مجله پژوهش آب ایران
جلد ۱۵/ شماره ۱/ پیاپی ۴۰/ بهار ۱۴۰۰ (۱۲۱-۱۳۱)

مقاله پژوهشی

مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استفاده از نرم‌افزار Qual2kw

آرش خنک[۱]، مهدی سرائی تبریزی[۲*]، حسین بابازاده[۳]، علی صارمی[۴] و مهدی محمدی قلعه‌نی[۵]

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی دقت نرم‌افزار Qual2kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی رودخانه سفیدرود در پایین‌دست سد سفیدرود بود. بدین منظور نمونه‌برداری و انجام مطالعات آزمایشگاهی برای ۱۲ ایستگاه در بازه‌ای به طول ۱۱۰ کیلومتر در دو فصل تابستان (مردادماه) و پاییز (آبان‌ماه) در سال ۱۳۹۸ انجام شد. در این پژوهش نرم‌افزار Qual2kw 6 برای شبیه‌سازی ۸ پارامتر اصلی کیفیت آب شامل دمای آب، pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن کل و فسفر کل، برای مردادماه و آبان‌ماه ۱۳۹۸ به‌ترتیب واسنجی و صحت‌سنجی شد. نتایج نشان داد که بیشترین و کم‌ترین دقت مدل با میانگین مقادیر NRMSE در دو مرحلهٔ برابر با ۳/۳ و ۴۷/۵ درصد به‌ترتیب برای پارامترهای pH و نیتروژن کل حاصل شد. بیشترین مقادیر همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای کل مواد جامد و هدایت الکتریکی به‌ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۶ در مرحله واسنجی مدل به دست آمد. نتایج پژوهش حاکی از توانایی مناسب مدل Qual2kw 6 برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود است.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای کیفیت آب، رودخانه سفیدرود، شبیه‌سازی، مدل Qual2kw 6.

ارجاع: خنک آ، سرائی تبریزی م، بابازاده ح، صارمی ع، و محمدی قلعه‌نی م. ، ۱۴۰۰. مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استفاده از نرم‌افزار Qual2kw. مجله پژوهش آب ایران. ۴۰: ۱۲۱-۱۳۱.

1- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
2- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
3- استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
4- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
5- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک، اراک، ایران.
*** نویسنده مسئول**: **m.sarai@srbiau.ac.ir**
تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۰۷

مقدمه

رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آبی، نقشی مهم در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند شرب، کشاورزی و صنعت را دارند. ورود مواد مغذی و آلاینده‌های تجزیه‌پذیر بیولوژیکی به رودخانه به ویژه فاضلاب بهداشتی، پساب‌های صنعتی- کشاورزی، باعث آلودگی رودخانه و ایجاد اختلال در توازن اکسیژن محلول می‌شود. کاربرد بی‌رویه و بیش از حد مواد شیمیایی در کشاورزی، اکوسیستم آب و خاک، رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (بالدوین و همکاران، ۲۰۱۱؛ کوستکا، ۲۰۱۶). با توجه به این‌که عوامل انسانی و آلاینده‌های صنعتی موجب افزایش غلظت آلاینده‌ها در آب رودخانه می‌شوند و با فرض این‌که مکانیزم‌های طبیعی مانند خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آب و خودپالایی رودخانه‌ها سهم عمده در کنترل یا تشدید این غلظت‌ها خواهند داشت، نخستین قدم در تعیین کیفیت آب رودخانه‌ها، کسب آگاهی از تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها در ابعاد زمان و مکان و همچنین مشخص کردن منابع اصلی و انواع آلوده‌کننده‌های آب است (لائو، ۲۰۱۹). امروزه جامع‌نگری و برخورد سیستمی در مدیریت کمّی و کیفی منابع آب به‌علت افزایش مؤلفه‌های سیستم‌ها و پیچیدگی ارتباطات و آثار متقابل آن‌ها از اهمیتی ویژه برخوردار است (مفتاح هلقی، ۱۳۹۱؛ پادک و همکاران، ۲۰۱۸). به‌علت اهمیت پارامترهای کیفی برای تعیین واکنش قابل‌انتظار رودخانه بر اثر ورود آلاینده‌ها، اندازه‌گیری این پارامترها با استفاده از مدل‌های ریاضی ضروری است (بویی و همکاران، ۲۰۱۹). اندازه‌گیری این پارامترها در حجم بالا زمان‌بر، پرهزینه و نیازمند دقت بالایی است بدین‌سبب ضرورت انجام برخی روش‌های غیرمستقیم برای تخمین این پارامترها بیش از پیش نمایان می‌شود (هو و همکاران، ۲۰۱۸؛ نگوین و همکاران، ۲۰۱۹ الف). این مدل‌ها می‌توانند تا آثار بارگذاری‌های موجود و آتی را شبیه‌سازی و مدیران و مسئولان را در تصمیم‌گیری‌های خود یاری کنند (نگوین و همکاران، ۲۰۱۹ب)؛ به‌عبارت دیگر از آن‌جا که حفاظت کیفی رودخانه‌ها نیاز به سرمایه‌گذاری‌های اضافی برای تصفیهٔ‌پساب‌ها یا ایجاد سیستم‌های جمع‌آوری و کنترل زهاب‌ها دارد و همچنین ممکن است سبب محدود کردن توسعهٔ فعالیت‌ها در حوضهٔ رودخانه شود، آثار اقتصادی قابل‌توجهی 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 (گوردون و همکاران، ۲۰۰۴؛ خان و همکاران، ۲۰۱۷؛ آریایی‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۸ و باباخانی و همکاران، ۱۳۹۸).

در مطالعه‌ای آریایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهشی به مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل Qual2Kw در رودخانهٔ شاهرود پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانهٔ شاهرود دقتی مناسب دارد. از طرفی، دقت شبیه‌سازی هر پارامتر با توجه به مقدار تغییرات آن در طول رودخانه متغیر است؛ به گونه‌ای‌که هرچه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف کمتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی این پارامتر نیز بیشتر خواهد بود.

باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) به تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه دیواندره با استفاده از مدل QUAL2KW پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که به‌دلیل افزایش سکونت‌گاه‌های انسانی، تأثیر فاضلاب‌ها، رواناب‌های کشاورزی و همچنین ورود رودخانه‌های فرعی چم‌زرد و پول گشتی، وضعیت زیست‌محیطی رودخانهٔ دیواندره در بازه‌های انتهایی آن نگران‌کننده است؛ بنابراین در منطقهٔ مورد مطالعه، اقدامات کنترلی لازم و ضروری است. محمدی قلعه‌نی و ابراهیمی (۱۳۹۸) با آنالیز حساسیت مدل Qual2kw در مدل‌سازی پارامترهای کیفی سفیدرود به این نتیجه رسیدند که کم‌ترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای پارامتر pH به‌ترتیب برابر ۰/۰۶ و ۰/۰۴، و بیشترین آن برای پارامتر فسفر کل به‌ترتیب برابر ۱/۰۸ و ۰/۹۶ است. همچنین نتایج آنالیز حساسیت در پژوهش ایشان نشان داد که اکسیژن محلول در رودخانهٔ سفیدرود بیشترین حساسیت را به‌ترتیب نسبت به ضریب هوادهی، عمق جریان و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی دارد.

مهراشی و هرهمند (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از مدل Qual2kw به مدل‌سازی کیفیت آب رودخانهٔ کینه ورس در مجاورت شهرستان زنجان در شمال غرب ایران پرداختند و به این نتیجه رسیدند شبیه‌سازی داده‌های به

دست آمده از این مدل، معتبر و این مدل ابزاری ساده برای مدیریت و تصمیم‌گیری در زمینه کیفیت آب این رودخانه است. سردا و سدگیر (۲۰۱۵) در پژوهشی به بررسی بهره‌وری از استانداردهای رایج در کیفیت آب رودخانهٔ گوداواری در هند پرداختند. بدین‌منظور از داده‌های ماهانهٔ کیفیت آب و مدل QUAL2KW استفاده کردند. آنالیز حساسیت نشان داد مدل به عمق آب بسیار و به جریان منابع نقطه‌ای، TN، CBOD و میزان نیتریفیکاسیون به‌طور متوسط حساس است. شارما و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل QUAL2KW آنالیز حساسیت و تحلیل عدم قطعیت را روی داده‌های DO، BOD، کلیفرم کل و نیتروژن کل رودخانهٔ یامونا در هند انجام دادند. نتایج آنالیز حساسیت نشان داد مقادیر پیش‌بینی شده DO، BOD، TC و TN نسبت به جریان بالادست، جریان و کیفیت منبع نقطه‌ای حساس هستند و تحلیل عدم قطعیت با استفاده از روش مونت کارلو نشان داد که داده‌های ورودی مطابق با وضعیت معمول رودخانه شبیه‌سازی خوبی داشتند. آلام و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی با استفاده از مدل Qual2kw به مدل‌سازی کیفیت و کمیت زهاب کشاورزی برای استفاده مجدد پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که این مدل قابلیتی مناسب در تعیین کیفیت و کمیت زهاب در طول زهکش را دارد.

طاهری سوده جانی و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی کاربرد مدل QUAL2Kw برای ارزیابی پراکندگی آلودگی ازت از طریق ارتباط آب رودخانه‌ای و زیرزمینی در رودخانه اوگلیو (ایتالیا شمالی) پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که ترکیبی از داده‌های تجربی و QUAL2Kw یک ابزار ساده، کم‌هزینه لیکن مؤثر در برآورد مبادله NO_3-N بین سطح آب رودخانه و آب زیرزمینی است. حسینی و حسینی (۲۰۱۸) در پژوهشی تغییرات ظرفیت جذب رودخانهٔ قره‌سو در شرق استان اردبیل را با استفاده از مدل Qual2kw بررسی کردند و نتایج نشان داد مقادیر اندازه‌گیری شده و مدل‌سازی شده با یکدیگر توافق خوبی دارند و شبیه‌سازی این پارامترها به خوبی انجام شده است. گورجار و تاره (۲۰۱۹) به ارزیابی مکانی و زمانی کیفی آب و ظرفیت جذب رودخانهٔ رامگانگا در شاخه گانگا با استفاده از آنالیز چندمتغیره و مدل QUAL2K پرداختند. مقایسهٔ کیفیت آب Ramganga و Ganga (قبل و بعد از تلاقی با Ganga) برای فصل جریان نشان داد که Ramganga از نظر پارامترهایی مانند اکسیژن محلول و فلزات سنگین سبب کاهش کیفیت آب رودخانهٔ گانگا نمی‌شود.

بررسی نتایج مطالعات انجام شده نشان می‌دهد مدل QUAL2KW از توانایی مناسبی برای مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب و ارزیابی توان خودپالایی رودخانه برخوردار است. هدف در مقالهٔ حاضر، شبیه‌سازی پارامترهای اصلی کیفیت آب در رودخانهٔ سفیدرود شامل دمای آب، pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد معلق، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن کل و فسفر کل با استفاده از مدل Qual2kw بر اساس داده‌های نمونه‌برداری شده در مردادماه و آبان‌ماه ۱۳۹۸ است. با توجه به اهمیت کیفیت آب در رودخانهٔ سفیدرود به لحاظ استفاده‌های کشاورزی در پایین‌دست سد و همچنین ورود انواع آلاینده‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به این رودخانه طی سال‌های اخیر، اهمیت نمونه‌برداری و پایش کیفی این رودخانه از ضروریات است. مدیریت کیفی رودخانهٔ سفیدرود با توجه به مسائل زیست‌محیطی پیرامون آن بدون پایش کیفی و مدل‌سازی و ارزیابی توان خودپالایی آن، امکان‌پذیر نخواهد بود؛ از این‌رو پژوهش حاضر برای بررسی تغییرات پارامترهای کیفی رودخانهٔ سفیدرود در سال‌های اخیر و انجام مدل‌سازی به‌منظور مدیریت هر چه بهتر این رودخانه برنامه‌ریزی و انجام شد. نوآوری اصلی این پژوهش اندازه‌گیری میدانی در ۱۲ ایستگاه هیدرومتری و پایش دقیق کیفی رودخانه در سال آبی ۹۹-۹۸ است.

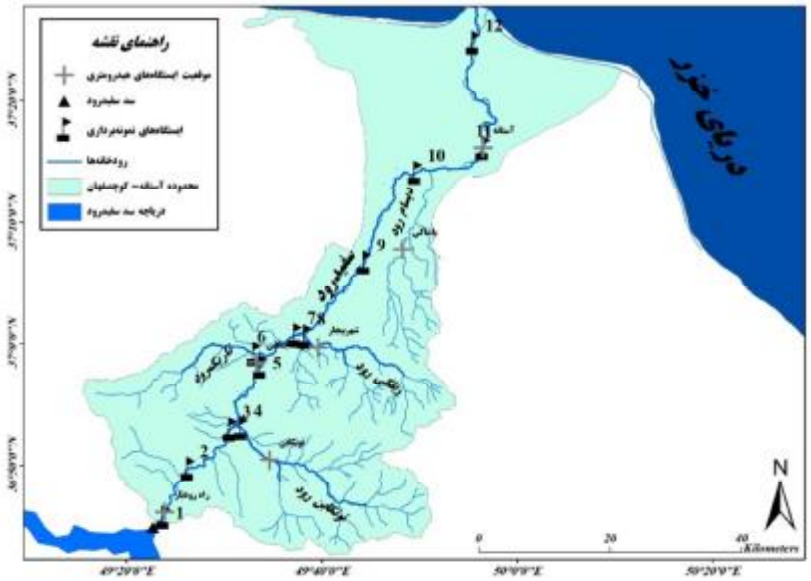
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدودهٔ مورد مطالعه در پژوهش حاضر بخشی از رودخانهٔ سفیدرود که در محدوده مطالعاتی آستانه- کوچصفهان واقع شده است. بازهٔ مورد مطالعه رودخانهٔ سفیدرود شامل طول ۱۱۰ کیلومتری این رودخانه از پایین‌دست سد سفیدرود تا دریای خزر است. ایستگاه‌های نمونه‌برداری شامل ۱۲ ایستگاه که ۹ ایستگاه آن روی شاخهٔ اصلی رودخانهٔ سفیدرود و ۳ ایستگاه دیگر، روی شاخه‌های فرعی ورودی به سفیدرود شامل توتکابن‌رود، تاریک‌رود و زیلکی‌رود واقع شده است. شکل ۱ موقعیت رودخانهٔ سفیدرود و ایستگاه‌های هیدرومتری و نمونه‌برداری را

نشان می‌دهد.

بازه‌بندی رودخانهٔ سفیدرود برای مدل‌سازی با استفاده از مدل Qual2kw، بر اساس ایستگاه‌های نمونه‌برداری به ۷۰ بازه مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تقسیم شده است.



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری و نمونه‌برداری در محدوده آستانه - کوچصفهان

جدول ۱- مشخصات بازه‌های در نظر گرفته شده در رودخانه سفیدرود برای مدل‌سازی در مدل Qual2kw

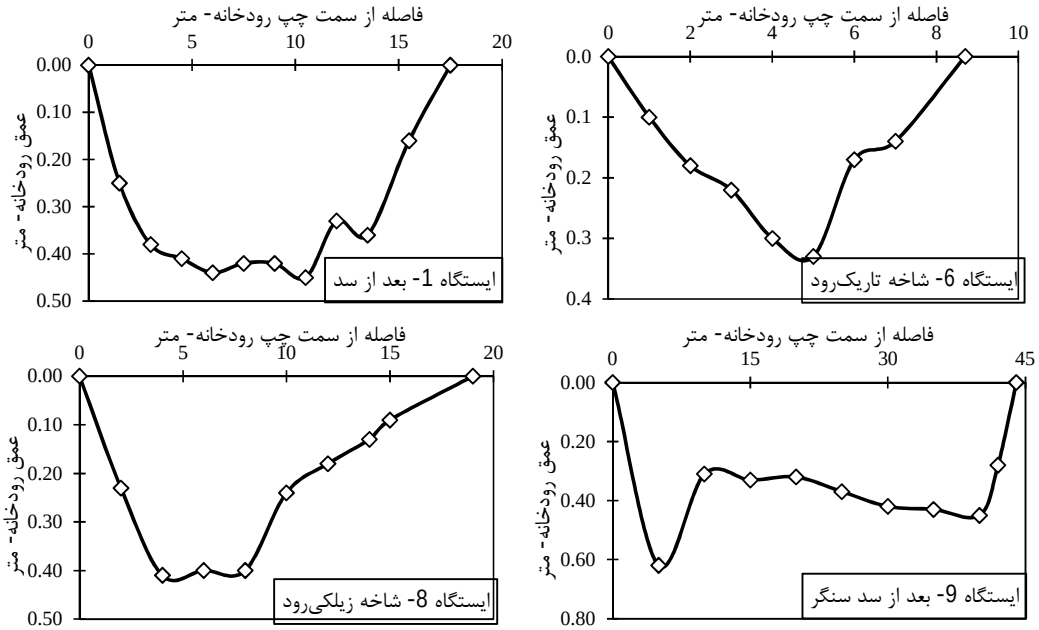
شماره ایستگاه	رودخانه	فاصله از پایین‌دست (کیلومتر)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	شمارهٔ بازه‌ها	طول متوسط بازه (کیلومتر)
۱	سفیدرود	۱۰۹/۶۷	۳۶/۷۷	۴۹/۳۹	۲۰۵	۰	-
۲	سفیدرود	۹۹/۱۸	۳۶/۸۳	۴۹/۴۴	۱۸۰	۵-۰	۱/۷۵
۳	سفیدرود	۸۶/۷۳	۳۶/۸۹	۴۹/۵۱	۱۴۶	۱۴-۶	۱/۳۸
۴	توتکابن	۸۶/۷۱	۳۶/۸۹	۴۹/۵۲	۱۵۲	-	-
۵	سفیدرود	۷۵/۵۱	۳۶/۹۸	۴۹/۵۵	۱۱۸	۲۲-۱۵	۱/۴۰
۶	تاریک‌رود	۷۳/۶۱	۳۶/۹۹	۴۹/۵۶	۱۱۰	-	-
۷	سفیدرود	۶۵/۷۴	۳۷/۰۲	۴۹/۶۳	۹۶	۲۸-۲۳	۱/۶۳
۸	زیلکی‌رود	۶۵/۷۱	۳۷/۰۲	۴۹/۶۴	۹۱	-	-
۹	سفیدرود	۵۰/۲۴	۳۷/۱۲	۴۹/۷۴	۵۳	۳۹-۲۹	۱/۴۱
۱۰	سفیدرود	۳۲/۴۹	۳۷/۲۵	۴۹/۸۱	۹	۵۰-۴۰	۱/۶۱
۱۱	سفیدرود	۱۷/۵۹	۳۷/۲۸	۴۹/۹۳	-۱۰	۵۹-۵۱	۱/۶۶
۱۲	سفیدرود	۰/۰۰	۳۷/۴۲	۴۹/۹۱	-۲۰	۷۰-۶۰	۱/۷۶

مدل هیدرولیکی رودخانه

در مدل Qual2kw برای تهیهٔ مدل هیدرولیکی رودخانه، روش‌های مختلفی از جمله رابطهٔ مانینگ[1]، منحنی نسبی[2] و سرریز[3] وجود دارد. در پژوهش حاضر برای ایجاد مدل هیدرولیکی رودخانه سفیدرود از رابطهٔ مانینگ استفاده شد. بر اساس کتاب هیدرولوژی کاربردی چاو و همکاران (۱۹۸۸) مقدار ضریب زبری مانینگ برای رودخانهٔ سفیدرود متغیر در بازه‌های مختلف و حدود ۰/۰۳۵ تا ۰/۰۵۰ در نظر گرفته شده است. به این منظور مشخصات هندسی رودخانه (مقاطع عرضی و شیب طولی) و مشخصات هیدرولیکی جریان (عمق، عرض، سرعت و دبی) در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری اندازه‌گیری و از داده‌های

1- Manning Formula
2- Rating Curves
3- Weir

ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در محدودهٔ آستانه-کوچصفهان استفاده شد. در شکل ۲ مقاطع عرضی رودخانه سفیدرود در چهار ایستگاه به صورت نمونه ارائه شده است.



شکل ۲- مقاطع عرضی رودخانه سفیدرود در برخی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری (سال آبی ۱۳۹۸-۹۹)

همان‌گونه که در شکل ۲ مشخص است، عرض و عمق رودخانهٔ سفیدرود در مقاطع مختلف متغیر است. بیشترین عرض رودخانهٔ سفیدرود مربوط به ایستگاه ۹ (بعد از سد سنگر) بوده که رودخانه، حدود ۴۵ متر عرض داشته است. مشخصات هیدرولیکی جریان شامل عرض، عمق، سرعت و دبی جریان اندازه‌گیری شده برای ۹ ایستگاه نمونه‌برداری به تفکیک مرداد و آبان ۱۳۹۸ در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- عرض، عمق، سرعت و دبی جریان در ایستگاه‌های نمونه‌برداری از رودخانه سفیدرود

شماره ایستگاه	مرداد ۱۳۹۸				آبان ۱۳۹۸			
	عرض*	عمق*	سرعت*	دبی*	عرض*	عمق*	سرعت*	دبی*
۱	۷۰	۱/۶۱	۰/۷۱	۸۰	۱۷/۵	۰/۳۶	۰/۵۹	۳/۳۳
۳	۳۳	۲/۸۸	۰/۸۷	۸۳	۳۳/۴	۰/۳۵	۰/۴۴	۴/۸۱
۴	۸	۰/۱۵	۰/۸۳	۱/۰۳	۸/۷	۰/۲۱	۰/۶۹	۱/۰۳
۶	۱۳	۰/۸۷	۰/۶۱	۶/۹۶	۱۰/۰	۰/۳۳	۰/۵۱	۱/۵۱
۷	۴۸	۲/۴۱	۰/۷۴	۸۵	۳۴/۵	۰/۴۴	۰/۶۱	۸/۵۰
۸	۳۰	۰/۵۹	۰/۱۹	۳/۴۳	۱۹/۰	۰/۲۶	۰/۱۶	۰/۶۷
۹	۷۰	۰/۶۱	۰/۹۳	۴۰	۴۴/۰	۰/۳۹	۰/۷۸	۱۲/۶۵
۱۰	۴۰	۱/۰۱	۰/۷۴	۳۰	۲۷/۵	۰/۵۶	۰/۶۲	۸/۹۷
۱۱	۳۰	۱/۲۱	۰/۷۷	۲۷/۸۹	۳۴/۰	۰/۴۷	۰/۶۴	۱۴/۱۳

*واحدهای عرض و عمق به متر، سرعت به متر بر ثانیه و دبی به مترمکعب بر ثانیه می‌باشد.

خصوصیات هیدرولیکی جریان، در جدول ۲ نشان می‌دهد که با توجه به دبی رهاشده از سد سفیدرود بر اساس نیازهای پایین‌دست، دبی رودخانهٔ سفیدرود در مردادماه بسیار بیشتر از آبان‌ماه بوده است. علاوه بر دبی، سایر مشخصات اندازه‌گیری شدهٔ جریان شامل عرض، عمق و سرعت جریان نیز در مردادماه بیشتر از آبان‌ماه بوده است.

داده‌های کیفی

در مقالهٔ حاضر از داده‌های اندازه‌گیری شدهٔ پارامترهای کیفی شامل دمای آب، pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن کل و فسفر کل، در دو نوبت نمونه‌برداری شامل مرداد و آبان ۱۳۹۸ در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری استفاده شده است. در جدول ۳ مشخصات آماری داده‌های کیفی مورد استفاده در مقالهٔ حاضر ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳، حداقل و حداکثر مقدار اکسیژن محلول برابر با ۷/۶ و ۹/۶ میلی‌گرم بر لیتر به‌ترتیب در مردادماه و آبان‌ماه ۱۳۹۸ اندازه‌گیری شده است. همچنین حداقل و حداکثر اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی[1] به‌ترتیب برابر با ۹/۰ و ۱۶/۰ میلی‌گرم بر لیتر در مردادماه ۱۳۹۸ اندازه‌گیری شده است.

منابع آلاینده نقطه‌ای ورودی به رودخانهٔ سفیدرود

در پژوهش حاضر شاخه‌های فرعی رودخانهٔ سفیدرود شامل توتکابن، تاریک‌رود و زیلکی‌رود به‌عنوان آلاینده‌های نقطه‌ای ورودی در مدل Qual2kw لحاظ شدند. برای ۳ ایستگاه نمونه‌برداری (ایستگاه‌های ۴، ۶ و ۸) روی هر یک از این شاخه‌ها برای اندازه‌گیری کمیت و کیفیت آن‌ها در نظر گرفته شد. مقادیر میانگین دبی ماهانه در دو ایستگاه هیدرومتری واقع بر توتکابن‌رود و زیلکی‌رود طی سال‌های آبی ۹۶-۱۳۶۰ در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۳ نشان داده شد، دبی در ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در محدودهٔ مطالعاتی آستانه- کوچصفهان، طی سال‌های اخیر کاهش چشمگیری داشته است.

مدل Qual2Kw 6

مدل Qual2Kw 6 مدلی یک بعدی با فرض جریان دائمی[2] است. رودخانه می‌تواند به‌عنوان مجموعه‌ای از بازه‌ها (با طول‌های مساوی یا نامساوی) و شاخه‌های ورودی به‌عنوان منابع نقطه‌ای شبیه‌سازی شود. داده‌های ورودی موردنیاز این مدل شامل مشخصات هندسی مقاطع[3] رودخانه، مشخصات هیدرولیکی جریان، پارامترهای کیفی مورد بررسی و داده‌های هواشناسی است(شارما و همکاران، ۲۰۱۵). واسنجی خودکار مدل Qual2Kw 6 با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل برای داده‌های مردادماه ۱۳۹۸ و صحت‌سنجی مدل برای داده‌های آبان ۱۳۹۸ انجام شده است.

معیارهای آماری مورد استفاده

برای بررسی دقت نتایج شبیه‌سازی پارامترها می‌توان از معیارهای آماری زیادی استفاده کرد. به طور کلی در بررسی دقت نتایج هر مدل، باید ۳ پارامتر مقدار خطا، کم یا بیش برآورد بودن و مقدار همبستگی بررسی شود. بدین منظور برای بررسی دقت نتایج پارامترهای شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل Qual2Kw 6 از سه معیار آماری شامل ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده[4] (NRMSE)، میانگین خطای اریبی[5] (MBE) و ضریب همبستگی[6] (R) به‌ترتیب برای بررسی مقادیر خطای برآورد، کم یا بیش برآورد و همبستگی بر اساس معادلات (۱) تا (۳) استفاده شده است.

$$NRMSE = \left(\left[\sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(C_i^S - C_i^O\right)^2 / N} \right] / \bar{C}^O \right) \times 100 \quad (۱)$$

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \left(C_i^S - C_i^O\right) \quad (۲)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N} \left(C_i^o - \bar{C}^o\right)\left(C_i^s - \bar{C}^s\right)}{\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N} \left(C_i^o - \bar{C}^o\right)^2\right]\left[\sum_{i=1}^{N} \left(C_i^s - \bar{C}^s\right)^2\right]}} \quad (۳)$$

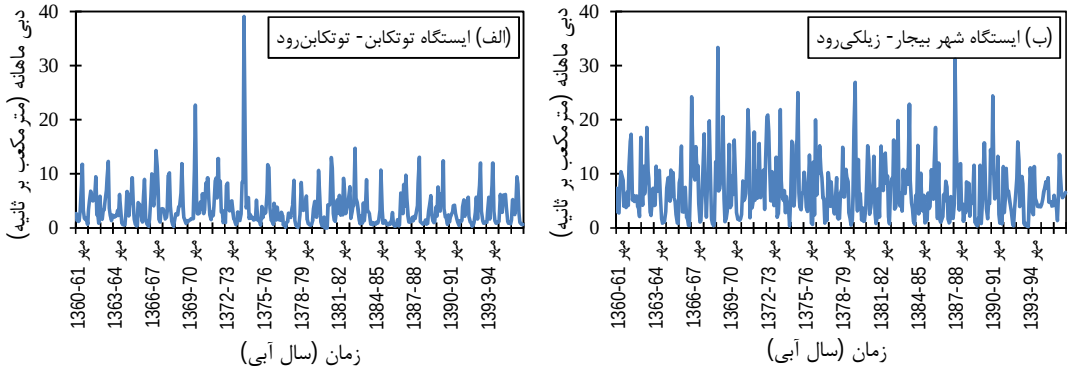
در معادلات (۱) تا (۳)، C_i^o و C_i^s به‌ترتیب غلظت اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پارامتر موردنظر و $\bar{C}^o$ و $\bar{C}^s$ به‌ترتیب میانگین غلظت‌های اندازی‌گیری و شبیه‌سازی شده پارامتر موردنظر در ایستگاه‌های مختلف رودخانه است. مقدار NRMSE مطلوب برای مدل‌سازی کمتر از ۱۰ درصد است و NRMSE به‌ترتیب بین ۱۰ تا ۲۰ و ۲۰ تا ۳۰ درصد وضعیت مناسب و متوسط نتایج مدل شبیه‌ساز و مقادیر بیشتر از ۳۰ درصد عدم دقت کافی مدل در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد (سینگ و همکاران، ۲۰۰۸).

بر اساس معادلهٔ (۲)، مقادیر منفی و مثبت معیار MBE به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ کم‌برآورد و بیش‌برآورد در نتایج مدل است. بهترین مقادیر به دست آمده برای معیارهای MBE و R در صورت برابر بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به‌ترتیب برابر صفر و یک است.

1- Biochemical oxygen Demand (BOD)
2- Steady state flow
3- Hydraulic geometry
4- Normalized Root Mean Squared Error
5- Mean Bias Error
6- Correlation of Coefficient

جدول ۳- مشخصات آماری داده‌های کیفی اندازه‌گیری شده در رودخانه سفیدرود

زمان نمونه‌برداری	آماره	Q (m^3/s)	Tem (^0C)	DO (mg/l)	BOD_5 (mg/l)	pH	EC (dS/m)	TS (mg/l)	TP (mg/l)	TN (mg/l)
مرداد ۱۳۹۸	مینیمم	۱/۰۳	۲۱	۶	۱/۴۵	۷/۹۶	۱/۱۰	۷۷۵	۰/۳۰	۱۱
	ماکزیمم	۸۵	۲۵	۸/۲	۲/۵۰	۸/۴۲	۱/۲۵	۸۷۸	۰/۵۰	۱۶
	میانگین	۳۹/۷۰	۲۳/۵۶	۶/۷۴	۱/۹۴	۸/۲۶	۱/۱۸	۸۲۵	۰/۴۴	۱۳/۵۱
	انحراف معیار	۳۴/۷۶	۱/۱۳	۰/۶۴	۰/۳۲	۰/۱۳	۰/۰۶	۴۴/۵۴	۰/۰۶	۱/۴۸
آبان ۱۳۹۸	مینیمم	۰/۶۷	۱۶	۴/۷	۲/۱۰	۷/۴۰	۱/۲۰	۶۰۴	۰/۰۴	۰/۵۰
	ماکزیمم	۱۴/۱۳	۲۱	۶/۲	۴/۴۰	۸/۰۵	۱/۹۱	۱۰۰۵	۰/۱۱	۳/۵۰
	میانگین	۶/۱۸	۱۹/۱۱	۵/۵۲	۳/۳۱	۷/۸۸	۱/۴۹	۷۸۴/۲۲	۰/۰۸	۱/۹۸
	انحراف معیار	۵/۰۸	۱/۶۲	۰/۴۷	۰/۷۱	۱/۱۰	۰/۲۶	۱۷۱/۱۹	۰/۰۲	۱/۱۰



شکل ۳- دبی ماهانه رودخانه سفیدرود در ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده آستانه- کوچصفهان

نتایج و بحث

از توانایی‌های مدل Qual2kw 6 قابلیت واسنجی خودکار ضرایب مؤثر در مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه با استفاده از الگوریتم ژنتیک است. نتایج واسنجی این ضرایب برای شبیه‌سازی پارامترهای رودخانهٔ سفیدرود در مرداد ۱۳۹۸ در جدول ۴ ارائه شده است.

تعداد زیادی ضریب با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل Qual2kw قابل واسنجی هستند که در جدول ۴ برخی از مهم‌ترین ضرایب واسنجی شده ارائه شده است. پس از واسنجی مدل با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در مردادماه ۱۳۹۸، صحت‌سنجی مدل برای داده‌های آبان‌ماه ۱۳۹۸ انجام شده که نتایج مدل در این دو مرحله در جدول ۵ برای پارامترهای مختلف ارائه شده است.

جدول ۵ نشان‌دهندهٔ این است که نتایج مدل Qual2kw برای ۵ پارامتر شامل دما، pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد و نیتروژن کل در مرحله واسنجی و در مورد ۳ پارامتر اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی و فسفر کل در مرحلهٔ صحت‌سنجی دقت بیشتری دارد.

با توجه به جدول ۵، مقادیر پارامتر NRMSE برای اکثر پارامترها در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد که حاکی از دقت مطلوب مدل Qual2kw برای مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب در رودخانهٔ سفیدرود می‌باشد. با توجه به مقادیر NRMSE در جدول ۵، دقت مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای دما، pH، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد و اکسیژن محلول بیشتر از دقت مدل در شبیه‌سازی پارامترهای اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن کل و فسفر کل می‌باشد. بیشترین و کمترین دقت مدل Qual2kw با میانگین مقادیر NRMSE در دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی برابر با ۳/۳ و ۴۷/۵ درصد به‌ترتیب برای پارامترهای pH و نیتروژن کل است.

بیشترین مقادیر همبستگی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای کل مواد جامد و هدایت الکتریکی به‌ترتیب برابر ۰/۹۷ و ۰/۹۶ در مرحله واسنجی مدل به دست آمده است. در قسمت‌های مختلف شکل ۴ مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده برای پارامترهای کیفیت آب رودخانهٔ سفیدرود در دو نوبت نمونه‌برداری کیفیت آب رودخانهٔ سفیدرود در دو نوبت نمونه‌برداری ارائه شده است.

نکتهٔ قابل توجه در قسمت‌های مختلف شکل ۴ بیشتر بودن اکثر پارامترهای کیفیت آب مانند pH، کل مواد

جامد، نیتروژن کل و فسفر کل در مردادماه با وجود بیشتر بودن دبی در این ماه نسبت به آبان‌ماه است. مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامتر هدایت الکتریکی در آبان‌ماه (قسمت (ج) شکل ۴) نسبت به مردادماه بیشتر بوده است که با توجه به کم‌آب بودن رودخانه در آبان‌ماه نسبت به مردادماه قابل توجیه است. اکسیژن محلول در مرداد ماه به نسبت آبان‌ماه بیشتر بوده است که می‌تواند به علت هوادهی فیزیکی بیشتر جریان در اثر زیادتر بودن سرعت جریان در مردادماه نسبت به آبان‌ماه باشد.

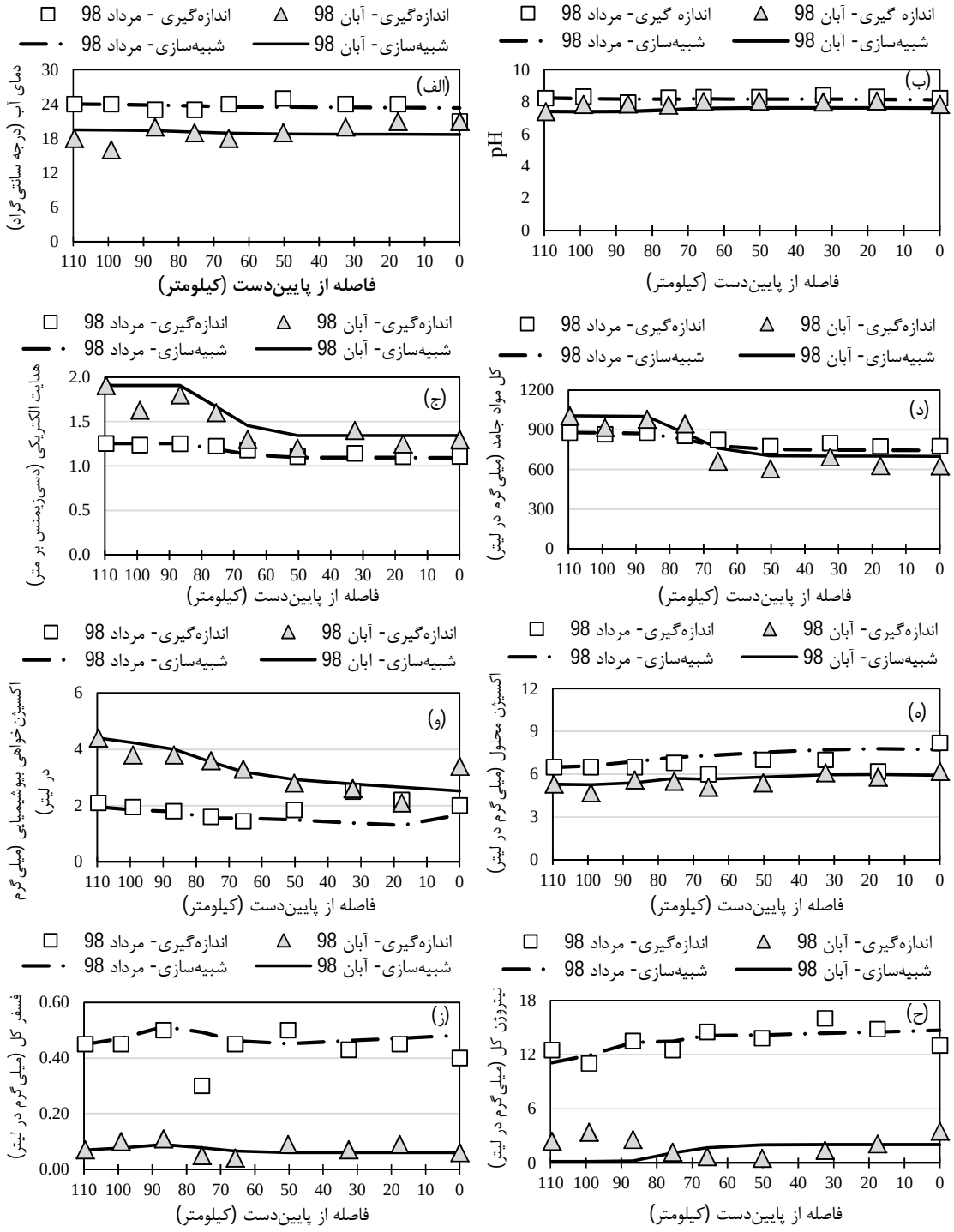
شکل ۴ نشان می‌دهد که مدل Qual2kw به خوبی توانسته است مقادیر پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود را در مرداد و آبان ۱۳۹۸ شبیه‌سازی کند. تغییرات پارامترهای کیفی در طول رودخانهٔ سفیدرود حاکی از بهبود کیفیت آب از محل خروجی سد سفیدرود تا محل ورودی به دریای خزر است. به طوری‌که در قسمت (ه) شکل ۴ مشخص است مقدار اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود از بالادست به پایین‌دست افزایش می‌یابد که می‌تواند حاکی از توان خودپالایی مناسب در رودخانهٔ سفیدرود باشد.

جدول ۴- نتایج ضرایب واسنجی شده با استفاده از الگوریتم ژنتیک در مدل Qual2kw 6

دسته‌بندی ضریب	ضریب	واحد	حداقل	حداکثر	مقدار واسنجی‌شده
مواد جامد معلق	سرعت رسوب	متر بر روز	۰	۲	۱/۰۱
ضرایب رابطه هوادهی $K_a = A \times Velocity^{B} \times Depth^{C}$	A	بی‌بعد	۳	۶	۳/۹۸
	B	بی‌بعد	۰/۵	۱	۰/۹۷
	C	بی‌بعد	-۱/۸۵	-۱/۵	-۱/۶۹
اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی	میزان هیدرولیز	1/d	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۱۸
	میزان اکسیداسیون	1/d	۰	۵	۰/۷۷
نیتروژن آلی	میزان هیدرولیز	1/d	۰/۰۵	۰/۳	۰/۱۴
آمونیوم	نیتریفیکاسیون	1/d	۰/۰۵	۳	۲/۳۹
نیترات	دی‌نیتریفیکاسیون	1/d	۰	۲	۱/۸۲
فسفر آلی	میزان هیدرولیز	1/d	۰/۰۵	۰/۳	۰/۲۲
	سرعت رسوب	m/d	۰/۰۵	۲	۰/۱۰
فسفر غیرآلی	میزان کاهش اکسیژن توسط فسفر رسوبی	میلی‌گرم اکسیژن در لیتر	۰	۲	۱/۴۵
	سرعت رسوب	m/d	۰	۲	۱/۶۹

جدول ۵- معیارهای آماری در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل Qual2kw برای پارامترهای مختلف

مرحله مدل‌سازی	آماره	پارامترهای مدل‌سازی شده							
		$Tem(^0C)$	pH	$EC(dS/m)$	TS(mg/l)	DO(mg/l)	BOD_5(mg/l)	TN(mg/l)	TP(mg/l)
واسنجی (مرداد ۱۳۹۸)	NRMSE	۴/۵	۱/۸	۲/۲	۳/۶	۱۱/۷	۲۶/۲	۷/۶	۱۶/۹
	MBE	۰/۰۶	-۰/۰۸	-۰/۰۲	-۲۲/۸۰	۰/۵۱	-۰/۳۲	۰/۰۱	۰/۰۴
	R	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۳۹	۰/۶۶	۰/۶۹	۰/۳۷
صحت‌سنجی (آبان ۱۳۹۸)	NRMSE	۹/۲	۴/۷	۸/۷	۸/۸	۶/۱	۱۱/۸	۸۷/۴	۲۸/۸
	MBE	-۰/۰۷	-۰/۳۴	۰/۰۹	۴۳/۵۲	۰/۱۵	۰/۰۵	-۰/۷۱	-۰/۰۱
	R	۰/۶۱	۰/۳۰	۰/۹۳	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۸۳	۰/۵۴	۰/۴۲



شکل ۴- مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود

نتیجه‌گیری

هدف از نگارش مقالهٔ حاضر ارزیابی توانایی مدل Qual2kw در مدل‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود است، بدین منظور تغییرات مقادیر پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود در بازه‌ای به طول ۱۱۰ کیلومتر از پایین‌دست سد سفیدرود تا ورودی به دریای خزر در دو فصل تابستان (مرداد) و پاییز (آبان) ۱۳۹۸ در ۱۲ ایستگاه مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. بیشترین دقت شبیه‌سازی مدل Qual2kw در مقالهٔ حاضر برای پارامتر pH به دست آمد که با نتایج حسینی و حسینی (۱۳۹۶)

مطابقت دارد. نتایج مقالهٔ حاضر حاکی از دقت مناسب مدل Qual2kw برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب در رودخانهٔ سفیدرود دارد که مطابق با نتایج آریایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۷) است. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۹۸) عنوان کردند که بیشترین حساسیت تغییرات اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود به‌ترتیب نسبت به ضریب هوادهی و عمق جریان است که بیشتر بودن اکسیژن محلول در مردادماه با وجود کیفیت نامطلوب‌تر اغلب پارامترهای کیفیت آب در مقاله حاضر می‌تواند مؤید این مطلب باشد که خصوصیات هیدرولیکی جریان (دبی، عرض، عمق و سرعت جریان) بیشتر از تغییرات کیفیت سایر پارامترها بر مقدار اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود اثرگذار است.

منابع

۱. آریایی‌نژاد ر.، سرائی تبریزی م.، و بابازاده ح.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ها با استفاده از مدل Qual2Kw (مطالعه موردی: رودخانه شاهرود). فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط‌زیست. ۲۱ (۷): ۱-۱۳.

۲. باباخانی ز.، سرائی تبریزی م.، و بابازاده ح.، ۱۳۹۸. تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه دیواندره با استفاده از مدل QUAL2Kw. مجله اکوهیدرولوژی. ۶(۳): ۶۸۴-۶۷۳.

۳. محمدی قلعه‌نی م.، و ابراهیمی ک.، ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت مدل Qual2kw در مدل‌سازی پارامترهای کیفی سفیدرود. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۵(۱۳): ۱۲۴۵-۱۲۳۳.

۴. مفتاح هلقی م.، م.، ۱۳۹۱. پهنه‌بندی کیفی آب با استفاده از شاخص‌های متفاوت کیفی (مطالعه موردی: رودخانه اترک). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۲(۱۸): ۲۱۱-۲۲۰.

5. Allam A. Tawfik A. Yoshimura C. and Fleifle A. 2016. Simulation-based optimization framework for reuse of agricultural drainage water in irrigation. Journal of Environmental Management. 172: 82-96.
6. Baldwin R. Cave M. and Lodge M. 2011. Understanding Regulation: Theory, Strategy and Practice. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press.
7. Bui H. H Ha Ngoc H. Nguyen T. N. D. Nguyen A. T. Pham T. T. H. Jaya K. and Tien V. N. 2019. Integration of SWAT and QUAL2K for water quality modeling in a data scarce basin of Cau River basin in Vietnam, Ecohydrology and Hydrobiology. 19: 210-223.
8. Chow V. T. Maidment D. R. and Mays L. W. 1988. Applied Hydrology. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. 565 p.
9. Gordon N. D. McMahon T. A. and Finlayson B. L. 2004. Stream hydrology: an introduction for ecologists. John Wiley and Sons. 423 p.
10. Gurjar S. and Tare V. 2019. Spatial-temporal assessment of water quality and assimilative capacity of river Ramganga, a tributary of Ganga using multivariate analysis and QUEL2K. Journal of Cleaner Production. 222: 550-564.
11. Hoseini Y. and Hoseini P. 2018. Assimilation Capacity Changes of Gharehsou River, East of Ardabil Province, Iran using Qual2kw Model. Journal of Applied Sciences and Environmental Management. 22(7): 1077-1081.
12. Hu J. Sun L. Li C. H. Wang X. Jia X.L. and Cai Y. P. 2018. Water Quality Risk Assessment for the Laoguanhe River of China Using a Stochastic Simulation Method. Journal of Environmental Informatics. 31(2): 123-136.
13. Khan M. Y. A. Gani K. M. and Chakrapani G. J. 2017. Spatial and temporal variations of physicochemical and heavy metal pollution in Ramganga Riverda tributary of River Ganges, India. Environmental Earth Sciences76, 1e13.
14. Kostka G. 2016. command without control: the case of china's environmental target system, Regulation and Governance, Wiley. 10(1): 58-74.
15. Lao Dong 2019. Bình Dương: "Cát tặc" chuyển vùng xuống sông Thị Tính, 4/7/2019, https://laodong.vn/kinhte/binh-duong-cat-tac-chuyen-vung-xuong-song-thi-tinh-742294.ldo.
16. Mehrasbi M. R. and Farahmand Kia Z. 2015. Water quality modeling and evaluation of nutrient control strategies using qual2k in the small sivers. Journal of Human Environment and Health Promotion. 1(1): 1-11.
17. Nguyen T. Nemery J. Gratiot N. Garnier J. Strady E. Tran V. Nguyen A. Nguyen T. Golliet C. and Aime J. 2019a. Phosphorus adsorption/desorption processes in the tropical Saigon River estuary (SouthernVietnam) impacted by a megacity. Estuarine, Coastal and Shelf Science. 227:106321.

18. Nguyen T. Nemery J. Gratiot N. Strady E. Tran V. Nguyen T. Aime J. and Peyne A. 2019b. Nutrient dynamics and eutrophication assessment in the tropical river system of Saigon – Dongnai (southern Vietnam), Science of the Total Environment. 653: 370-383.
19. Pathak D. Whitehead P. G. Futter M. N. and Sinha R. 2018. Water quality assessment and catchment-scale nutrient flux modeling in the Ramganga River Basin in north India: an application of INCA model. Scince of the Total Environment. 632: 201-215.
20. Sarda P. and Sadgir P. 2015. Water Quality Modeling and Management of Surface Water using Soft Tool. International Journal of Science, Engineering and Technology Research. 9(4): 2988-2992.
21. Sharma D. Kansal A. and Pelletier G. 2015. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. Applied Water Science. 1-25.
22. Singh A. K. Tripathy R. and Chopra UK. 2008. Evaluation of CERES Wheat and Crop System models for water-Nitrogen interactions in wheat crop. Agricultural Water Management. 95: 776-786.
23. Taherisoudejani H. Racchetti E. Celico F. and Bartoli M. 2018. Application of QUAL2Kw to the Oglio River (Northern Italy) to assess diffuse N pollution via river-groundwater interaction. Journal of Limnology. 77(3): 1-25.