

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و یکم، شماره هفت، مهر ماه ۹۸

مدل سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2Kw

(مطالعه موردی: رودخانه شاهرود)

رزیتا آریایی نژاد^۱

مهدی سرائی تبریزی^{*۲}

M.sarai@srbiau.ac.ir

حسین بابازاده^۳

تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۹/۰۸

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۶/۲۹

چکیده

زمینه و هدف: مدل سازی کیفیت آب رودخانه ها می تواند به عنوان یکی از مؤثرترین ابزارها در جهت مدیریت کیفیت آب رودخانه ها و کاهش تبعات مسایل محیط زیستی ناشی از ورود آلاینده ها به آن مورد استفاده قرار گیرد. هدف از مقاله حاضر استفاده از مدل معتبر QUAL2Kw.5.1 در راستای مدل سازی کیفیت آب در رودخانه شاهرود می باشد.

روش بررسی: در مقاله حاضر از مدل QUAL2Kw.5.1 برای مدل سازی هفت پارامتر کیفیت آب شامل اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، قلیابیت، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، فسفر کل و نیتروژن کل در چهار دوره زمانی در رودخانه شاهرود استفاده شده است. به منظور واسنجی مدل از داده های آبان ۱۳۸۶ و تیر ۱۳۸۷ و برای صحت سنجی مدل از داده های شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ استفاده شده است. واسنجی خودکار ضرایب مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل انجام شده است. به منظور مقایسه نتایج شبیه سازی شده مدل با داده های مشاهداتی از دو پارامتر آماری شامل ضریب تبیین و میانگین قدرمطلق خطا استفاده شده است.

یافته ها: مهم ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می باشد. مدل در شبیه سازی پارامترهای pH و هدایت هیدرولیکی با مقادیر میانگین قدرمطلق خطای ۰/۱۹ و ۱۶۳/۸۹ در مرحله صحت سنجی به ترتیب بیشترین و کمترین دقت را از خود نشان داد. به طور میانگین حداقل و حداکثر اکسیژن محلول اندازه گیری شده در رودخانه شاهرود در شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ و به ترتیب برابر ۶/۹۳ و ۹/۹۹ میلی گرم بر لیتر اندازه گیری شده است. همچنین بیشترین و کمترین دقت مدل در شبیه سازی این پارامتر مربوط به تیر و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۸۶ و ۱/۲۹ می باشد. همچنین نتایج نشان

۱- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران*(مسئول مکاتبات)

۳- دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

داده که مدل سازی هیدرولیکی دقیق از تغییرات پارامترهای هیدرولیکی رودخانه و جریان در طول رودخانه تأثیر زیادی در مدل سازی کیفیت آب رودخانه دارد.

بحث و نتیجه گیری: نتایج مقاله حاضر دقت مناسب مدل QUAL2Kw.5.1 را در شبیه سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شاهرود نشان می دهد. از طرف دیگر دقت شبیه سازی هر پارامتر با توجه به مقدار تغییرات آن در طول رودخانه متغیر می باشد. به نحوی که هر چه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه های مختلف کم تر باشد، دقت مدل در شبیه سازی این پارامتر بیش تر خواهد بود. واژه های کلیدی: رودخانه شاهرود، مدل QUAL2Kw.5.1 مدل سازی کیفیت آب، صحت سنجی، واسنجی.

Modeling Water Quality of Rivers Using QUAL2Kw Model (Case Study: Shahroud River)

Rozita Aryaee Nezhad¹

Mahdi Sarai Tabrizi^{2*}

M.sarai@srbiau.ac.ir

Hossein Babazadeh³

Accepted:2017.09.13

Received:2017.11.29

Abstract

Background and Objective: Modeling water quality of rivers can be used as one of the most effective tools for water quality management in rivers and reducing the environmental impacts of entering pollutants. The purpose of this paper is to use the valid QUAL2Kw 5.1 model to model water quality in Shahroud River.

Method: In this paper, seven parameters of water quality have been used including dissolved oxygen (DO), biochemical demand oxygen (BOD), pH, total dissolved solids (TDS), total phosphorus, and total nitrogen four times in Shahroud River. Data from October of 2007 and July of 2008 were used to calibrate and data from September and October of 2008 were used to verify the model. Auto-calibration of model coefficients was done using genetic algorithm of the model. In order to compare simulated results with the observed data, determination coefficient and mean absolute error were used.

Findings: The most important calibration coefficients of the model were related to TSS, BOD, total nitrogen and phosphorus. This model in simulation of pH and EC with mean absolute error of 0.19 and 163.89 during verification stage showed the most and the least accuracy, respectively. On average the minimum and maximum DO were measured 6.93 and 9.99 mg/L in September and October of 2008 respectively in Shahroud River. Also the highest and lowest accuracy of the model in simulating these parameters were related to July and October of 2008 with mean absolute error of 0.86 and 1.29, respectively. In addition the results showed accurate hydraulic modeling of hydraulic parameters changes of the river along the river had a great influence on modeling of the water river quality.

Discussion and Conclusion: The results of this paper show the accuracy of the QUAL2Kw model in simulating water quality parameters of Shahroud River. On the other hand, the accuracy of the simulation of each parameter varies with the amount of its variation along the river so that the less the changes in a parameter along the river and at different intervals, the higher the accuracy of the model in simulating this parameter will be.

Keywords: Shahroud River, QUAL2Kw Model, Water Quality Modeling, Verification, Calibration

1 -MSc. Student Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

2 -Assistant Professor, Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.* (Corresponding Author)

3 -Associate Professor, Department of Water Engineering, Science and Reserch Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

مقدمه

داشته و خودپالایی کم در پارامترهای TSS و NO_3 با توجه به بار آلودگی ورودی در این بازه از رودخانه داشته است (۴). حسینی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تغییرات توان خودپالایی رودخانه کارون در سال‌های ۸۷ و ۹۲ با استفاده از مدل QUAL2KW در محدوده شهر اهواز رودخانه کارون پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان‌دهنده عدم خودپالایی پارامتر EC در رودخانه کارون برای سال ۸۷ و عدم خودپالایی پارامتر BOD در سال ۹۲ بوده است. همچنین بهترین شبیه‌سازی مدل برای پارامتر pH بدست آمد و در رتبه‌های بعدی به ترتیب پارامتر BOD و EC قرار گرفتند (۵).

عاشق‌مغلا و همکاران (۲۰۱۵) در تحقیقی دو رودخانه‌ی سبزکوه در چهارمحال و بختیاری و رودخانه قشلاق در کردستان را با مدل QUAL2KW شبیه‌سازی کردند. نتیجه این شبیه‌سازی نشان داد که رعایت استانداردهای تخلیه پساب، شرایط کیفی مناسب رودخانه قشلاق را به خوبی حفظ می‌کند. اما در رودخانه سبزکوه به دلیل میزان توان خودپالایی و تعداد زیاد منابع آلاینده موجود، رعایت استانداردهای تخلیه پساب، نه تنها کمکی به حفظ کیفیت آب نمی‌کند، بلکه تاثیر بسیار منفی بر کیفیت آب رودخانه خواهد گذاشت. سپس، با استفاده از شبیه‌سازی کیفی رودخانه، حد مجاز مناسب هر رودخانه بر اساس توان خودپالایی رودخانه و تعداد و نوع منابع آلاینده موجود برآورد شد و نتایج نشان داد که در تدوین استانداردهای دقیق و کارآمد باید به توان خودپالایی رودخانه، تعداد منابع آلاینده حاشیه رودخانه و میزان بارگذاری مواد زاید و دیگر شرایط متفاوت رودخانه‌ها نیز توجه نمود (۶). مه‌راسی و همکاران (۲۰۱۵) کیفیت آب رودخانه کینه‌ورز را با استفاده از مدل QUAL2KW شبیه‌سازی کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که نیترژن کل و فسفر کل به ترتیب باید ۷۶٪ و ۹۳٪ کاهش یابد تا به هدف کیفیت آب مطلوب در رودخانه دست یافت (۷).

ورود انواع مختلف آلاینده‌های کشاورزی، صنعتی و پساب‌های شهری به رودخانه‌ها که یکی از منابع اصلی تأمین آب آشامیدنی، صنعتی و کشاورزی می‌باشند، باعث ایجاد بحران محیط‌زیستی در عصر حاضر شده است. واحدهای صنعتی، کشاورزی و مسکونی واقع در حوضه رودخانه از نظر مصرف آب به رودخانه وابسته می‌باشند. زهکش‌های کشاورزی، پساب‌های صنایع و خانگی و غیره وارد رودخانه شده و آلودگی رودخانه‌ها را همراه با مصارف آب تشدید کرده است (۱).

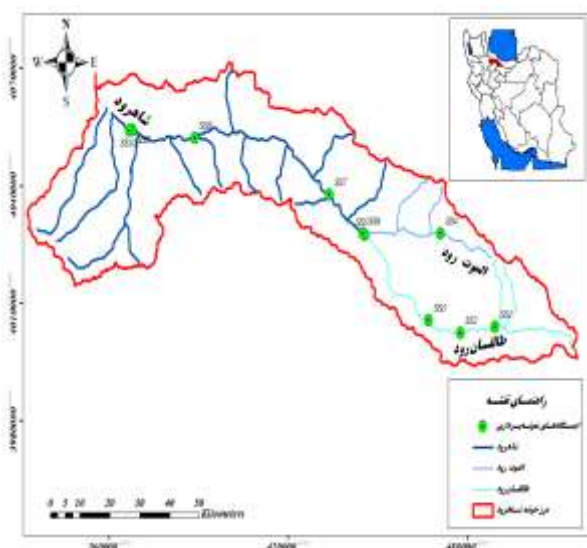
شکری و همکاران (۱۳۹۳) به شبیه‌سازی کیفی آمونیم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدل QUAL2KW پرداختند. نتایج حاصل از صحت‌سنجی ایشان نشان داد که مدل تطابق خوبی با واقعیت دارد و با توجه به مطالعات به عمل آمده بیش‌تر منابع آلوده کننده رودخانه گرگر را می‌توان فاضلاب‌های روستاهای مسیر، پساب‌ها و فاضلاب‌های ماهی‌سراها و حوضچه‌های پرورش ماهی و زهکش‌های کشاورزی دانست (۲). خدام-محمدی و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر (مطالعه موردی: پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک- بختگان) به کمک مدل کیفی QUAL2K پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که وجود پل‌ها و تأسیسات آب‌بند مانند بند امیر، پل رحمت آباد و بند حسن‌آباد می‌تواند باعث افزایش تلاطم و افزایش هوادهی و قدرت خودپالایی رودخانه کر و در نتیجه افزایش میزان اکسیژن محلول در رودخانه شود (۳).

حسینی و همکاران (۱۳۹۵) با بررسی کارایی مدل QUAL2Kw در خودپالایی رودخانه (مطالعه موردی رودخانه کارون در بازه زرگان- کوت امیر) دریافتند که این مدل کارایی خوبی برای بررسی خودپالایی رودخانه دارد. در این تحقیق پارامترهای EC، NO_3 ، TSS، BOD، DO، pH و دما توسط مدل شبیه‌سازی و واسنجی شده است. خروجی مدل به طور کلی حکایت از عدم خودپالایی رودخانه در پارامترهای pH و BOD

روش بررسی

معرفی رودخانه مورد مطالعه

حوضه آبریز رودخانه شاهرود بخشی از حوضه سفیدرود بزرگ بوده و با مشخصات طول جغرافیایی ۳۰-۴۹ الی ۱۰-۵۹ و عرض جغرافیایی ۷-۳۶ الی ۴۵-۳۶ قرار دارد که فاصله بین حد شرقی و غربی آن حدود ۱۶۰ کیلومتر و عرض آن قریب به ۲۵ کیلومتر می باشد. رودخانه شاهرود مهم ترین و پر آب ترین رودخانه استان قزوین است. رودخانه های الموت رود و طالقان رود در محل روستای شیرکوه به هم پیوسته و رودخانه شاهرود را تشکیل می دهند. شکل ۱ موقعیت رودخانه شاهرود را به همراه ایستگاه های نمونه برداری نشان می دهد.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه های نمونه برداری آب

Figure 1- Location of water sampling stations

ذوالفقاری پور و همکاران (۲۰۱۶) به منظور مدیریت کیفیت رودخانه و حداقل سازی هزینه های حفظ محیط زیست و تامین معیارهای کیفیت آب به مدل سازی با استفاده از نرم افزار QUAL2Kw پرداختند. ایشان به منظور لحاظ کردن نقش تخلیه کنندگان بار آلودگی در تصمیم گیری و افزایش قابلیت اجرا برای برنامه های پیشنهادی تخصیص بار آلودگی در رودخانه از رویکرد گزینش اجتماعی استفاده کردند. برای هر تخلیه کننده، سناریوهای مختلف تصفیه فاضلاب مشخص و گزینه های ترکیبی تصفیه تعریف شدند. سپس با استفاده از مدل شبیه سازی کیفیت QUAL2Kw، برای هر یک از گزینه های تصفیه، مقادیر جریمه تخطی از استاندارد کیفیت محاسبه شد. نتایج حاصل از کاربرد مدل پیشنهادی در یک مطالعه موردی که قسمتی از رودخانه زرچوب در شمال ایران بود، نشان داد که تدوین سیاست های تخصیص در کاهش بار آلودگی رودخانه ها کارآیی مناسبی دارد (۸). محققانی در سال ۲۰۱۷ با مدل کردن کیفیت آب رودخانه یامیونا در هند به کمک مدل QUAL2Kw نشان دادند که پارامترهای TN، CBOD_t، DO و TC نسبت به جریان بالادست و کیفیت و موقعیت ورودی منبع آلاینده بسیار حساس است (۹).

هدف اصلی پژوهش حاضر شبیه سازی پارامترهای کیفیت آب شامل هفت پارامتر اکسیژن محلول^۱، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی^۲، قلیائیت^۳، کل مواد جامد محلول^۴، هدایت الکتریکی^۵، فسفر کل^۶ و نیتروژن کل^۷ در چهار دوره زمانی (آبان ۱۳۸۶، تیر ۱۳۸۷، شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷) در رودخانه شاهرود با استفاده از مدل QUAL2Kw 5.1 می باشد.

- 1- Dissolved Oxygen (DO)
- 2- Biochemical Oxygen Demaon (BOD)
- 3- Potential of Hydrogen (pH)
- 4- Total Dissolved Solids (TDS)
- 5- Electrical Conductivity(EC)
- 6- Total Phosphorus (TP)
- 7- Total Nitrogen (TN)

نمونه‌برداری در شکل ۱ و مشخصات بازه‌های رودخانه شاهرود در جدول ۱ نشان داده شده است. مطابق با جدول ۱، طول کل مسیر مورد بررسی در رودخانه شاهرود برابر ۱۸۹/۱۳ کیلومتر می‌باشد.

بازه‌بندی رودخانه شاهرود بر اساس ۱۰ ایستگاه‌های نمونه‌برداری شامل ۴ ایستگاه روی شاخه اصلی رودخانه شاهرود و ۶ ایستگاه رویدو شاخه ورودی به این رودخانه (۲ ایستگاه روی الموت‌رود و ۴ ایستگاه روی طالقان‌رود) انجام شده است. موقعیت ایستگاه‌های

جدول ۱- مشخصات بازه‌های رودخانه شاهرود مورد استفاده در مدل کیفی

Table 1- Characteristics of Shahrood River range used in qualitative model

ردیف	رودخانه	کد ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	فاصله از پایین‌دست (کیلومتر)	طول بازه (کیلومتر)	ارتفاع (متر)	شیب بازه
۱	طالقان رود	SS1	۳۶/۱۸	۵۰/۸۸	۱۸۹/۱۳	-	۱۹۴۰	-
۲	طالقان رود	SS2	۳۶/۱۷	۵۰/۷۵	۱۷۶/۵۹	۱۲/۵۴	۱۷۹۶	۰/۰۹
۳	طالقان رود	SS3	۳۶/۲۰	۵۰/۶۳	۱۶۴/۱۰	۱۲/۴۹	۱۶۹۳	۰/۱۲
۴	الموت رود	SS4	۳۶/۴۰	۵۰/۶۸	۱۲۹/۴۸	۳۴/۶۲	۱۶۳۶	۰/۶۱
۵	الموت رود	SS5	۳۶/۳۹	۵۰/۳۹	۱۰۲/۴۹	۲۶/۹۹	۱۰۷۸	۰/۰۵
۶	طالقان رود	SS6	۳۶/۳۹	۵۰/۳۹	۱۰۱/۹۸	۰/۵۰	۱۰۵۸	۰/۰۳
۷	شاهرود	SS7	۳۶/۴۰	۵۰/۱۷	۸۵/۴۶	۱۶/۵۲	۹۲۰	۰/۱۲
۸	شاهرود	SS8	۳۶/۶۱	۴۹/۷۵	۲۶/۵۰	۵۸/۹۶	۴۸۶	۰/۱۴
۹	شاهرود	SS9	۳۶/۶۲	۴۹/۵۲	۰/۸۹	۲۵/۶۱	۳۲۶	۰/۱۶
۱۰	شاهرود	SS10	۳۶/۶۲	۴۹/۵۱	۰/۰۰	۰/۸۹	۲۷۹	۰/۰۲

خواهی بیوشیمیایی^۱، قلیائیت، کل مواد جامد محلول، هدایت الکتریکی، کدورت، فسفر کل و نیتروژن کل از مهم‌ترین پارامترهای اندازه‌گیری شده در نمونه‌ها می‌باشد. جدول ۲ لیست داده‌های مورد استفاده و مشخصات آماری آن‌ها را نشان می‌دهد.

نمونه‌برداری از رودخانه شاهرود طی چهار دوره در آبان‌ماه ۱۳۸۶، تیرماه ۱۳۸۷، شهریورماه ۱۳۸۷ و مهر ماه ۱۳۸۷ توسط سازمان حفاظت محیط زیست انجام شده است. زمان‌های نمونه‌برداری با توجه به تغییرات دبی رودخانه و نوع منبع آلاینده و زمان‌های تاثیرپذیری آن‌ها انتخاب شده است. اکسیژن محلول، اکسیژن

جدول ۲- خلاصه آماری داده‌های رودخانه شاهرود (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹)

Table 2- Summary of Statistical data of Shahrood River (Environmental Protection Agency, 2010)

TN (mg/l)	TP (mg/l)	Turbidity (NTU)	TS (mg/l)	EC (dS/m)	pH	BOD (mg/l)	DO (mg/l)	T (°C)	Q (m³/s)	آماره	تاریخ نمونه‌برداری
۰/۶۵	۰/۰۲	۱۰	۳۴۴	۰,۳۹	۷/۷	۹/۰	۶/۱	۶/۳	۰/۸۸	مینیمم	آبان ۱۳۸۶
۲/۰۴	۰/۰۵	۸۸۰	۱۴۵۰	۰,۸۷	۸/۲	۳۸/۰	۹/۷	۹/۸	۹/۲۰	ماکزیمم	
۱/۲۵	۰/۰۳	۳۱۳	۷۷۵	۰,۶۸	۷/۹	۱۸/۳	۷/۶	۸/۵	۳/۹۲	میانگین	
۰/۴۵	۰/۰۱	۳۲۲	۴۱۸	۲۰,۰	۰/۲	۸/۷	۱/۲	۱/۲	۲/۶۷	انحراف معیار	
۰/۶۹	۰/۰۴	۲	۳۸۰	۰,۶۰	۸/۰	۱۸/۵	۶/۴	۱۳/۳	۰/۵۴	مینیمم	تیر ۱۳۸۷
۱/۳۴	۰/۰۶	۱۸۰	۸۴۰	۱,۳۴	۸/۵	۸۴/۰	۷/۹	۲۷/۳	۵/۱۰	ماکزیمم	
۱/۰۴	۰/۰۵	۴۶	۶۱۴	۰/۹۲	۸/۲	۵۹/۵	۷/۴	۱۹/۵	۲/۷۰	میانگین	
۰/۲۶	۰/۰۱	۵۹	۲۱۲	۰/۲۷	۰/۲	۲۸/۹	۰/۵	۵/۱	۱/۶۱	انحراف معیار	
۰/۳۶	۰/۰۵	۲	۳۸۵	۰/۶۱	۷/۸	۱۱/۵	۶/۰	۱۲/۰	۰/۲۱	مینیمم	شهریور ۱۳۸۷
۱/۰۵	۰/۱۳	۹۰	۸۲۴	۱/۳۰	۸/۲	۲۲/۵	۷/۸	۲۷/۰	۴/۷۶	ماکزیمم	
۰/۶۲	۰,۰۷	۳۹	۶۴۶	۱/۰۰	۷/۹	۱۸/۸	۶/۹	۲۰/۱	۱/۸۴	میانگین	
۰/۲۱	۰/۰۳	۴۱	۱۷۷	۰/۲۶	۰/۲	۳/۵	۰/۶	۴/۸	۱/۳۹	انحراف معیار	
۱/۱۳	۰/۸۹	۳	۲۲۷	۰/۴۶	۷/۹	۲/۴	۷/۸	۱۳/۵	۲/۸۳	مینیمم	مهر ۱۳۸۷
۸/۳۸	۱/۳۲	۹۲	۴۲۸	۰/۷۴	۸/۴	۴۲/۸	۱۱/۳	۲۳/۵	۹/۱۹	ماکزیمم	
۳/۳۷	۱/۰۷	۴۱	۳۳۲	۰/۶۲	۸/۱	۹/۸	۱۰/۰	۱۹/۰	۵/۲۹	میانگین	
۲/۱۴	۰/۱۷	۴۰	۷۴	۰/۱۰	۰/۱	۱۳/۱	۱/۰	۴/۱	۲/۳۴	انحراف معیار	

* در جدول ۲، واحد درجه حرارت آب درجه سانتی‌گراد، دبی مترمکعب بر ثانیه، اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی میلی‌گرم بر لیتر و هدایت الکتریکی دسی زیمنس بر متر می‌باشد.

غلظت باز مزدوج این اسید و pK_a ثابت تفکیک اسیدی می‌باشد.
مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه شاهرود با استفاده از

نرم‌افزار QUAL2Kw 5.1

در مقاله حاضر مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه شاهرود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw 5.1، در پنج مرحله کلی انجام شده است.

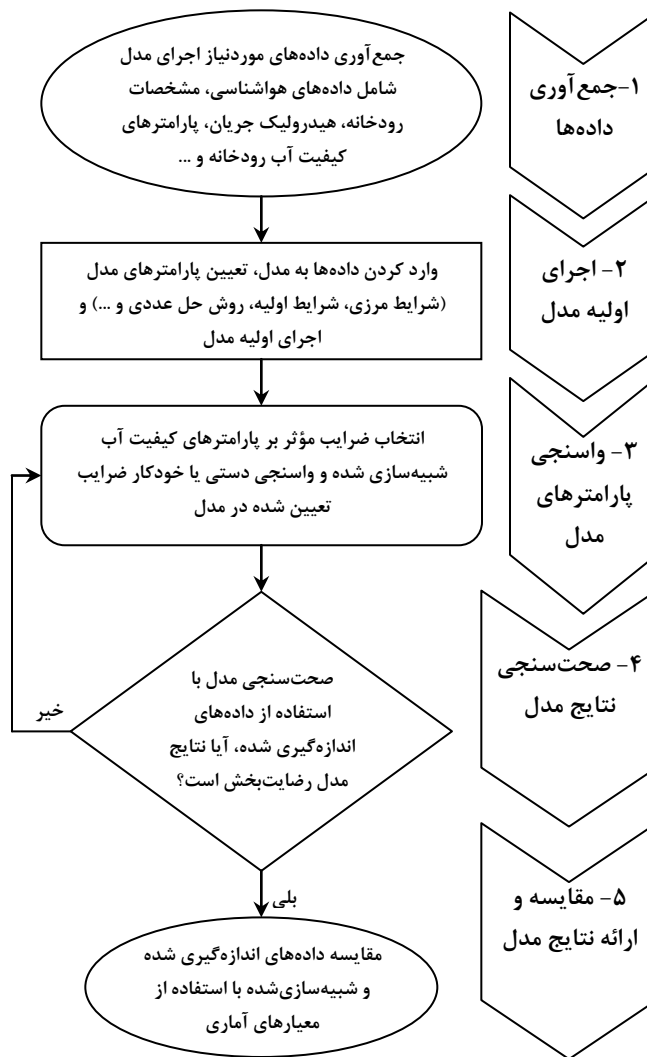
این مراحل در شکل ۲ به صورت فلوچارت نشان داده شده است.

معادله هندرسون- هاسلبالچ^۱ برای محاسبه pH یک محلول با استفاده از ثابت تفکیک اسیدی بر اساس رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$pH = pK_a + \log_{10} \left(\frac{[A^-]}{[HA]} \right) \quad (1)$$

در رابطه (۱)، [HA] غلظت مولی اسید نامحلول ضعیف، [A⁻]

1 -Henderson-Hasselbalch equation



شکل ۲- فلوجارت مراحل مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2Kw

Figure 2- Flowchart of river water quality modeling process using QUAL2Kw model

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (Y_{Obsi} - \bar{Y}_{Obs})(Y_{Simi} - \bar{Y}_{Sim}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (Y_{Obsi} - \bar{Y}_{Obs})^2 \sum_{i=1}^N (Y_{Simi} - \bar{Y}_{Sim})^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |Y_{Obsi} - Y_{Simi}| \right) \quad (3)$$

که در روابط (۲) و (۳)، Y_{Obsi} ، \bar{Y}_{Obs} ، Y_{Simi} ، \bar{Y}_{Sim} به ترتیب مقادیر مشاهداتی، شبیه‌سازی شده، میانگین مشاهداتی و

در مقاله حاضر برای واسنجی مدل از داده‌های آبان ۱۳۸۶ و تیر ۱۳۸۷ و برای صحت‌سنجی مدل از داده‌های شهریور ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ استفاده شده است. واسنجی خودکار ضرایب مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل انجام شده است. به منظور مقایسه نتایج شبیه‌سازی شده مدل با داده‌های مشاهداتی از دو پارامتر آماری شامل ضریب تبیین (R^2) و میانگین قدرمطلق خطا (MAE) مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است.

قابلیت انتخاب جهت واسنجی شدن را دارند. مقادیر تعدادی از مهم ترین پارامترهای واسنجی شده در مدل مقاله حاضر با استفاده از روش واسنجی خودکار توسط الگوریتم ژنتیک در جدول ۳ ارائه شده است.

میانگین شبیه سازی شده ها در ایستگاه نام و N تعداد داده ها می باشد.

یافته ها

در نرم افزار QUAL2Kw.5.1 تعداد زیادی ضریب و پارامتر

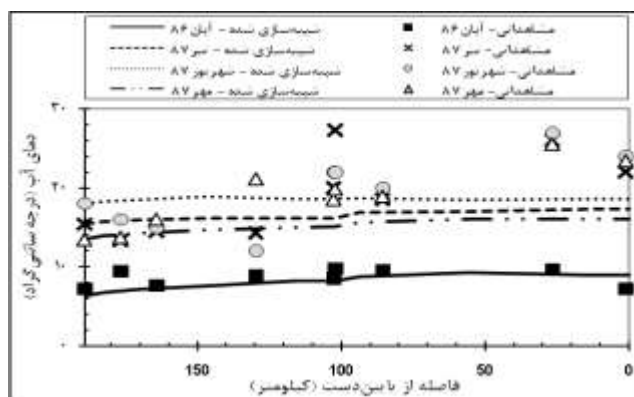
جدول ۳- مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مدل QUAL2Kw.5.1 با استفاده از الگوریتم ژنتیک

Table 3 - The values of calibrated parameters in the QUAL2Kw model using the genetic algorithm

ردیف	دسته بندی پارامتر	ضریب	واحد	حداقل	حداکثر	مقدار واسنجی شده
۱	جامدات معلق غیر آلی	سرعت ته نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۰۶
۲	اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۱/۹۳
۳		نرخ اکسیداسیون	یک بر روز	۰	۵	۰/۵۴
۴	نیتروژن آلی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۰/۸۴
۵		نرخ ته نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۲۵
۶	آمونیم	نرخ نیتریفیکاسیون	یک بر روز	۰	۱۰	۲/۱۵
۷	نیترات	نرخ دنیتریفیکاسیون	یک بر روز	۰	۲	۱/۰۳
۸	فسفر آلی	نرخ هیدرولیز	یک بر روز	۰	۵	۳/۴۴
۹	فسفر غیر آلی	نرخ ته نشینی	متر بر روز	۰	۲	۰/۰۱۴

کل اشاره کرد که در ادامه نمودارهای مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده این پارامترها ارائه شده است. شکل ۳ مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده پارامتر دمای آب را در چهار دوره اندازه گیری شده نشان می دهد.

جدول ۳ نشان می دهد که مهم ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می باشد. از جمله مهم ترین پارامترهایی که اثر زیادی بر محیط زیست سالم در یک رودخانه دارد، می توان به دمای آب، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و نیتروژن

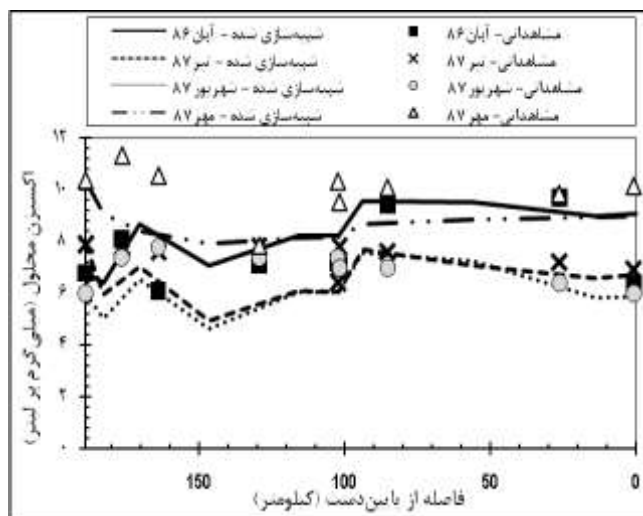


شکل ۳- مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده دمای آب در چهار دوره واسنجی و صحت سنجی

Figure 3 - Observed and Simulated Water Temperature in Four Calibration and Validation Periods

۸/۷۱ و ۱۹/۵۶ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. همچنین با توجه به میانگین قدرمطلق خطا (MAE)، بیش‌ترین و کم‌ترین دقت شبیه‌سازی مدل مربوط به آبان ۱۳۸۶ و مهر ۱۳۸۷ و به ترتیب برابر ۱/۱۵ و ۴/۱۶ می‌باشد. شکل ۴ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر اکسیژن محلول را در چهار دوره مدل‌سازی شده نشان می‌دهد.

دمای آب یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که روی سایر پارامترهای کیفیت آب رودخانه تأثیرگذار است. به طور معمول هر چه دمای آب بالاتر باشد، سرعت واکنش‌های شیمیایی در آب بیش‌تر می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که به طور میانگین کم‌ترین و بیش‌ترین دمای آب اندازه‌گیری شده در رودخانه شاهرود مربوط به آبان ۱۳۸۶ و شهریور ۱۳۸۷ و به ترتیب برابر

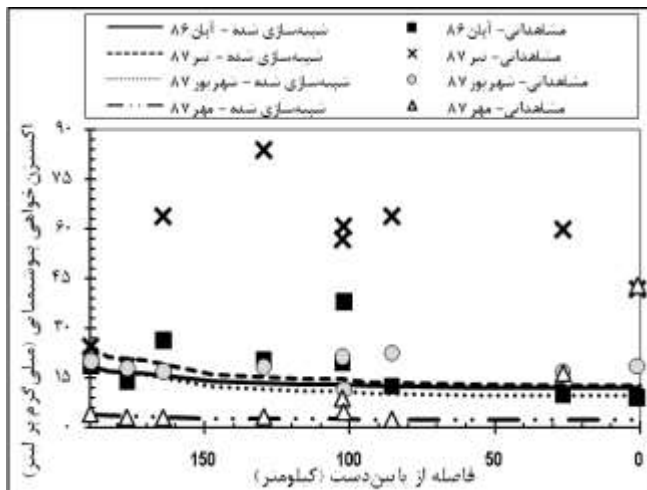


شکل ۴- مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده اکسیژن محلول در چهار دوره واسنجی و صحت‌سنجی

Figure 4 - Observed and Simulated Dissolved Oxygen (DO) Values in Four Calibration and Validation Periods

۱۳۸۷ و به ترتیب برابر ۶/۹۳ و ۹/۹۹ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین دقت مدل در شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول مربوط به تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۸۶ و ۱/۲۹ می‌باشد. شکل ۵ مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پارامتر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی را در چهار دوره مدل‌سازی شده نشان می‌دهد.

پارامتر اکسیژن محلول آب با توجه به این‌که برای هر نوع واکنش شیمیایی و همچنین حیات موجودات زنده در آب ضروری است، یکی از پارامترهای بسیار مهم در بین سایر پارامترهای کیفیت آب می‌باشد. غلظت اکسیژن محلول در آب به طور مستقیم به برخی از سایر پارامترهای کیفی از جمله دمای آب وابسته است. با توجه به شکل ۴، به طور میانگین حداقل و حداکثر اکسیژن محلول اندازه‌گیری شده در رودخانه شاهرود در شهریور ۱۳۸۷ و مهر

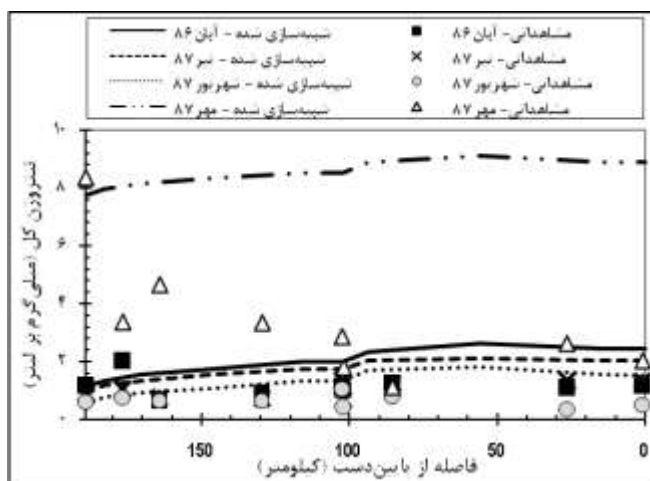


شکل ۵- مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در چهار دوره مدل سازی شده

Figure 5 - Observed and simulated biochemical oxygen demand (BOD) Values in Four Calibration and Validation Periods

به ترتیب برابر ۵۲/۷۸ و ۹/۸۰ میلی گرم بر لیتر اندازه گیری شده است. مدل بیشترین و کمترین دقت شبیه سازی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی را به ترتیب در شهریور ۱۳۸۷ و تیر ۱۳۸۷ و با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۵/۲۰ و ۳۶/۷۷ داشته است. شکل ۶ مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده پارامتر نیتروژن کل را در چهار دوره مدل سازی شده نشان می دهد.

غلظت پارامتر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) در آب به طور مستقیم به میزان فعالیت میکروارگانیسم های موجود در آب وابسته است به طوری که هر چه فعالیت های موجودات زنده و واکنش های شیمیایی در آب بیش تر باشد، مقدار مصرف اکسیژن محلول بیش تر و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی بیش تر می شود. شکل ۵ نشان می دهد که به طور میانگین بیشترین و کمترین مقادیر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ و



شکل ۶- مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده نیتروژن کل در چهار دوره مدل سازی شده

Figure 6 - Observed and simulated total nitrogen Values in Four Calibration and Validation Periods

در شبیه‌سازی نیتروژن کل در تیر ۱۳۸۷ و مهر ۱۳۸۷ با میانگین قدرمطلق خطای برابر ۰/۵۹ و ۵/۲۳ بدست آمده است. نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw.5.1 برای پارامترهای مختلف در جدول ۴ ارائه شده است.

پارامتر نیتروژن کل از مجموع چهار فرم نیتروژن شامل نیتروژن آلی، نیتروژن آمونیاکی، نیتريت و نیترات بدست می‌آید. با توجه به شکل ۶ بیش‌ترین و کم‌ترین غلظت نیتروژن کل به ترتیب در مهر ۱۳۸۷ و شهریور ۱۳۸۷ برابر ۳/۳۷ و ۰/۶۵ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. همچنین بیش‌ترین و کم‌ترین دقت مدل

جدول ۴- نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

Table 4- The statistical results of the calibration and verification procedures of the QUAL2Kw model

پارامترهای مدل‌سازی شده							ردیف	زمان نمونه‌برداری	آماره
DO	CBOD _u	TP	TN	EC	pH	T			
۱/۰۴	۶/۱۹	۰	۰/۹۲	۱۴۰	۰/۴۳	۱/۱۵	۱	آبان ۱۳۸۶ (واسنجی)	MAE
۰/۱۳	۰/۰۳	۰/۴۵	۰/۰۵	۰/۲۳	۰/۳	۰/۱۲			ضریب همبستگی
۰/۸۶	۳۶/۷۷	۰	۰/۵۹	۲۳۲/۳۳	۰/۲	۳/۹۹	۲	تیر ۱۳۸۷ (واسنجی)	MAE
۰/۱۴	۰/۳۳	۰/۳۱	۰/۳۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۳۳			ضریب همبستگی
۱/۱۴	۵/۲۰	۰/۰۶	۰/۵۹	۲۴۶/۶۷	۰/۲۳	۳/۸۶	۳	شهریور ۱۳۸۷ (صحت‌سنجی)	MAE
۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۴۵	۰/۱۸	۰/۰۳	۰/۰۱			ضریب همبستگی
۱/۲۹	۷/۲۱	۱/۰۷	۵/۲۳	۸۱/۱۱	۰/۱۴	۴/۱۶	۴	مهر ۱۳۸۷ (صحت‌سنجی)	MAE
۰/۲۳	۰/۲۳	۰/۱۱	۰/۶۱	۰/۲۷	۰/۲۶	۰/۸۱			ضریب همبستگی
۰/۹۶	۲۱/۴۸	۰	۰/۷۵	۱۸۶/۶۷	۰/۳۲	۲/۵۷		داده‌های واسنجی	MAE
۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۳۸	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۲۱	۰/۲۳			ضریب همبستگی
۳/۱۲	۴/۱۸	۰/۵۶۵	۲/۹۱	۱۶۳/۸۹	۰/۱۹	۴/۰۲		داده‌های صحت‌سنجی	MAE
۰/۱۴	۰/۱۲	۰/۰۷۵	۰/۵۳	۰/۲۳	۰/۱۵	۰/۴۱			ضریب همبستگی

شبیه‌سازی پارامتر pH از خود نشان داد که با نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۶) مطابقت دارد. همچنین نتایج تحقیق حاضد نشان داد که مهم‌ترین ضرایب واسنجی شده در مدل مربوط به مواد جامد معلق، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر می‌باشد که با نتایج شارما و همکاران (۲۰۱۷) هم‌خوانی دارد. نتایج مقاله حاضر دقت مناسب مدل QUAL2Kw.5.1 را در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه شاهرود نشان می‌دهد که شکری و همکاران (۱۳۹۳) چنین نتیجه‌ای را در مورد شبیه‌سازی کیفی آمونیم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده

مقدار میانگین قدرمطلق خطا هر چه به صفر نزدیک‌تر و مقدار ضریب همبستگی هر چه به یک نزدیک‌تر باشند حاکی از دقت بیش‌تر نتایج مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. جدول ۴ نشان می‌دهد که بیش‌ترین همبستگی برای پارامتر دمای آب در مهر ۱۳۸۷ و برابر ۰/۸۱ بدست آمده است. همچنین نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که دقت مدل در شبیه‌سازی مقادیر هدایت الکتریکی دقت کم‌تری نسبت به سایر پارامترها داشته است.

بحث و نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر مدل QUAL2Kw.5.1 دقت بالایی در

- study: Droodzan Dam down to Lake Tashkh-Bakhtegan). *Journal of Water Resources Engineering*; 7 (27): 85-98 (in Persian).
4. Hosseini, P., Ildoromi, A.R., Hosseini, Y., 2016. The Study of Qual2kw Model Efficacy on River Self-purification (A Case Study of Karun River at Interval of Zargan to Kute Amir). *Journal of Environmental Science and Technology*; 18 (4): 103-122 (in Persian).
 5. Hosseini, P., Hosseini, Y., 2017. Investigating the variation of self-propagation power of Karun River in 87 and 92 years using QUAL2KW model in Ahvaz city. *AmirKabir Journal of Civil Engineering*; 49 (1): 35-46 (in Persian).
 6. Ashegh Moalla, M., Karimi, S., Malek Mohammadi, B., Jafari, H. R., 2015. Procedure of a comprehensive water quality management in rivers. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*; 2(2): 4-8.
 7. Mehrasbi, M. R., Farahmand Kiaa, Z., 2015. Water Quality Modeling and Evaluation of Nutrient Control Strategies Using QUAL2K in the Small Rivers. *Journal of Human, Environment and Health Promotion*; 1(1): 1-11.
 8. Zolfagharipoor, M. A., Ahmadi, A., 2016. A decision-making framework for river water quality management under uncertainty: Application of social choice rules. *Journal of Environmental Management*; 183(1): 152-163.
 9. Sharma, D., Kansal, A., Pelletier, G., 2017. Water quality modeling for urban reach of Yamuna River, India (1999–2009), using QUAL2Kw. *Applied Water Science*; 7(3): 1535–155

ازمدل QUAL2Kw.5.1 عنوان کرده بودند. دقت شبیه‌سازی هر پارامتر با توجه به مقدار تغییرات آن در طول رودخانه متغیر می‌باشد. به نحوی که هر چه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف کم‌تر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی این پارامتر بیش‌تر خواهد بود. داشتن داده‌های دقیق از تغییرات پارامترهای هیدرولیکی رودخانه و جریان در طول رودخانه تأثیر زیادی در مدل‌سازی هیدرولیکی و بالتبع در مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه دارد. همچنین دقت مدل در مرحله صحت‌سنجی به نوع داده‌های مورد استفاده در مرحله واسنجی، مشخصات الگوریتم ژنتیک مورد استفاده در مرحله واسنجی تعداد ضرایب واسنجی شده، و تغییرات داده‌های مرحله صحت‌سنجی بستگی دارد.

تشکر و قدردانی

داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده در این مقاله از سازمان حفاظت محیط‌زیست تهیه شده است که به این وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

1. Hashemi, S. H., Ghasemi Ziarani, E., 2011. Contamination of load input from sub-basins to Samadirkabir reservoir by using QUAL2K model. *Journal of Environmental Studies*; 37 (57): 1-8 (in Persian).
2. Shokri, S., Hooshmand, A., Moaz, H., 2015. Qualitative simulation of ammonium and nitrate in the Gregor River using the QUAL2KW model. *Journal of Wetland Ecobiology*; 7 (68): 23-57 (in Persian).
3. Khodam Mohammadi, M., Boustani, F., 2016. Assessment of self-healing power and the role of dissolved oxygen in the quality of water in the river of Khor (Case

