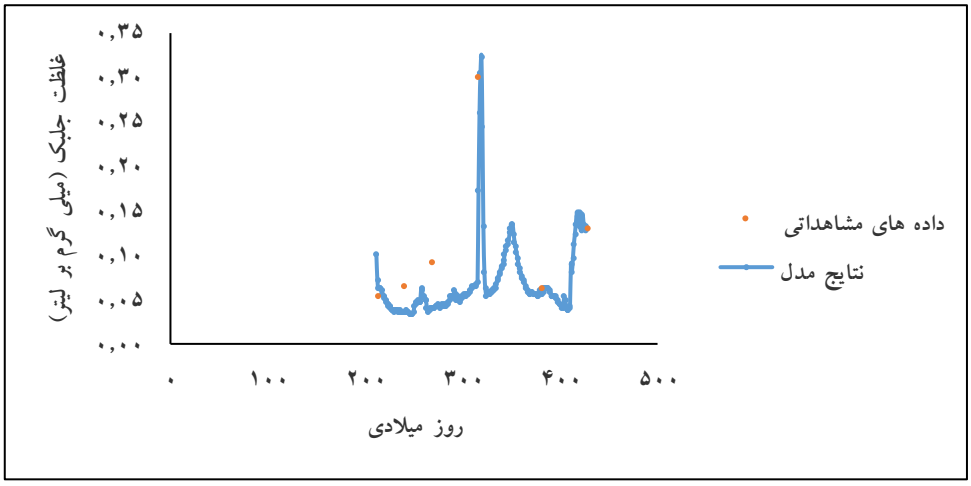
کالیبراسیون غلظت پارامترهای کیفی

- جلبک

رشد جلبک تابعی از نور، مواد مغذی و دما است. همچنین مواد مغذی اصلی محدودکننده رشد جلبک، فسفر و نیتروژن هستند. به همین دلیل مهم‌ترین پارامترهای مورد استفاده در کالیبراسیون جلبک عبارتند از: نرخ رشد جلبک، شدت نور بهینه در حداکثر

شکل (۳): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی سرعت جریان رودخانه در قطعه ۳۶

نرخ فتوسنتز، نسبت فسفر در جلبک و نسبت نیتروژن در جلبک. شکل (۴) روند تغییرات غلظت جلبک مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد. مقادیر خطای شبیه‌سازی جلبک نیز در جدول (۱) نشان داده شده است.



شکل (۴): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت جلبک در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون

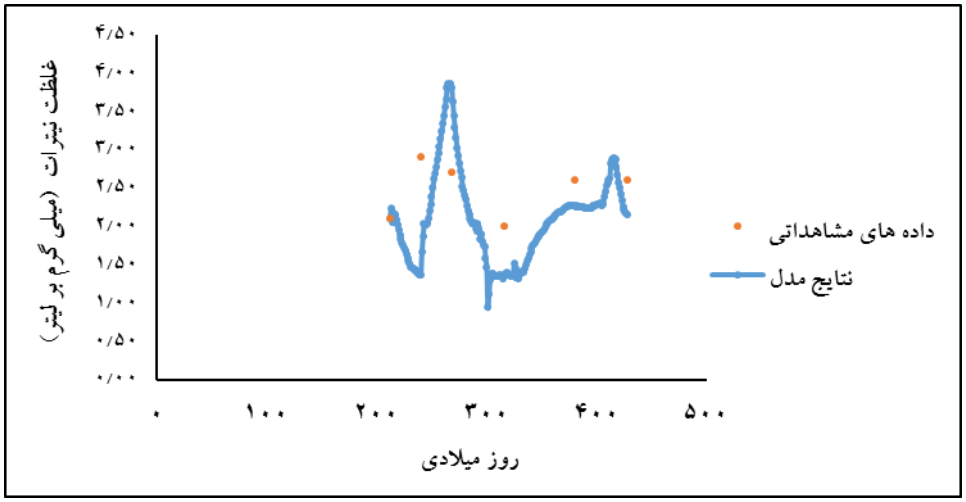
- نیترات

نیترات به عنوان منبع غذایی برای فیتوپلانکتون به حساب می‌آید. به منظور پیش‌بینی مقدار نیترات و آمونیاک مصرفی توسط فیتوپلانکتون از معادله فاکتور ترجیح آمونیاک استفاده شده است. نرخ نیتریفیکاسیون آمونیاک $0/07\ day^{-1}$ در نظر گرفته شد. شکل (۵) روند تغییرات غلظت نیترات مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد. مقادیر خطای شبیه‌سازی نیترات نیز در جدول (۱) ارایه شده است.

همان‌گونه که شکل (۵) نشان می‌دهد در طول فصول گرم سال، به دلیل گسترده بودن فعالیت‌های کشاورزی و مصرف کودهای نیتراتی، غلظت نیترات ورودی به سیستم نسبت به ماه‌های سرد سال بیشتر است، با این وجود نیز پایین تر از حداکثر غلظت مجاز بر اساس کیفیت عمومی آب‌های سطحی (۴۵ میلی‌گرم در لیتر) است.

- آمونیوم

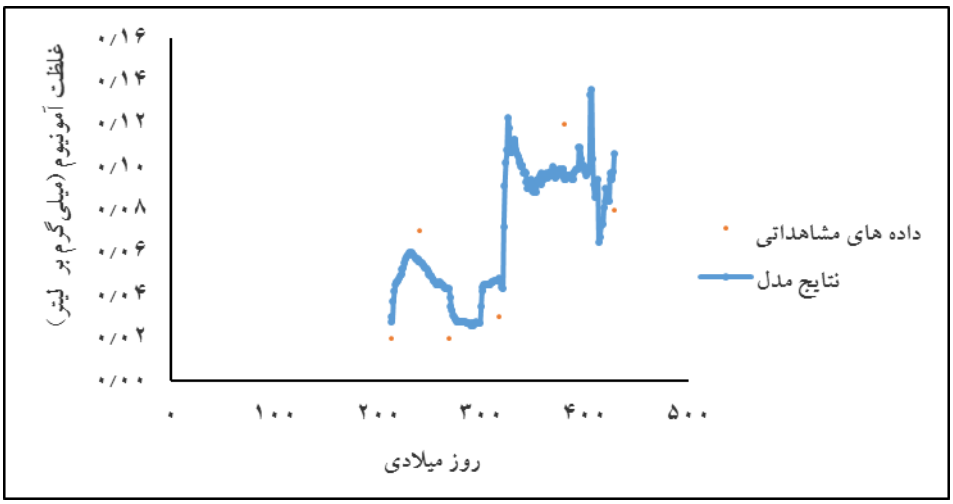
جلبک‌ها از آمونیوم طی فرایند فتوسنتز برای تولید پروتئین استفاده می‌کنند. در مواردی نیتروژن به عنوان یک عامل محدودکننده در رشد جلبک‌ها محسوب می‌گردد. البته برخی گونه‌های جلبکی قادر به استفاده از نیتروژن اتمسفری برای ایجاد تطابق با شرایط محیطی و ادامه فرایند رشد هستند. گونه‌های



شکل (۵): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت نیترات در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون

جلبکی به نسبت فاکتور ترجیح آمونیوم که بر اساس غلظت آمونیوم و نیترات و ضریب نیمه اشباع ترجیح آمونیوم در سیستم حاصل می‌گردد، از پارامترهای کیفی آمونیوم و نیترات برای جریان رشد و نمو استفاده می‌کنند.

شکل (۶) روند تغییرات غلظت آمونیوم مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد. غلظت آمونیوم برخلاف نیترات با کاهش دما و کند شدن و توقف رشد جلبک‌ها افزایش می‌یابد، همان‌طور که در شکل (۶) نیز مشهود است در فصل سرد سال (روز ۳۵۰ تا ۴۳۰) مقدار آمونیوم افزایش یافته است. میزان آمونیوم شبیه‌سازی شده در اکثر طول مدت شبیه‌سازی بالاتر از حداکثر مجاز تعیین شده در معیارهای عمومی کیفیت آب (۰/۰۲میلی‌گرم در لیتر) است که این مساله می‌تواند به دلیل فعالیت‌های انسانی، فضولات حیوانی و تخلیه فاضلاب به آب رودخانه توسط جمعیت‌های ساکن حاشیه‌ای باشد. لازم به ذکر است که در بیشتر دفعات نمونه‌برداری نیز، غلطت آمونیوم بالاتر از حد استاندارد بوده است. مقادیر خطای شبیه‌سازی آمونیوم در جدول (۱) ارایه شده است.

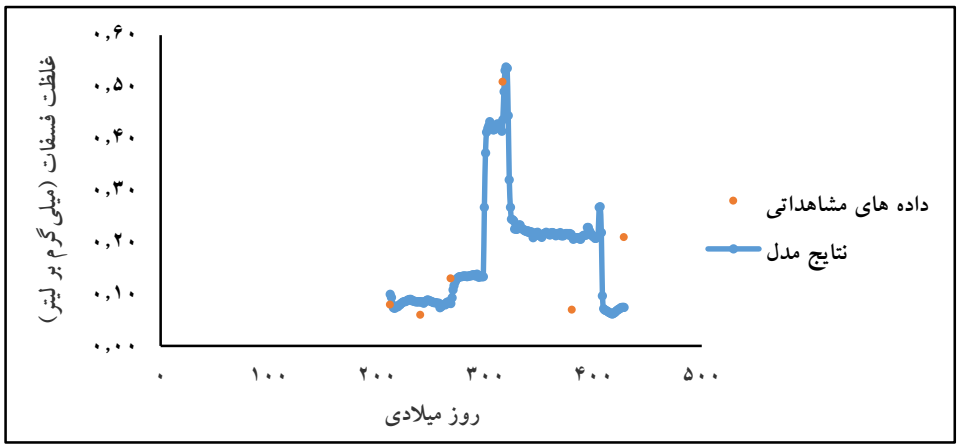


شکل (۶): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت آمونیوم در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون

- **فسفات**

نوسان‌های روزانه و پیش‌بینی‌های مدل معلول رشد فیتوپلانکتون است. داده‌های جمع‌آوری شده در رودخانه حاکی از کاهش فسفات در فصل سرد سال است. مدل نیز می‌تواند با تولید فیتوپلانکتون کاهش فسفات را جبران نماید. ضریب نیم اشباع فسفر ۰/۰۰۳ میلی‌گرم در لیتر کالیبره شده و تعادل

استویکیومتری مابین توده حیاتی و فسفر نیز ۰/۰۰۵ تنظیم شده است. شکل (۷) روند تغییرات غلظت فسفات مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد که در تمام طول دوره شبیه‌سازی و نمونه‌برداری پایین‌تر از حداکثر غلظت مجاز معیارهای عمومی کیفیت آب‌های سطحی (۰/۷میلی‌گرم در لیتر) است. مقادیر خطای شبیه‌سازی فسفات در جدول (۱) ارایه شده است.



شکل(۷): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت فسفات در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون

نتایج داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی سیستم، بیانگر افزایش غلظت فسفات با کاهش دما در فصول سرد سال است. این افزایش غلظت، ناشی از کند شدن یا توقف رشد جلبک در رودخانه و کاهش مصرف مواد مغذی مانند فسفر توسط جلبک‌ها است.

- **اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی**

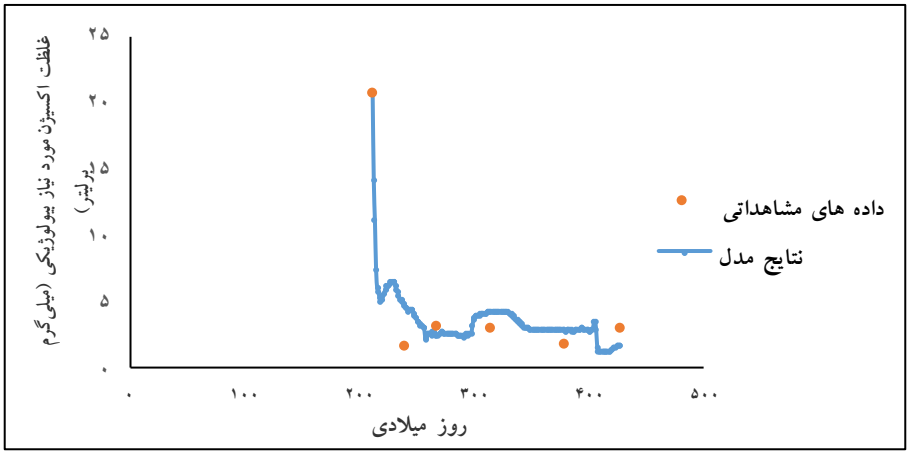
BOD را می‌توان به عنوان میزان اکسیژن مورد نیاز برای تثبیت مواد آلی تجزیه و فاسد شدنی توسط باکتری‌ها در شرایط آبی تعریف کرد. دما همواره نقش بسیار مهمی در کنترل فرایندهای کیفیت آب بازی کرده و فعالیت‌های بیوشیمیایی جانداران آبزی را کنترل می‌کند، به همین دلیل یکی از مهم‌ترین پارامترهای موثر در مدل‌سازی BOD نیز درجه حرارت است. جهت کالیبراسیون BOD ضریب تبدیل دمایی برای اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی ۱/۰۱۴۷ و نرخ کاهش اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی (KBOD) ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد. شکل (۸) روند تغییرات غلظت BOD مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد. مقادیر خطای شبیه‌سازی BOD نیز در جدول (۱) ارایه شده است.

همان‌گونه که شکل (۸) نشان می‌دهد در طول فصل گرم سال، میزان اکسیژن مصرفی در نتیجه واکنش‌های بیوشیمیایی، بالا است و با کاهش دما توانایی میکروارگانیسم‌ها برای اکسید کردن مواد آلی فاضلاب‌ها در ماه‌های سرد سال (روز ۳۱۶ تا ۳۸۰) کاهش یافته است. علاوه بر این با توجه به این که حداکثر میزان مجاز BOD بر اساس معیارهای عمومی کیفیت آب‌های سطحی ۵ میلی‌گرم بر لیتر است، تنها در برخی از روزها به بالاتر از حدمجاز خود تجاوز کرده است که می‌تواند در نتیجه تخلیه فاضلاب‌های کاربری‌های مجاور به رودخانه باشد.

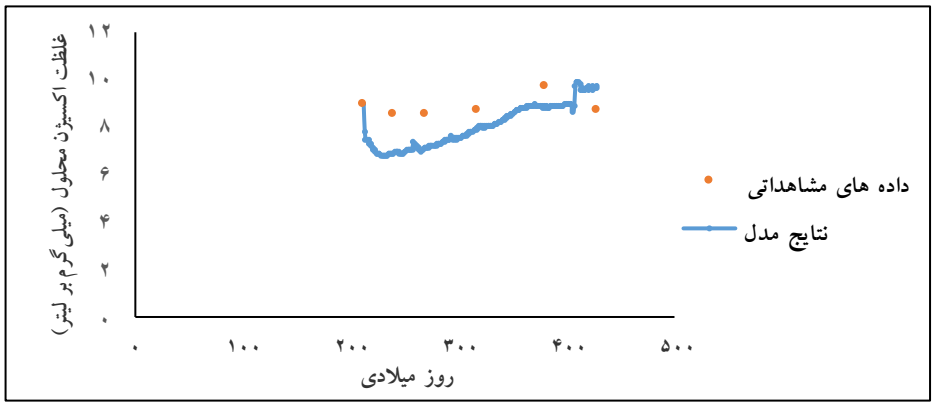
- **اکسیژن محلول**

از میان تمام شاخص‌های موجود در توصیف کیفیت آب، غلظت DO، شاخص جهانی و پذیرفته شده‌ای برای سلامت آب‌های جاری مانند رودخانه‌ها و دهانه رودها است. نسخه ۳/۷ مدل CE-QUAL-W2 به کاربر اجازه می‌دهد تا از معادلات بازدمش ویژه استفاده کند؛ که در این تحقیق از معادله شماره ۶ بازدمش استفاده شده است.

شکل (۹) روند تغییرات غلظت اکسیژن محلول مشاهداتی و پیش‌بینی شده توسط مدل را در قطعه ۳۶ نشان می‌دهد. مقادیر خطای شبیه‌سازی DO در جدول (۱) ارایه شده است. همان‌طور که شکل (۹) نشان می‌دهد نوسانات غلظت اکسیژن محلول بین ۶/۸ تا ۹ میلی‌گرم در لیتر است و با توجه به این که حداقل میزان مجاز DO طبق معیارهای عمومی کیفیت آب‌های سطحی ۵ میلی‌گرم بر لیتر است، نتایج نشان می‌دهد غلظت DO در تمام



شکل (۸): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت BOD در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون



شکل (۹): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت DO در قطعه ۳۶ در دوره کالیبراسیون

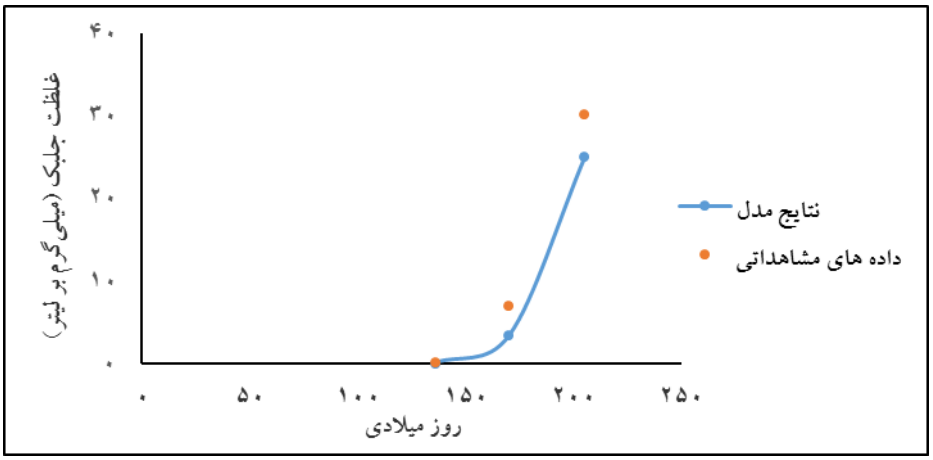
طول مدت شبیه‌سازی بالاتر از حداقل میزان مجاز است که حاکی از وجود اکسیژن به میزان مناسب برای فعالیت‌های زیستی و اکسیداسیون طبیعی یا خودپالایی بالای رودخانه است. نتایج به خوبی نشان‌دهنده انطباق قابل قبول بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است.

جدول (۱): خطاهای کالیبراسیون سرعت جریان آب و پارامترهای کیفی در مقایسه با داده‌های مشاهداتی

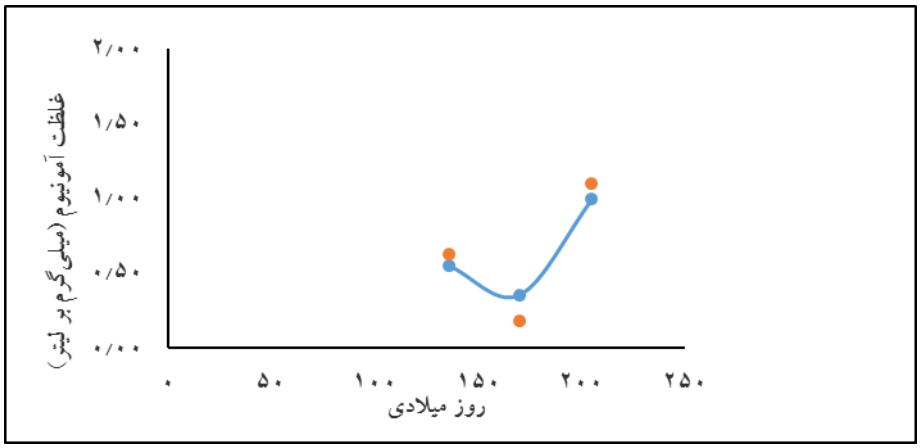
پارامتر	خطاهای مربوط به سرعت جریان آب		تعداد داده‌های مورد مقایسه	سال
	RE	AME		
سرعت جریان آب	۰/۰۵	۰/۰۰۰۷	۱۵۵	۱۳۹۳
جلبک	۰/۲۳	۰/۰۶۱	۶	۱۳۹۳
نیترات	۰/۱۲	۰/۶۷	۶	۱۳۹۳
آمونیوم	۰/۳۵	۰/۰۱۹	۶	۱۳۹۳
فسفات	۰/۲۵	۰/۰۷	۶	۱۳۹۳
BOD	۰/۶۴	۲/۲۱	۶	۱۳۹۳
DO	۰/۰۷	۰/۹۷	۶	۱۳۹۳

صحت‌سنجی مدل

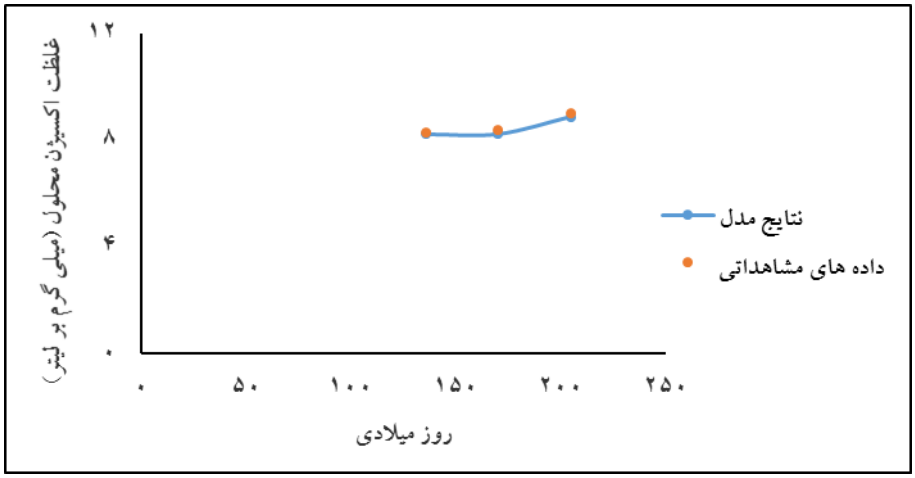
شکل‌های (۱۰ تا ۱۲) نتایج شبیه‌سازی جلبک، آمونیوم و اکسیژن محلول طی دوران صحت‌سنجی مدل در نقطه پایش (ایستگاه پل‌خواب) را نشان می‌دهند.



شکل (۱۰): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت جلبک در قطعه ۳۶ در دوره صحت‌سنجی



شکل (۱۱): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت آمونیوم در قطعه ۳۶ در دوره صحت‌سنجی



شکل (۱۲): مقایسه داده‌های واقعی و نتایج شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول در قطعه ۳۶ در دوره صحت‌سنجی

اگر چه نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی دارای انطباق مطلق نسبت به یکدیگر نیستند، اما روند نتایج مدل‌سازی در دوره‌های زمانی مختلف، تقریبا روندی منطقی را نشان می‌دهد که بیانگر انتخاب درست ضرایب موثر در کالیبراسیون است. عدم انطباق نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی می‌تواند ناشی از خطا در ساختار مدل از جمله فرایندها و ارتباط ریاضی بین فرایندها و واکنش‌های سیستم و یا خطای مدل‌سازی از جمله انتخاب ضرایب واکنش، وارد نمودن داده‌ها و یا ناشی از خطای اندازه‌گیری متغیرهای ورودی سیستم یعنی دبی، دما، غلظت و داده‌های پایش سیستم باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

با توجه به جدا شدن استان البرز از تهران، طی سال‌های اخیر این استان با افزایش جمعیت و توسعه روزافزون صنعت و به تبع آن تخلیه بیشتر پساب‌های شهری، صنعتی و کشاورزی به منابع آب و در نتیجه کاهش سطح آب ذخیره سد کرج و همچنین افزایش آلودگی آب رودخانه کرج روبه‌رو شده است. با توجه به این که بررسی کیفیت آب رودخانه‌ها با استفاده از پایش‌های میدانی و آزمایشگاهی مستلزم صرف وقت و هزینه بالایی است، نتایج تحقیق حاضر نشان داد استفاده از مدل‌های عددی در مدیریت منابع آب می‌تواند بسیار راهگشا باشد. کاربرد استفاده از چنین مدل‌هایی در مطالعات (Rostam Afshar et al., 2009; Ghanbari & Fatai, 2013; Hamzah & Rezaportbari, 2013; Serkan & Evine, 2009; Gotovtsev, 2010) نیز تایید شده است. در این مطالعه هیدرودینامیک سیستم (سرعت آب) و کیفیت بالادست رودخانه کرج (پارامترهای کیفی شامل نیترات، فسفات، جلبک، آمونیوم، اکسیژن محلول، اکسیژن مورد نیاز بیولوژیکی) با استفاده از داده‌های مرداد تا اسفند سال ۱۳۹۳ کالیبره و با استفاده از داده‌های اردیبهشت تا مرداد سال ۱۳۹۴ صحت‌سنجی شدند. نتایج مدل تطابق نسبتا مناسبی با داده‌های مشاهداتی نشان داد به عنوان مثال با توجه به این که رشد جلبک تابعی از نور، مواد مغذی و دما است و مواد مغذی اصلی محدودکننده رشد جلبک، فسفر و نیتروژن هستند، انتظار می‌رود با توجه به کاهش دما در فصول سرد (روز ۳۵۰ تا ۴۳۰) رشد جلبک کاهش و سپس با افزایش دما، افزایش یابد که نتایج مدل نیز موید همین موضوع است. همچنین با توجه به این که یکی از عوامل موثر در غلظت فسفات رشد و مرگ و میر جلبک‌ها است، انتظار می‌رود با افزایش رشد جلبک، غلظت فسفات کاهش و با مرگ و میر آن غلظت فسفات افزایش یابد که نتایج تحقیق حاضر به خوبی این مساله را تایید می‌کند. علاوه بر این با توجه به وجود زمین‌های کشاورزی در اطراف رودخانه و به تبع آن مصرف کودهای نیتراتی در طول فصول گرم سال، انتظار می‌رود غلظت نیترات در این ماه‌ها افزایش پیدا کند که مدل به خوبی این تغییرات را پیش‌بینی کرده است. علاوه بر این در طبیعت در صورت عدم دخالت عوامل انسانی انتظار می‌رود غلظت آمونیوم برخلاف نیترات با کاهش دما و کند شدن و توقف رشد جلبک‌ها افزایش یابد، نتایج مدل در روزهای ۳۵۰ تا ۴۳۰ که مربوط به فصل سرد سال (روز ۳۵۰ تا ۴۳۰) است این افزایش مقدار آمونیوم را تایید می‌کند.

با توجه به پیش‌بینی‌های دقیق و قابل انتظار مدل مورد استفاده در این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت به کارگیری سیستم پایش و ارزیابی مستمر کیفی و همچنین بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی مناسب جهت شبیه‌سازی کیفی و پیشنهاد سناریوهای مدیریتی مناسب می‌تواند ضامن بهبود کیفیت محیط و هم‌چنین راهگشای توسعه پایدار باشد. علاوه بر این، این مدل‌ها با قابلیت شبیه‌سازی آثار بارگذاری‌های موجود و آتی و همچنین امکان شناسایی مناطق بحرانی رودخانه به عنوان یک ابزار تصمیم‌یار جهت کاهش آلودگی آب برای مدیران و مسئولین کاربرد فراوان دارند.

تشکر و قدردانی

با تشکر از دفتر پژوهش‌های کاربردی شرکت سهامی اداره منابع آب ایران که آمار و اطلاعات به کار رفته در این پژوهش را فراهم کرد و همچنین این پژوهش با حمایت مالی این شرکت شکل گرفت.

یادداشت‌ها

1. DO
2. Harsit
3. Streeter–Phelps
4. BOD

فهرست منابع

Afshar, A.; Feizi, F.; Moghadam, A. Y. & Saadatpour, M. 2017. Enhanced CE-QUAL-W2 model to predict

the fate and transport of volatile organic compounds in water body: Gheshlagh reservoir as case study. Environmental Earth Sciences, 76(23), 803.

Aloui, B. Z.; Adelana, S. M.; Gueddari, M. 2015 Effects of selective withdrawal on hydrodynamics and water quality of a thermally stratified reservoir in the southern side of the Mediterranean sea: a simulation approach. Environmental Monitoring and Assessment doi:10.1007/s10661-015-4509-3

Bostani, F. & Goharghani, A. 2013. Simulation of Bashar River water quality in Yasouj city using QUAL2K simulator. Journal of Water Resources Engineering, 7(1): 85-98. (in persian)

Enrique, S.; Colmenarejo, M. F.; Vicente, J.; Rubio, A.; García, M. G.; Travieso, L. & Borja, R. 2007. Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. Ecological Indicators, 7(2): 315-328.

Fatai, A. 2018. Investigating the values of quality parameters of water supply canals in Pars Abad city. Environmental Science Quarterly, 73: 50-81. (in persian)

Ghanbari, A. & Fatai, A. 2013. Qualitative modeling of the changes in dissolved oxygen and biochemical oxygen demand using the QUAL2K model, a case study of Zarraj Abad river. The first national conference on environmental pollution with a focus on clean earth, Hayat Pak People's Association, Ardabil. (in persian)

Ghasemi, A. 2014. Organization of the Karaj Dam catchment basin in order to prevent water pollution in the basin. Master's thesis. Faculty of Environment, University of Tehran, 261 pages. (in persian)

Gotovtsev, A.V. 2010. Modification of the streeter–phelps with the aim to account for the feedback between dissolved oxygen concentration and organic matter oxidation rate. Water Resource, 37(2): 245–251.

Hamzah, M. & Rezaportbari, M. 2013. Qualitative Behavior Identification Of Surface Reservoir In Case Of Sudden Injection Of Contaminant Load. Iranian Water Resources Research Journal, 10(1): 39-50. (in persian)

Mohammad Nejad, B.; Parkhami, N. & Bahmanesh, J. 2013. Eutrophication Simulation of Mahabad Dam Reservoir by Using CEQUAL- W2 Two Dimensional Model. Journal of Civil Engineering and Environment. 44(4):77-88. (in persian)

Mohammad-Ali, M. 2017. Modeling the changes of DO, BOD and algae along the Karaj River. Master's thesis. Faculty of Environment, Islamic Azad University, Science and Research Unit. 120 pages. (in persian)

Rostam Afshar, N.; Afshar, A. & Jalili, N. 2009. Behavioral forecasting of the river system response model regarding the random load of input pollutant, a case study of the Karkheh river. The first regional conference on the optimal use of water resources in the Karun and Zayandeh River basins, Shahrekord University, 14-15 Shahrivar, Shahrekord. (in persian)

Saadatpour, M. & Hervey, A. 2015. Study Of Environmental Performance Criteria In Karkheh Reservoir Using Enhanced Model Of Ce-Qual-W2 (V3.72). Iran Water Resources Research Journal. 12 (3): 50-64. (in persian)

Serkon, N. & Evine, N. 2009. Water quality modeling and dissolved oxygen balance in streams: a point source streeter-phelps application in the Harsit stream. Clean- Soil Air Water, 37(1): 67- 74.

Torabi-Mibdi, A. & Bodaghpour, S. 2013. Simulating the process of quality changes of Qarasu river using QUAL2K model. The first national conference on water flow and pollution, Tehran, University of Tehran. (in persian)

Torres, E.; Galván, L.; Cánovas, C.; Soria-Píriz, S.; Arbat-Bofill, M.; Nardi, A.; Papaspyrou, S. & Ayora, C. 2016. Oxycline formation induced by Fe(II) oxidation in a water reservoir affected by acid mine drainage modeled using a 2D hydrodynamic and water quality model — CE-QUAL-W2. Science of the Total Environment, 562: 1-12.

Zhang. Zh..; Sun. B. & .Johnson, B. 2015. Integration of a benthic sediment diagenesis module into the two dimensional hydrodynamic and water quality model – CE-QUAL-W2, Ecological Modelling, 297:213-231.