ارزیابی توان خودپالایی رودخانه با استفاده از مدل QUAL2KW (مطالعه موردی: رودخانه قزل اوزن)

سمانه هاشملو[۱]
مهدی سرائی تبریزی[۲*]
علی صارمی[۳]
حسین بابازاده[۴]

۱.انشجوی کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۲. ستادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۳. ستادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.
۴. ستاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

***مسئول مکاتبات:**
m.sarai@srbiau.ac.ir

کد مقاله: ۱۴۰۱۰۲۱۰۰۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸
این مقاله پژوهشی و برگرفته از کارشناسی ارشد است.

چکیده

مطالعه کمی و کیفی رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین عواملی است که بایستی بررسی شود چراکه رودخانه‌ها در دسترس‌ترین منبع آب موردنیاز جهت مصارف بخش‌های مختلف می‌باشند. با توجه به ورود انواع آلاینده‌ها، نگرانی‌های بسیاری در موردحفاظت کیفی رودخانه‌ها وجود دارد. مدل‌سازی و ارزیابی عوامل مؤثر روی تغییرات پارامترهای کیفیت آب از اولین گام‌های مدیریت کیفی آب رودخانه‌ها می‌باشد. کیفیت آب رودخانه قزل‌اوزن به‌عنوان منبع اصلی تأمین آب، با توجه به مصرف کشاورزی فراوانی که دارد، از اهمیت به خصوصی برخوردار می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر ارزیابی توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن و شبیه‌سازی کیفی آب رودخانه با استفاده از مدل Qual2kw است. در این پژوهش با استفاده از مدل یک‌بعدی کیفی Qual2kw وضعیت کیفی رودخانه قزل‌اوزن به طول ۲۰۸ کیلومتر در طی ۴ دوره اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ واسنجی و تیر و آذر ۱۳۹۷ صحت سنجی شد. در این راستا ۹ پارامتر اصلی کمیت و کیفیت آب شامل دبی، سرعت جریان، دمای آب، هدایت الکتریکی، کل مواد جامد، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، نیتروژن و فسفر کل در ۸ ایستگاه مدنظر قرار گرفت. به‌منظور تعیین خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله کالیبراسیون و صحت سنجی مدل از شاخص‌های آماری به ترتیب خطای مطلق میانگین (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) میانگین خطای اریبی (MBE) استفاده شد. هم‌چنین میزان توان خود پالایی رودخانه برای پارامترهای کیفی خاص DO،BOD،TP و TN محاسبه گردید. مدل Qual2kw نشان داد که این مدل دقت مناسبی در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه کوهستانی قزل‌اوزن دارد. نتایج بررسی مقادیر دما نشان داد که مقدار دما در تیرماه در اغلب ایستگاه‌های مطالعاتی افزایش داشته و به دلیل کاهش مقدار دبی و افزایش دما میزان BOD و TSS نیز افزایش چشمگیری داشته است. نتایج بررسی مقادیر پارامترهای کیفی نشان داد بیشترین توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن برای پارامترهای اکسیژن محلول (DO) ۹۶%، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) ۹۱%، فسفر کل (TP) ۸۰ درصد و نیتروژن کل (TN) ۶۶ درصد اتفاق افتاد. همچنین بهترین شبیه‌سازی مربوط به پارامتر pH و فسفر کل و بدترین شبیه‌سازی پارامترهای EC و TSS با میانگین مقادیر RMSE و MAE و MBE به دست آمد. ارزیابی نتایج نشان داد که رودخانه قزل‌اوزن توانایی خود پالایی را در لحظه ورود شاخه فرعی دارد.

واژگان کلیدی: رودخانه قزل‌اوزن، کیفیت آب، خود پالایی، مدل QUAL2KW.

مقدمه

توسعه روزافزون فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی و افزایش قابل‌توجه حجم فاضلاب‌های شهری موجب آلودگی منابع آب، خصوصاً رودخانه‌ها شده است. میزان بارگذاری قابل‌تحمل برای رودخانه‌های مختلف، برحسب عوامل زمانی و مکانی و همچنین نوع و شدت بار مواد زائد، متفاوت

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

است. با توجه به تنوع و تعدد منابع آلاینده و همچنین متغیر بودن توان خود پالایی رودخانه‌ها، اعمال استاندارد تخلیه پساب، به‌تنهایی کافی نیست و علاوه بر آن متناسب کردن میزان بارگذاری مواد زائد با توان خود پالایی یک رودخانه بر اساس وضعیت اقلیمی هیدرولوژیکی، هندسی و همچنین شرایط اقتصادی، اجتماعی، سیاسی بر اساس استانداردهای کیفیت آب و کاربری آن، امری ضروری است. (مقیمی نژاد و همکاران ۱۳۹۴). بر این اساس پژوهش‌های متعددی به‌منظور خود پالایی و شبیه‌سازی کیفی آب رودخانه‌ها انجام‌شده است که ازجمله آن‌ها می‌توان به مطالعات زیر اشاره کرد.

خنک و همکاران (۱۴۰۰) کیفیت آب رودخانه سفیدرود با مدل Qual2kw را مدل‌سازی کردند. در این مطالعه پارامترهای مهم کیفی آب در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری به طول ۱۱۰ کیلومتر در دو ماه مرداد و آبان موردبررسی قرار گرفت. نتایج پژوهش مذکور نشان داد بیشترین و کمترین دقت مدل با ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) برابر با ۳/۳ و ۴۷٪ برای پارامترهای pH و نیتروژن کل هست و این مدل توانایی مناسبی برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی دارد. شاهی نژاد و همکاران (۱۳۹۹) به ارزیابی مدل QUAL2KW در شبیه‌سازی کیفی رودخانه خرم‌آباد پرداختند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که پارامترهای کیفی COD، NO3 و CBODf با تخلیه پساب منابع آلاینده صنعتی، شهری و کشاورزی به رودخانه و پیوستن رودخانه فرعی به رودخانه اصلی، افزایش پیدا می‌کنند. درنهایت نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر دقت مناسب مدل Qual2kw در شبیه‌سازی پارامترهای فوق در رودخانه خرم‌آباد بود. باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) ظرفیت خود پالایی رودخانه دیواندره با استفاده از مدل Qual2kw بررسی کردند. به این منظور پارامترهای DO، CBOD، COD، pH، EC، دما شبیه‌سازی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آن‌ها نشان داد به دلیل افزایش سکونتگاه‌های انسانی، تأثیر فاضلاب‌ها، رواناب‌های کشاورزی و همچنین ورود رودخانه‌های فرعی چم زرد و یول‌گشتی، وضعیت زیست‌محیطی رودخانه دیواندره در بازه‌های انتهایی آن نگران‌کننده است و اقدامات کنترلی را ایجاب می‌کند. از میان دو پارامتر کیفی زوال‌پذیر بررسی‌شده، خود پالایی BOD به میزان ۷۵ درصد بیشتر از COD است. از دیگر یافته‌های پژوهش یادشده می‌توان به این نکته اشاره کرد که دقیق‌ترین شبیه‌سازی مربوط به pH و کمترین دقت شبیه‌سازی مختص به EC است. در پژوهشی قلعه نی و همکاران (۱۳۹۸) حساسیت مدل Qual2kw را با توجه به تأثیرپذیری اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود موردبررسی قراردادند. ایشان در پژوهش مذکور از مدل Qual2kw برای شبیه‌سازی برخی از پارامترهای کیفیت آب رودخانه موردنظر استفاده و با ارزیابی شاخص‌های خطا کمترین مقدار مجذور میانگین مربعات خطا را برای پارامتر pH و بیشترین آن را برای فسفر کل به دست آوردند و نتایج آنالیز حساسیت نشان داد اکسیژن محلول بیشترین حساسیت را به سه ضریب هوادهی، پخش طولی و زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی دارد (قلعه نی و ابراهیمی، ۱۳۹۸). همچنینAntunes و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر تخلیه پساب فاضلاب را با استفاده از نرم‌افزار Qual2kw در مخزن پراکانا پرتغال پیش‌بینی کردند. برای این منظور پارامترهای BOD،DO، TSS، pH و دما و پارامترهای بیولوژیکی را در سه ماه ژانویه (بارانی)، مارس (شرایط متوسط) و ژوئن (خشک) جمع‌آوری کردند. نتایج این پژوهشگران نشان داد که کیفیت آب برای اهداف متعدد قابل‌قبول است اما به دلیل مقادیر بالای BOD برای مصرف انسان قابل‌قبول نیست. به‌طور مشابهLusiana و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی کیفیت آب رودخانه برانتاس اندونزی با استفاده از مدل Qual2kw ارزیابی و میزان آلودگی آن را با استفاده از شاخص آلاینده و ظرفیت بار آلودگی تعیین کردند. نتایج نشان داد که ۱۰ مورد از ۱۲ منطقه نمونه‌برداری میزان آلودگی پایینی را ایجاد کردند، درحالی‌که سایر مناطق دارای سطح متوسط آلودگی بودند. همچنین آلاینده‌ترین پارامترها در رودخانه برانتاس BOD، نیترات، آمونیاک و فسفات بود. رئیسی و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل Qual2kw به ارزیابی و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی در حوضه مارون و جراحی پرداختند. با بررسی پارامترهای کیفی آب و آلاینده‌ها در ایستگاه‌های پایش، مشخص شد که رودخانه ازنظر آلودگی اکسیژن بیوشیمیایی (BOD) به دلیل تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی و همچنین هدایت الکتریکی (EC) به دلیل زهکشی زمین‌های کشاورزی در وضعیت بحرانی قرار دارد. بر اساس آمار محاسبه‌شده در مرحله اعتبارسنجی، نویسندگان به این نتیجه رسیدند که مدل کیفیت آب Qual2kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی و داده‌های آلودگی منطقه موردمطالعه قابل‌اعتماد است. در پژوهش دیگری رفیعی و همکاران (۲۰۲۲) شاخص‌های کیفی آب و ظرفیت خود پالایی رودخانه‌های بالیقلی چای و قره‌سو با استفاده از مدل Qual2kw ارزیابی کردند.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

نتایج این پژوهشگران نشان داد که تفاوت قابل‌توجهی بین سطوح شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده برای هر دو رودخانه است. بیشتر بخش‌های رودخانه دارای ظرفیت خود پالایی پایینی بود. مقادیر TMDL برای DO، BOD و NO3 در طول دوره پرآب بالاتر و کل بخش‌های هر دو رودخانه مقدار بالای PO4 را نشان داد.

Torres و همکاران (۲۰۲۲) با استفاده از مدل Qual2kw ظرفیت رودخانه سینو کلمبیا در جذب تخلیه فاضلاب ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که مدل به‌طور دقیق شرایط واقعی مقطع رودخانه موردمطالعه را برای تمامی پارامترهای ارزیابی‌شده نشان می‌دهد غلظت‌های بالاتر پارامترهای کیفیت آب عمدتاً در فصل خشک یافت می‌شود زیرا سرعت جریان و دبی کم رودخانه باعث کاهش اختلاط و رقیق‌سازی آلاینده‌ها می‌شود. جلال زاده و همکاران (۲۰۲۰) کیفیت‌بخشی از رودخانه زرینه‌رود به طول ۵۷/۵ کیلومتر از محل خروجی سد تنظیمی نوروزلو تا محل تخلیه به دریاچه ارومیه را با مدل Qual2kw بررسی کردند. نتایج پژوهش حاکی از آن بود که به دلیل بالا بودن ظرفیت خود پالایی رودخانه میزان اکسیژن محلول در حد مناسبی بوده و میزان BOD نیز باوجود افزایش ناگهانی به حد قابل قبولی رسیده بود. ازنظر انطباق داده‌های مشاهداتی با نمودار خروجی مدل به‌غیراز دبی جریان در سایر پارامترها انطباق مناسبی وجود داشت که عدم انطباق داده‌های مشاهداتی دبی جریان با نمودار شبیه‌سازی می‌تواند به دلیل برداشت‌های غیرمجاز از رودخانه برای مصارف کشاورزی باشد. قربانی و همکاران (۲۰۲۰) کیفیت آب رودخانه دز را ازنظر دما و پارامتر BOD با استفاده از مدلQual2kw شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که پارامتر BOD در ۴۰ کیلومتری سد دز به دلیل ورود فاضلاب کشاورزی به شرایط بحرانی نزدیک است. بررسی شاخص‌های آماری RMSE حاکی از دقت خوب و قابل‌قبول مدل و سازگاری خوب بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی بود.

با توجه به بررسی منابع انجام‌شده و مطالعات پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت که اغلب این مطالعات در حوضه‌های کوچک‌مقیاس صورت گرفته بنابراین در این پژوهش سعی شده است که از این ابزار در یک حوضه بزرگ‌مقیاس کوهستانی استفاده شود؛ بنابراین نوآوری اصلی این پژوهش تدوین مدل واسنجی شده Qual2kw در محدوده مطالعاتی قزل‌اوزن می‌باشد. هدف از این پژوهش ارزیابی توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن و بررسی کیفیت پارامترهای کیفی این رودخانه می‌باشد. لازم به ذکر است که تاکنون در این بازه از رودخانه طی سال‌های اخیر پژوهش جامعی در ارتباط با توان خود پالایی با مدل کیفی انجام‌نشده است.

مواد و روش‌ها

رودخانه قزل‌اوزن مهم‌ترین سرشاخه سفیدرود هست این رودخانه با ۶۶۰ کیلومتر طول، یکی از طولانی‌ترین رودخانه‌های ایران است که از کوه‌های چهل چشمه دیواندره کردستان سرچشمه گرفته و پس از گذر از استان‌های مختلف و پس از عبور از ارتفاعات قافلانکوه وارد منطقه خلخال می‌شود. سپس بعد از دریافت رودخانه‌هایی چون آریاچای، هیروچایی، شاهرود وارد استان زنجان می‌شود. این رودخانه در مسیر خود اکوسیستم پراهمیتی به وجود آورده و درنهایت به دریای خزر می‌ریزد. مساحت این رودخانه ۶۴ هزار کیلومترمربع است. حوضه آبریز رودخانه قزل‌اوزن بین مختصات جغرافیایی حدود ۴۸ درجه تا ۴۸۵۵ طول شرقی و ۳۷۰۵ تا ۳۷۵۵ عرض شمالی واقع‌شده است (موسوی و همکاران، ۱۳۹۸). محدوده موردمطالعه در پژوهش حاضر بخشی از رودخانه قزل‌اوزن که در محدوده طارم خلخال منجیل در بازه‌ای به طول ۲۰۸ کیلومتر واقع‌شده است در این پژوهش بازه بندی رودخانه موردنظر در محیط Google Earth انجام شد و نقشه موردمطالعه در محیط نرم‌افزار ARC GIS ترسیم گردیده است. اطلاعات جغرافیایی هر یک از بازه‌ها استخراج و وارد مدل گردید. ایستگاه‌های موردنظر در این پژوهش عبارت‌اند از رودخانه قزل‌اوزن به سمت روستای ممان به‌عنوان سرآب (Upstream)، رودخانه قزل‌اوزن قبل از سد استور، رودخانه فیروزآباد ـ آریا چای به‌عنوان شاخه فرعی، رودخانه قزل‌اوزن بعد از روستای مزرعه، رودخانه قزل‌اوزن در محل روستای نمهیل، رودخانه قزل‌اوزن نرسیده به روستای پاوه رود،

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

رودخانه قزل‌اوزن در ۵ کیلومتری شهر آب‌بر و رودخانه قزل‌اوزن در شهر گیلوان به‌عنوان پایاب (Dowanstream). شکل ۱ موقعیت رودخانه قزل‌اوزن و ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات ایستگاه‌های موردنظر نیز در جدول شماره ۱ است.

در پژوهش حاضر داده‌های کمی و کیفی آب مانند دبی، سرعت جریان، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل، فسفر کل، کل جامدات معلق، دما و pH رودخانه قزل‌اوزن در ۸ ایستگاه مطالعاتی طی ۴ دوره نمونه‌برداری اسفند ۱۳۹۶، تیر، مهر و آذر سال ۱۳۹۷ از سازمان حفاظت محیط‌زیست اخذ گردید. با توجه به تأثیرپذیری زیاد کیفیت رودخانه از دبی آن، تقسیم‌بندی داده‌ها برای دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل بر اساس تغییرات دبی رودخانه انجام‌گرفته است. به‌طوری‌که سعی شده است برای بهتر واسنجی شدن مدل تمام محدوده‌های تغییرات دبی در ماه‌های موردبررسی در نظر گرفته شود تا مدل بتواند شبیه‌سازی دقیقی از شرایط تغییرات دبی در رودخانه داشته باشد. بر همین اساس ماه‌های اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ برای مرحله واسنجی و دو ماه تیر و آذر ۱۳۹۷ به‌منظور صحت‌سنجی مدل مورداستفاده قرار گرفتند. مشخصات آماری پارامترهای کیفی اندازه‌گیری در چهار دوره نمونه‌برداری در جدول (۲) ارائه‌شده است.

مدل نرم‌افزار QUAL2KW که جدیدترین نرم‌افزار از گروه نرم‌افزارهای Qual می‌باشد جهت شبیه‌سازی کیفی و ارزیابی خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن استفاده گردیده است. برای واسنجی مدل Qual2kw از روش کالیبراسیون خودکار با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل استفاده شد. نرم‌افزار Qual2kw در سال ۲۰۰۰ توسط آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا (EPA) ارائه‌شده و قابلیت انجام تجزیه‌وتحلیل عدم قطعیت را دارا است. این نرم‌افزار می‌تواند معادلات مربوط به رودخانه را در شرایط دائمی و شبه دینامیکی حل کند (خوب و همکاران ۱۳۹۶). سیستم مدل Qual2kw یک‌بعدی و با فرض جریان پایدار می‌باشد. رودخانه می‌تواند به‌عنوان مجموعه‌ای از بازه‌ها و شاخه‌های ورودی به‌عنوان منابع نقطه‌ای شبیه‌سازی شود. داده‌های ورودی موردنیاز این مدل شامل جریان و غلظت برای دبی بالادست و برداشت‌ها، طول بخش‌های هر بازه، ارتفاع‌ها، ابعاد هیدرولیکی و داده‌های هواشناسی است. (Chapra and Canale,2006).

برای ارزیابی میزان قدرت خود پالایی رودخانه برای یک پارامتر کیفی خاص، بار ورودی کل (از ابتدای رودخانه تا نقطه کنترل) و همچنین بار خروجی کل (در محل نقطه کنترل) محاسبه گردیده و تفاضل آن‌ها که به‌صورت درصد بیان می‌گردد، مبین قدرت رودخانه، در حذف آلاینده موردنظر یا همان توان خود پالایی رودخانه می‌باشد. میزان بار ورودی آلاینده از حاصل‌ضرب دبی در غلظت آلاینده به دست می‌آید. در محاسبه مقدار بار آلاینده ورودی باید آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای نیز در نظر گرفته شوند.

جدول ۱: مشخصات ایستگاه‌های نمونه‌برداری رودخانه قزل‌اوزن (۱۳۹۷-۱۳۹۶).

نام ایستگاه	موقعیت محل	ارتفاع (m)	فاصله از پایین‌دست (Km)	طول (m)	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
سراب	رودخانه قزل‌اوزن به سمت روستای ممان روی پل	۱۰۲۱	۲۲۹	۳۲۳۳/۶۶	۳۷ ۲۶ ۴۵	۴۷ ۵۲ ۲۸
S2	رودخانه قزل‌اوزن قبل از سد استور در محل ایستگاه هیدرومتری	۹۹۲	۱۴۱	۲۱۲۲/۳۱	۳۷ ۳۰ ۰۸	۴۸ ۱ ۷۴
منبع نقطه‌ای (S3)	رودخانه آریاچای جنب پل تاریخی فیروزآباد	۱۱۵۲	۱۳۸	۲۳۳۷۶	۳۷ ۳۵ ۴۷	۴۸ ۱۳ ۴۳
S4	بعد از روستای مزرعه جنب پل فلزی قزل‌اوزن (کارگاه راه‌سازی)	۸۳۴	۱۱۸	۱۰۸۳۶	۳۷ ۲۶ ۲۲	۴۸ ۱۶ ۹۷
S5	رودخانه قزل‌اوزن در محل روستای نمهیل	۶۷۵	۸۶/۶	۷۱۱۱	۳۷ ۱۵ ۷۵	۴۸ ۲۴ ۷۹
S6	رودخانه قزل‌اوزن نرسیده به روستای پاوه رود	۵۴۹	۴۸/۴	۷۰۰۱	۳۷ ۲ ۳۳	۴۸ ۴۲ ۱۱
S7	۵ رودخانه قزل‌اوزن کیلومتر شهر آب بر	۳۵۷	۲۱/۷۸	۱۰۰۱۲	۳۶ ۵۳ ۱۶	۴۸ ۵۵ ۱۶

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

پایاب	رودخانه قزل‌اوزن شهر گیلوان روی پل	۲۹۰	۰	۲۵۸۶۶/۷	۳۶ ۱۱ ۳۳	۴۹ ۲۹

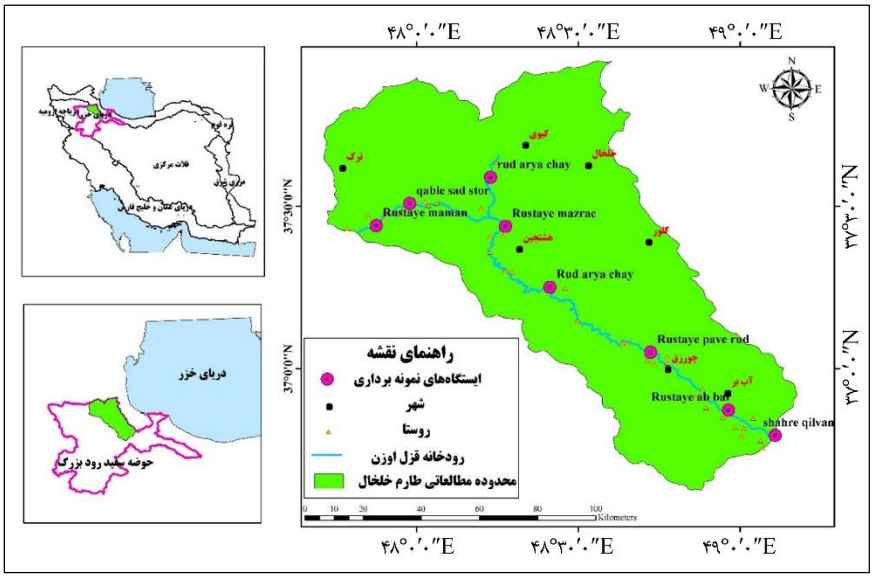
یک مقایسه ساده آماری درکمی کردن دقت مدل، می‌تواند مکمل مقایسه‌های غیر کمی پروفیل‌های اندازه‌گیری و محاسبه‌شده کیفیت آب باشد. به‌منظور تعیین خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در مرحله کالیبراسیون و صحت سنجی مدل از شاخص‌های آماری به ترتیب خطای مطلق میانگین (MAE: Mean Absolute Error)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE: Root Mean Squared Error)، میانگین خطای اریبی (MBE: Mean Bias Error) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها در روابط ۴،۳ و ۵ ارائه‌شده است؛ که در آن Ci مقدار محاسبه‌شده به‌وسیله مدل، Mi مقدار اندازه‌گیری شده و n تعداد کل مشاهدات می‌باشند. در پارامترهای شبیه‌سازی‌شده هر چه میزان RMSE کمتر و متوسط خطای مطلق به صفر نزدیک‌تر باشد، کارکرد مدل از اطمینان بالاتری برخوردار خواهد بود...بر اساس معادله ۵ مقادیر منفی و مثبت معیار MBE به ترتیب نشان‌دهنده کم برآورد و بیش برآورد در نتایج مدل است. بهترین مقادیر به‌دست‌آمده برای معیار MBE در صورت برابر بودن مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری به ترتیب برابر با صفر و یک است.

رابطه ۳:
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|C_i - M_i|}{n}$$

رابطه ۴:
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - M_i)^2}{n}}$$

رابطه ۵:
$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i - M_i}{n}$$

رابطه ۶:
$$R^2 = \frac{[\sum(P_i - p^-)(o_i - o^-)]^2}{[\sum(p_i - p^-)^2(o_i - o^-)^2]}$$



شکل ۱: محدوده موردمطالعه خلخال طارم و رودخانه قزل‌اوزن در سال ۱۳۹۷.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

جدول ۲: مشخصات آماری پارامترهای کیفی در چهار دوره نمونه‌برداری از رودخانه قزل‌اوزن (سال ۱۳۹۷).

زمان نمونه‌برداری	آماره	Q m^3/s	T ^oC	pH	EC mmho/cm	DO mg/L	CBOD mg/L	TN mg/L	TP mg/L	TSS mg/L
اسفند ۱۳۹۶	حداقل	۰/۵	۰/۷	۷/۸	۰/۵	۵/۴	۰/۹	۲/۸	۰/۳۱	۳۳۷
	میانگین	۱۶/۸	۱۰/۹	۸/۲	۲/۷	۷/۶	۱۲/۴	۶/۶	۰/۴۶	۱۴۴۵/۷
	حداکثر	۳۶/۱	۱۵	۸/۴	۹/۵	۱۰/۵	۲۸/۸	۹/۳	۰/۵۳	۲۴۰
	انحراف معیار	۳۶/۶	۳/۶	۰/۲	۲/۸	۲/۳	۱۳/۳	۰/۳	۰/۰۹	۷۴۶/۰۶
تیر ۱۳۹۷	حداقل	۰/۱	۱۶/۲	۷/۹	۱	۷/۴	۱	۰/۵	۰/۰۵	۱۲۶۰
	میانگین	۳/۳	۲۴/۹	۸/۲	۲/۸	۸/۲	۳/۶	۱/۷	۰/۰۷	۱۹۷۰
	حداکثر	۱۴	۳۰	۸/۴	۳/۸	۸/۸	۱۰/۳	۴/۲	۰/۱۲	۳۶۰
	انحراف معیار	۴/۶	۰/۵	۰/۲	۰/۹	۰/۶	۳/۴	۱/۲	۰/۰۴	۷۴۷/۷
مهر ۱۳۹۷	حداقل	۰/۱	۲۰	۷/۸	۰/۱	۳/۱	۱/۵	۰/۶	۰/۰۵	۵۵۰
	میانگین	۴/۴	۰/۲۴	۸/۵	۳/۵	۶/۳	۴/۴	۹/۱	۰/۱۱	۳۱۳۱۶/۲
	حداکثر	۱۸	۰/۲۶	۹/۱	۱۱/۳	۱۱/۳	۸/۵	۲۲/۷	۰/۲۶	۱۳۵۲۰۰
	انحراف معیار	۰/۶	۲/۳	۰/۵	۳/۲	۲/۶	۲/۳	۱۰/۴	۰/۰۷	۵۴۸۶۶/۸
آذر ۱۳۹۷	حداقل	۰	۰/۸	۷/۹	۰/۷	۱۲/۵	۱/۹	۰/۴	۰/۰۵	۶۰۰
	میانگین	۶/۸	۱۰/۲	۸/۳	۲/۵	۱۳/۲	۴/۸	۱/۲	۰/۰۸	۳۷۷۵
	حداکثر	۱۵/۵	۱۲/۲	۸/۷	۳/۶	۱۴/۲	۱۱	۱/۶	۰/۲	۶۸۵۰
	انحراف معیار	۶/۵	۱/۷	۰/۳	۱/۱	۰/۶	۳/۷	۰/۴	۰/۰۶	۱۸۵۶/۵

نتایج

مدلQual2kw رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از داده‌های نمونه‌برداری شده در دو ماه اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ واسنجی و تیر و آذر ۱۳۹۷ صحت سنجی شد. به‌طورکلی مقادیر مدلQual2kw قادر به کالیبره بیش از ۱۰۰ پارامتر فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشد؛ که در پژوهش حاضر از بین این پارامترها، طبق تنظیمات معمول مدل، ۳۲ پارامتر اصلی برای واسنجی انتخاب شدند. کل پارامترهای قابل واسنجی شده به همراه مقادیر واسنجی شده و حدود بالا و پایین آن‌ها در جدول ۳ ارائه‌شده است مطابق با جدول ۳، در مدل‌سازی رودخانه قزل‌اوزن از فرآیندهای موجود در ناحیه زیر منطقه اشباع رودخانه (Hyporheic metabolism) و جلبک‌های کف رودخانه صرف‌نظر شده است.

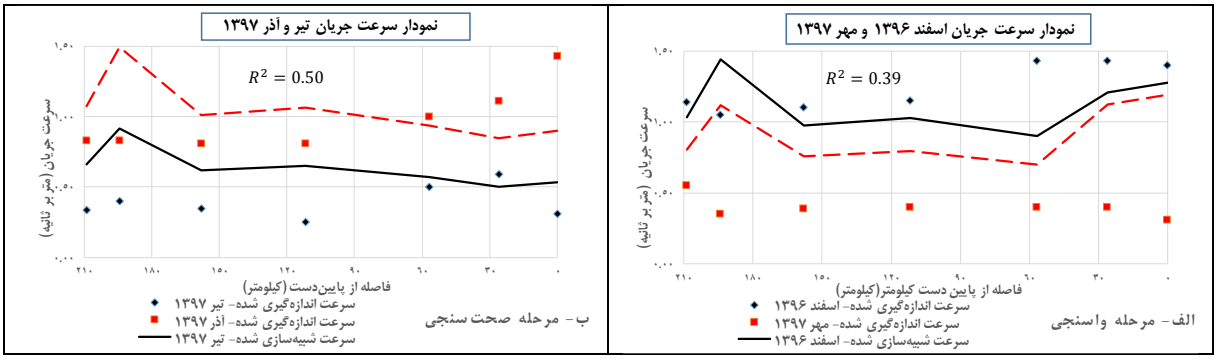
جدول ۳: مقادیر پارامترهای واسنجی شده در مدل Qual2kw رودخانه قزل‌اوزن (سال ۱۳۹۷).

پارامتر	ضریب	مقدار	واحد	نماد	کمینه	بیشینه
پارامترهای مواد جامد معدنی	سرعت ته‌نشینی	۰/۰۶۱۲۸	m /d	v_i	۰	۲
اصلاح دما		۱/۰۲۴		q_a		
اکسیژن برای اکسیداسیون کربن		۲/۶۹	gO_2 /gC	r_{oc}		
اکسیژن برای نیتریفیکیاسیون آمونیاک		۴/۵۷	gO_2 /gN	r_{on}		
CBOD آهسته	هیدرولیز	۱/۹۳	1 /d	k_{hc}	۰	۵
	اکسیداسیون	۱/۱۸	1 /d	k_{dcs}	۰	۰/۵

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

پارامتر	ضریب	مقدار	واحد	نماد	کمینه	بیشینه
CBOD سریع	اکسیداسیون	۰/۵۴	1 /d	k_{dc}	۰	۵
نیتروژن آلی	هیدرولیز	۰/۸۳	1 /d	k_{hn}	۰	۵
	ته‌نشینی	۰/۲۴	m /d	v_{on}	۰	۵
آمونیوم	نیتریفیکاسیون	۲/۱۵	1/ d	k_{na}	۰	۱۰
نیترات	دنیتریفیکاسیون	۱/۰۲	1 /d	k_{dn}	۰	۲
فسفر آلی	هیدرولیز	۳/۴۳	1/d	k_{hp}	۰	۵
	ته‌نشینی	۰/۶۲	m /d	v_{op}	۰	۲
فسفر غیر آلی	ته‌نشینی	۰/۰۱	m /d	v_{ip}	۰	۲
Sed P oxygen attenuation half sat constant		۱/۶۹	mgO_2 /L	k_{spi}	۰	۲

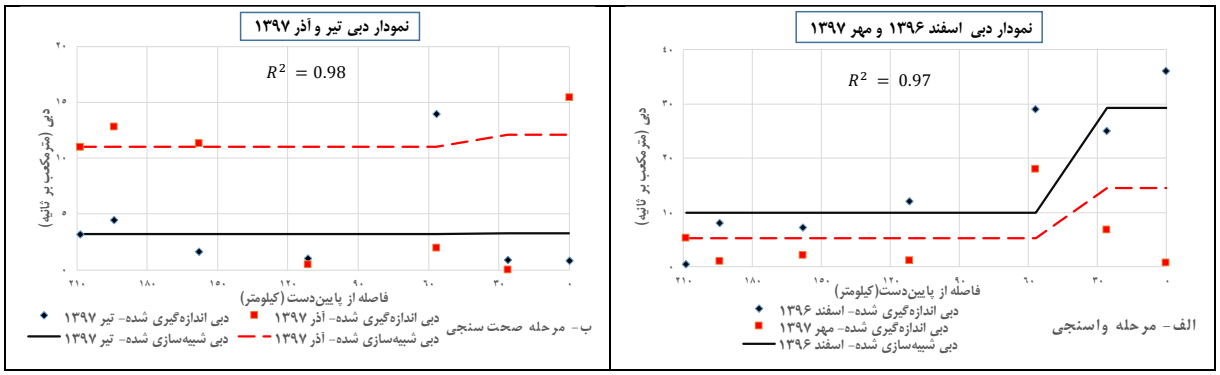
شکل ۲ سرعت جریان اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده رودخانه قزل‌اوزن را در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) نشان می‌دهد. سرعت جریان در مدلQual2kw بر اساس رابطه مانینگ محاسبه می‌شود و این پارامتر حساسیت زیادی به تغییرات ضریب زبری مانینگ از خود نشان می‌دهد. به‌منظور شبیه‌سازی بهتر مقادیر سرعت متوسط جریان در رودخانه قزل‌اوزن، برای بازه‌های مختلف مقدار ضریب زبری واسنجی شد. ازآنجایی‌که میزان سرعت جریان رودخانه تابعی از دبی رودخانه هست، روند سرعت جریان در اسفند به دلیل بالا بودن مقدار دبی بیشتر از میزان سرعت در مهرماه است. همچنین مقدار روند افزایشی سرعت از ایستگاه چهارم به بعد در اسفند و مهر به دلیل ورود شاخه فرعی و افزایش مقدار دبی و کاهش ضریب مانینگ است. از طرفی در تیرماه به دلیل بالا بودن دمای هوا و کم شدن مقادیر دبی در ایستگاه‌های مشاهداتی روند سرعت، کاهش داشته است. در آذرماه به دلیل بارندگی در فصل پاییز و شدت گرفتن جریان نیز روندی افزایشی داشته است، همان‌طور که مشاهده می‌شود بعد از ورود جریان رودخانه آریاچای (شاخه فرعی) به مسیر رودخانه قزل‌اوزن سرعت نیز افزایش داشته است. مقدار خطا MAE برای پارامتر سرعت جریان به ترتیب در مرحله واسنجی (۰/۳۸) و صحت سنجی (۰/۲۹) و مقدار خطا MBE برای مرحله واسنجی (۰/۲ و ۰/۱۵) بوده است. با توجه به ارزیابی ضرایب خطا و شبیه‌سازی مدل نتایج نشان می‌دهد که دقت مدل در شبیه‌سازی سرعت جریان نسبت به‌دقت مدل در شبیه‌سازی دبی رودخانه بیشتر می‌باشد.



شکل ۲: روند سرعت جریان رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

شکل ۳ روند تغییرات دبی جریان شبیه‌سازی‌شده را در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) نشان می‌دهد. دقت شبیه‌سازی دبی در مدل Qual2kw تا حد زیادی به اندازه‌گیری دبی در بازه‌های مختلف رودخانه بستگی دارد. به عبارتی اگر دبی‌های ورودی و خروجی به رودخانه در طول کل بازه موردمطالعه به‌دقت اندازه‌گیری و وارد مدل شود، مدل قادر خواهد بود با دقت مناسبی دبی رودخانه را شبیه‌سازی نماید. در رودخانه قزل‌اوزن با توجه به طول بازه طولانی موردبررسی (۲۰۸ کیلومتری) و شاخه‌های ورودی زیاد و همچنین نقاط زیاد برداشت از آب رودخانه، شبیه‌سازی دقیق دبی نیازمند پایش طول بازه موردمطالعه و اندازه‌گیری دبی‌های ورودی و خروجی است. روند تغییرات دبی در طول رودخانه موردمطالعه برای اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ از ایستگاه چهارم روندی افزایشی داشته به‌طوری‌که در ایستگاه ۶ و ۷ به بیشترین میزان خود رسیده است که دلیل بر اضافه شدن شاخه فرعی (آریا چای) رودخانه اصلی است. کم بودن مقدار دبی در تیرماه دلیل بر بالا بودن دمای هوا و میزان تبخیر بالا در محدوده مطالعاتی می‌باشد. در ماه‌های اسفند و آذر که میزان بارندگی نسبت به ماه‌های دیگر بیشتر است موجب افزایش مقدار دبی در بازه‌های مطالعاتی می‌باشد. مقدار خطا MAE و MBE دبی به ترتیب ۶/۶، ۴/۲،۱/۶ و ۱/۶ برای دوره واسنجی و صحت سنجی بوده است. نتایج شبیه‌سازی‌شده نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی و صحت سنجی شده انطباق خوبی باهم داشته است که نشان از دقت خوب مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد.

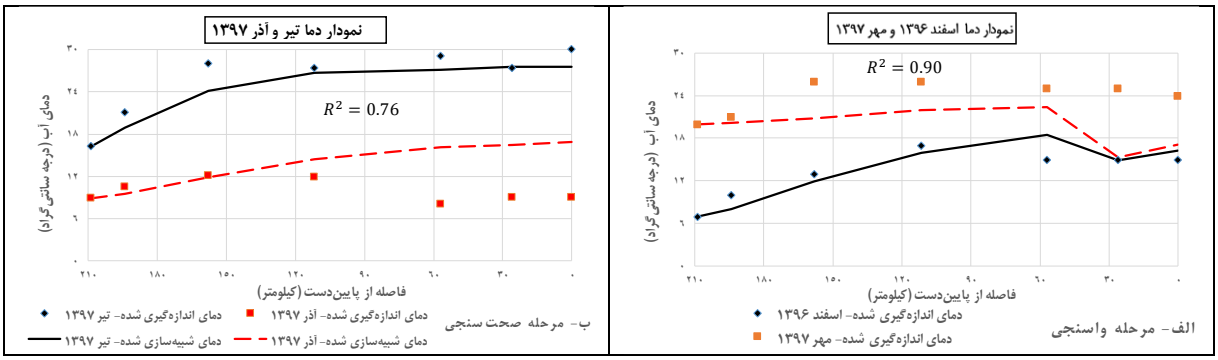


شکل ۳: روند تغییرات دبی رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۴، دما اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده رودخانه قزل‌اوزن را در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) نشان می‌دهد. دمای آب در تیر و مهر ۱۳۹۷ دارای بیشترین مقادیر و در آذر ۱۳۹۷ و اسفند ۱۳۹۶ دارای کمترین مقادیر است، که این تغییرات دمایی در فصول مختلف نمونه‌برداری اثر مستقیمی روی سایر پارامترهای کیفیت آب در رودخانه می‌گذارد. ازآنجایی‌که دمای آب رابطه‌ی مستقیمی با دمای هوا دارد، معمولاً تغییرات دمای هوا در ماه‌های گرم نمونه‌برداری مانند تیرماه در اغلب ایستگاه‌های نمونه‌برداری مشاهده می‌شود. در اسفندماه به دلیل پایین بودن میزان دمای هوا کاهش داشته است. همچنین ورود شاخه فرعی نیز می‌تواند باعث کاهش دما آب در طول مسیر رودخانه شود.

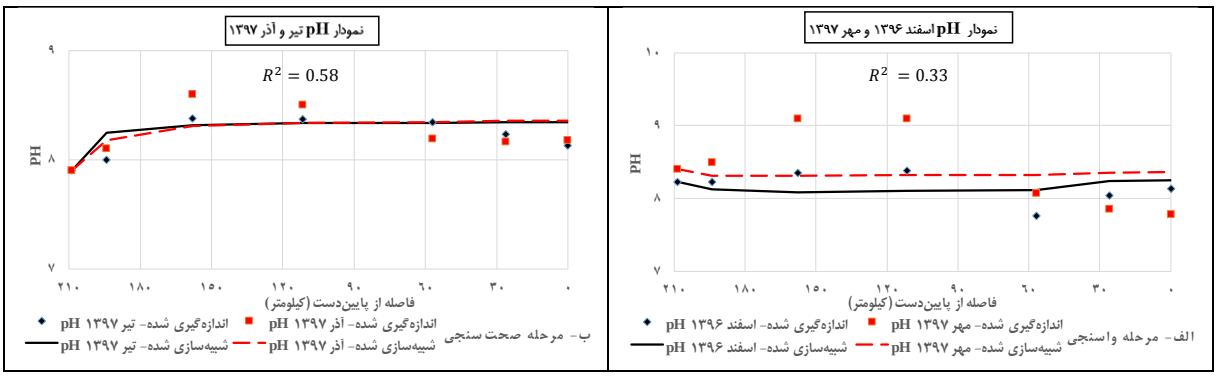
همان‌طور که مشاهده می‌شود شبیه‌سازی دما اسفند نسبت به مهر ۱۳۹۷ بهتر و تیرماه نسبت به آذرماه بهتر بوده است. کمترین مقدار خطا MBE برای پارامتر دما در مرحله واسنجی ۲/۰۴- و بیشترین مقدار آن در مرحله صحت سنجی ۱/۰۱ بوده است. مقدار خطا MAE در مرحله واسنجی و صحت سنجی برای پارامتر دما ۲/۷ به دست آمد. مقادیر شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری شده هم‌خوانی خوبی مخصوصاً در دو ماه اسفند و تیر نسبت به دیگر ماه‌ها داشته است که این به معنی شبیه‌سازی نسبتاً خوب مدل برای این پارامتر می‌باشد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]



شکل ۴: روند تغییرات دما رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۵، pH اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده رودخانه قزل‌اوزن را در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) نشان می‌دهد. بر اساس استاندارد کیفیت آب محیط‌زیست، مقدار مجاز pH برای مصرف کشاورزی رودخانه‌ها بین (۵/۵-۶/۸) می‌باشد. بهترین و بدترین برآورد قلیائیت در بین ماه‌های شبیه‌سازی به ترتیب مربوط به تیر و مهر ۱۳۹۷ می‌باشد. یکی از دلایلی که مدل نتوانسته است در مهر ۱۳۹۷ مقادیر قلیائیت را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید تغییرات زیاد این پارامتر در طول رودخانه قزل‌اوزن در این ماه می‌باشد که بین ۷/۸ تا ۹/۱ متغیر می‌باشد درحالی‌که این مقدار برای تیر ۱۳۹۷ بین ۷/۹ تا ۸/۴ می‌باشد مقادیر آماره خطا MAE و MBE برای دوره واسنجی به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۰۲- و برای دوره صحت سنجی ۰/۴ و ۰/۳۱- محاسبه شد. مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل در مرحله واسنجی اختلاف ناچیزی داشته اما در مرحله صحت سنجی هم‌خوانی خوبی باهم داشته است. روند تغییرات غلظت pH در کل طول مسیر رودخانه تقریباً یکنواخت و ثابت می‌باشد و مقدار غلظت پارامتر مذکور در ایستگاه‌های مطالعاتی از ۸/۵ بالاتر نرفته است و در حد استاندارد باقی‌مانده است. این موضوع حاکی از توان خود پالایی رودخانه در منطقه مطالعاتی می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر معیارهای خطا پارامتر pH در هر چهار دوره در طول رودخانه تغییرات چشمگیری را نشان نمی‌دهد. نتایج شبیه‌سازی مدل در هر دوره (واسنجی و صحت سنجی) مدل نیز این روند بدون تغییر را نشان می‌دهد.

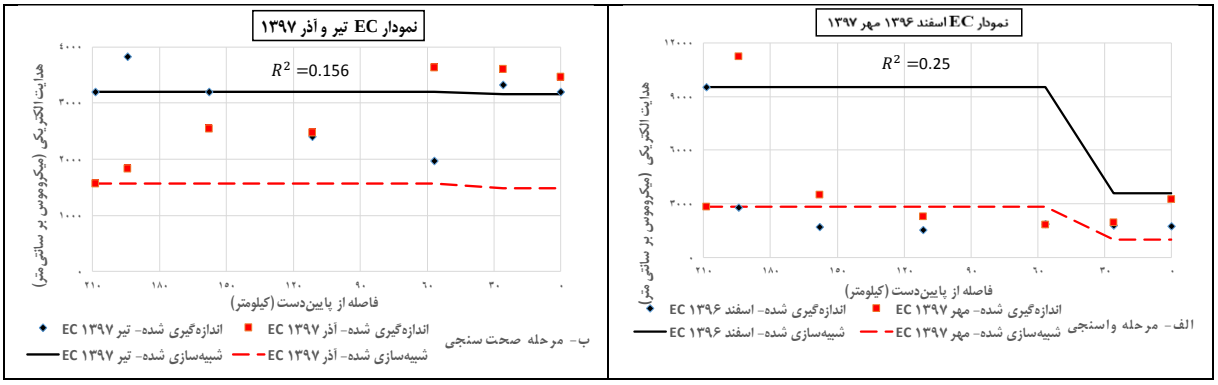


شکل ۵: روند تغییرات pH رودخانه قزل‌اوزن در مرحله ۰ واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۶، هدایت الکتریکی (EC: Electrical Conductivity) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده رودخانه قزل‌اوزن را در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) نشان می‌دهد. از عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب میزان شوری آن است که توسط هدایت الکتریکی و مجموع مواد

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

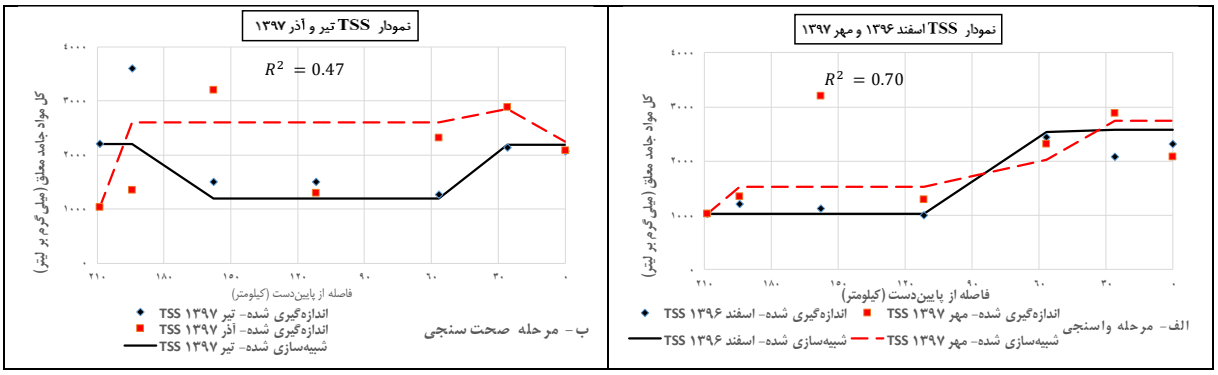
محلول (TDS) اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۶ الف وب نشان‌دهنده دقت بالای مدل Qual2kw در شبیه‌سازی هدایت الکتریکی رودخانه قزل‌اوزن را در تیر ۱۳۹۷ می‌باشد. کمترین دقت شبیه‌سازی هدایت الکتریکی در بین ماه‌های مرحله واسنجی مربوط به اسفند ۱۳۹۶ می‌باشد که یکی از دلایل آن تغییرات زیاد هدایت الکتریکی در این ماه در طول رودخانه قزل‌اوزن است که برابر ۷۹۹۰ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. این در حالی است که اختلاف بین حداقل و حداکثر هدایت الکتریکی مشاهداتی در طول رودخانه قزل‌اوزن در تیر ۱۳۹۷ برابر ۱۸۶۱ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد. مقدار EC اندازه‌گیری شده در سرآب برای دوره‌های مطالعاتی (اسفند ۱۳۹۶، تیر، مهر و آذر ۱۳۹۷) به ترتیب عبارت‌اند از ۹۵۲۰، ۳۲۰۰، ۲۸۴۰ و ۱۵۷۰ بوده است که با مقدار شبیه‌سازی‌شده توسط مدل انطباق خوبی دارد روند EC در تیر و آذرماه روندی تقریباً یکسان داشته که از بازه ۶۰ کیلومتری از پایاب تقریباً کاهش داشته که حاکی از توان خود پالایی مناسب رودخانه قزل‌اوزن می‌باشد. بالا بودن مقدار EC از سراب تا بازه ۶۰ کیلومتری از پایاب می‌تواند به دلیل وجود سازندهای زمین‌شناسی شور کننده منطقه موردمطالعه در بستر رودخانه قزل‌اوزن و تأثیر نزدیکی مناطق کشاورزی و زهاب‌های حاصل از آن‌ها در این منطقه باشد. نتایج ارزیابی معیارهای آماری نشان داد که بیشترین مقدار خطا MAE برای مرحله واسنجی به مقدار ۳۴۰۱ و کمترین آن مربوط به مرحله صحت‌سنجی با مقدار ۷۹۷ می‌باشد و همچنین کمترین مقدار خطا MBE برای پارامترEC (۵۰۸-) و بیشترین مقدار آن ۱۶۴۹ بوده است. نتایج ارزیابی خطا و شبیه‌سازی مدل برای پارامتر EC نشان می‌دهد که مدل در مرحله صحت‌سنجی دقت بیشتری نسبت به مرحله واسنجی برای شبیه‌سازی دارد.



شکل ۶: روند تغییرات EC رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۷ حاکی از شبیه‌سازی مناسب پارامتر کل مواد جامد معلق (TSS: Total Suspended Solids) در رودخانه قزل‌اوزن برای تمامی ماه‌های نمونه‌برداری در مراحل واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) می‌باشد. مقدار TSS در کل دوره‌های مطالعاتی بیشتر از میزان استاندارد مجاز (۴۰ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد. در تیرماه ۱۳۹۷ به بیشترین مقدار خود رسیده است ولی از ایستگاه دوم تا ۶۰ کیلومتری از پایاب روندی کاهشی داشته و بعدازآن تا انتها به دلیل ورود فاضلاب ناشی از روستای پاوه رود، شهر آب بر و شهر گیلوان روندی افزایشی پیداکرده است. در آذرماه نیز روندی افزایشی داشته که مقدار شبیه‌سازی تیرماه بهتر از شبیه‌سازی آذرماه بوده است. کمترین مقدار TSS در سراب برای مهر و اسفندماه ۱۳۹۶ بوده است که از ایستگاه چهارم روندی افزایشی داشته است؛ بنابراین در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی مقدار پارامتر TSS از بالادست تا پایین‌دست افزایش‌یافته که حاکی از نامطلوب‌تر شدن کیفیت و عدم توان خود پالایی مناسب رودخانه است. مقادیر خطا MAE و MBE در دوره واسنجی مدل به ترتیب عبارت است از ۳۰۸ و ۴/ ۲۹- و در دوره صحت سنجی ۴۱۹ و ۲۳- که بیشترین مقدار خطا MAE مربوط به دوره صحت سنجی می‌باشد. نتایج آماره‌های خطا و شبیه‌سازی مدل نشان می‌دهد که مدل مذکور در دوره واسنجی دقت بیشتری نسبت به دوره صحت سنجی دارد.

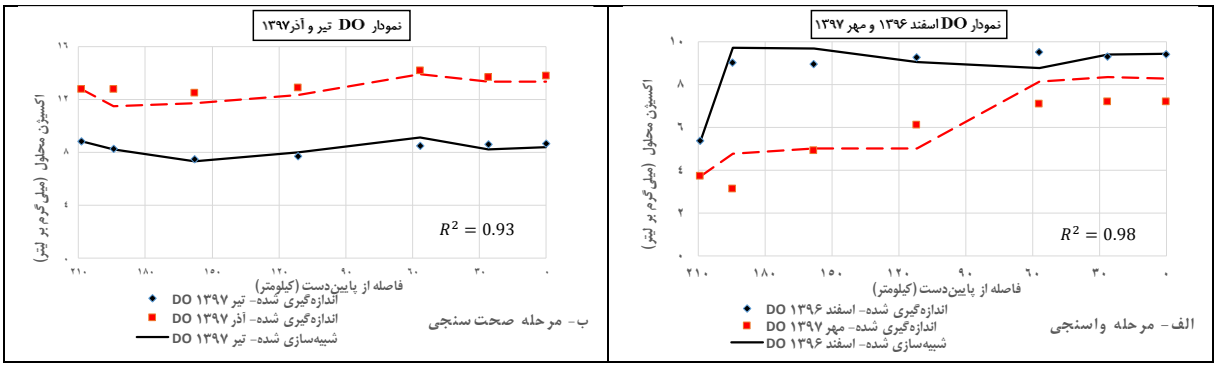
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]



شکل ۷: روند تغییرات TSS رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و مرحله صحت‌سنجی (ب) - اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷

شکل ۸ مقادیر تغییرات پارامتر اکسیژن محلول (DO: Dissolved oxygen) در رودخانه قزل‌اوزن را به تفکیک مراحل واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) نشان می‌دهد. میزان اکسیژن محلول در رودخانه به عوامل متعددی ازجمله دمای آب، میزان هوادهی طبیعی، بار آلی موجود و یا ورودی رودخانه بستگی دارد. مقدار DO در دوره‌های مطالعاتی به حد اشباع خود رسیده است که کمترین و بیشترین مقدار اکسیژن محلول مشاهداتی به ترتیب در مهر و آذر در رودخانه قزل‌اوزن اندازه‌گیری شده است. نکته قابل‌توجه در شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانه قزل‌اوزن این می‌باشد که کمترین و بیشترین دقت شبیه‌سازی مدل در این پارامتر به ترتیب مربوط به ماه‌های صحت‌سنجی یعنی تیر و آذر می‌باشد که دلیل آن می‌تواند تغییرات کم‌مقدار اکسیژن محلول در این ماه‌ها در طول رودخانه قزل‌اوزن باشد. تغییرات پارامتر کیفی DO در طول رودخانه قزل‌اوزن حاکی از بهبود کیفیت آب از محل روستای ممان تا شهر گیلوان است که می‌تواند به دلیل خود پالایی مناسب رودخانه قزل‌اوزن باشد. مقدار DO بعد از ایستگاه سرآب برای مهر و اسفند روندی افزایشی داشته است. علت این افزایش در طول دوره مطالعاتی کوهستانی بودن منطقه موردمطالعه، تلاطم زیاد رودخانه می‌باشد. در قسمت پایاب رودخانه باوجوداینکه در تیرماه دمای هوا بالا می‌باشد و رودخانه از مناطق کشاورزی و روستایی عبور می‌کند، بعد از ورود شاخه فرعی روندی کاهشی داشته است.

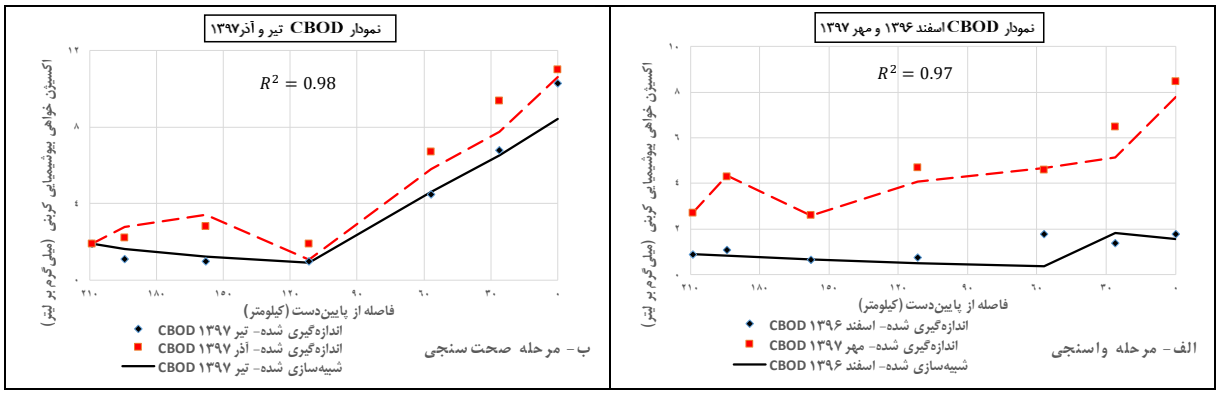
ازآنجایی‌که میزان اکسیژن محلول آب وابسته به دما و مقدار BOD است مقدار DO در اسفند ۱۳۹۶ از ایستگاه دوم روندی افزایشی داشته است. مقدار DO در تیر و آذر در ایستگاه دوم (قبل از سد استور، در محل ایستگاه هیدرومتری) کاهش داشته و بعدازآن روندی تقریباً افزایشی پیداکرده است که می‌تواند دلیل بر نبودن سکونت‌گاه و شیب رودخانه در قسمت کوهستانی منطقه موردمطالعه باشد. مقادیر خطا MAE و MBE برای دوره‌های واسنجی و صحت سنجی به ترتیب عبارت‌اند از (۰/۶۲ و ۰/۳۹) و (۰/۴ و ۰/۳۱-). طبق نتایج به‌دست‌آمده مقادیر اندازه‌گیری شده و مشاهده‌شده هم‌خوانی بیشتری نسبت به نتایج شبیه‌سازی BOD داشته است.



[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

شکل ۸: روند تغییرات DO رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ و مهر تیر و آذر ۱۳۹۷.

مقادیر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD: Biochemical Oxygen Demand) اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده در رودخانه قزل‌اوزن در شکل ۹ (الف) و (ب) حاکی از روند افزایشی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی در طول رودخانه قزل‌اوزن می‌باشد که ناشی از نامطلوب‌تر شدن وضعیت کیفی آب این رودخانه از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه به خاطر ورد انواع آلاینده‌ها است. میزان BOD در مهرماه بیشترین مقدار را داشته که در بازه ۶۰ کیلومتری از پایاب روندی افزایشی دارد که می‌تواند دلیل بر ورود شاخه فرعی آریاچای و کم شدن تلاطم جریان رودخانه و همچنین کم شدن شیب رودخانه باشد. در این بازه رودخانه توان خود پالایی خود را از دست می‌دهد و باعث افزایش مقدار پارامتر مذکور می‌گردد. مقدار BOD در تیر و آذرماه افزایش چشمگیری بعد از ایستگاه مزرعه که بیشتر مناطق کشاورزی را تا انتهای بازه مطالعاتی دارد. ورود زه آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های روستایی (روستای نمهیل، شهر آب بر، پاوه رود، گیلوان) و خشک‌سالی‌های به وجود آمده می‌تواند دلیل برافزایش مقدار این پارامتر باشد. بیشترین مقدار BOD مربوط به مهر کمترین مقدار برای اسفند می‌باشد. کمترین مقدار آماره MAE برای مرحله واسنجی (۰/۳۹) و بیشترین مقدار آن مربوط می‌شود به مرحله صحت سنجی (۰/۵۸). مقدار خطا MBE برای پارامتر BOD در مرحله واسنجی (۰/۳۱-) و صحت سنجی (۰/۲۸-) محاسبه شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مقدار اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل هم‌خوانی خوبی باهم دارند که نشانگر این است که مدل به‌خوبی این پارامتر را می‌تواند شبیه‌سازی کند.



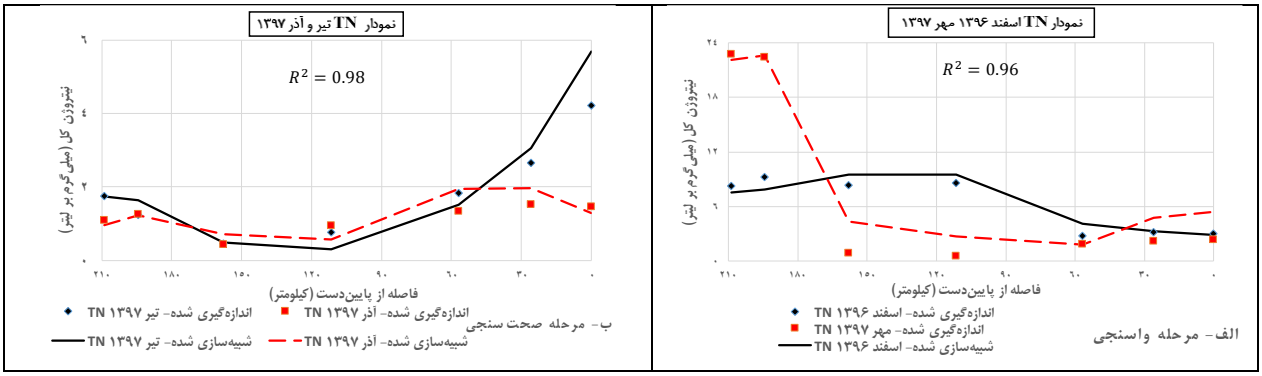
شکل ۹: روند تغییرات BOD رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت‌سنجی (ب) اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۱۰ الف و ب نشان می‌دهد که نیتروژن کل (**TN:** Total Nitrogen) اندازه‌گیری شده در ماه‌های اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ در طول رودخانه قزل‌اوزن روندی کاهشی دارند. مخصوصاً در مهر که مقدار نیتروژن کل از ۲۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر در بالادست رودخانه به ۲/۴ میلی‌گرم بر لیتر کاهش پیداکرده که حاکی از توان خود پالایی رودخانه در این ماه می‌باشد. بیشترین مقادیر نیتروژن کل اندازه‌گیری شده در رودخانه

قزل‌اوزن مربوط به مهرماه هست که دلیل آن می‌تواند ورود آلاینده‌های کشاورزی حاوی کودهای نیتراتِ باشد. میزان پالایش نیترات مربوط به فرایند دی نیتریفیکاسیون است که این فرآیند، در محیط‌های ساکن (مانند عمق زمین) سریع‌تر عمل کرده و به کمک باکتری‌های اکسید و آمین به تجزیه نیترات می‌پردازد. ازاین‌جهت رودخانه‌ها دارای خود پالایی کمتری در تجزیه مقادیر نیترات دارند که این امر در بررسی خود پالایی

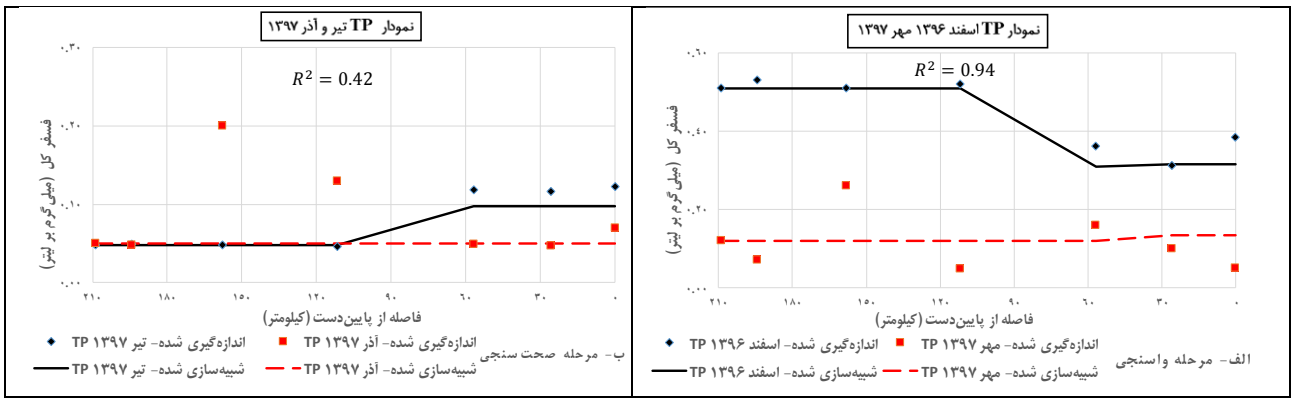
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

پارامتر نیترات در رودخانه سفیدرود توسط عظیمی و همکاران با اجرای مدل Qual2kw نیز دیده‌شده است. مقدار نیتروژن کل در تیرماه از ایستگاه چهارم تا انتها به دلیل وجود مزارع کشاورزی و ورود کودهای شیمیایی روندی افزایشی داشته که در نتایج شبیه‌سازی کاملاً مشهود است. مقدار پارامتر نیتروژن کل در اسفند ۱۳۹۶، مهر و آذر ۱۳۹۷ روندی کاهشی داشته به دلیل اینکه ماه‌های مذکور در فصول کشاورزی نیستند و استفاده از کودهای شیمیایی کمتر از فصل کشاورزی است. بیشترین مقدار MAE و MBE در دوره واسنجی با مقدار ۱/۲۷ و ۰/۸۴ و کمترین آن در دوره صحت‌سنجی با مقدار ۰/۳۷ و ۰/۱۴ می‌باشد.



شکل ۱۰: روند تغییرات TN رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) اسفند ۱۳۹۶ و مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

شکل ۱۱(الف) نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر فسفر کل (TP: Total phosphorus) در رودخانه قزل‌اوزن در اسفندماه ۱۳۹۶ اندازه‌گیری شده است که از علل آن می‌توان به باقی‌مانده استفاده کشاورزان از کودهای فسفاتِ در زمین‌های کشاورزی و ورود آن به رودخانه در سرآب اشاره کرد. همچنین مقادیر فسفر کل در سه ماه تیر و مهر و آذر ۱۳۹۷ کمتر از ۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. غلظت این پارامتر باوجود بالا بودن در اسفندماه بعد از ورود شاخه فرعی به رودخانه روندی کاهشی داشته است اما این مقدار غلظت در تیر و آذرماه روندی افزایشی داشته است. بیشترین و کمترین مقدار خطا MAE مربوط به دوره واسنجی با میزان ۰/۰۴ و برای دوره صحت سنجی (۰/۰۲) می‌باشد. همچنین کمترین مقدار خطا MBE برای پارامتر TP مربوط به دوره واسنجی (۰/۰۳-) بوده است.



[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

شکل ۱۱: روند تغییرات TP رودخانه قزل‌اوزن در مرحله واسنجی (الف) و صحت سنجی (ب) ـ اسفند ۱۳۹۶ مهر، تیر و آذر ۱۳۹۷.

جدول شماره ۵ نشان می‌دهد که بیشترین توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن برای پارامترهای اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)، فسفر کل (TP) و نیتروژن کل (TN) به ترتیب در اسفند ۱۳۹۶، آذر ۱۳۹۷، مهر ۱۳۹۷ و آذر ۱۳۹۷ و برابر ۹۶، ۸۰، ۹۱ و ۶۶ درصد اتفاق افتاده است. یکی از دلایل کم بودن توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن در ماه اسفند را می‌توان به دمای پایین آب در این ماه مربوط دانست که باعث کم شدن فعالیت‌های شیمیایی در آب‌شده و زوال آلاینده‌ها به‌تبع آن کم می‌شود. هم‌چنین به دلیل بالا بودن دبی رودخانه در مهر و آذر، میزان خود پالایی هم بیشتر است.

جدول ۵: توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن در دوره‌های نمونه‌برداری.

زمان نمونه برداری	معیار خطا	Q /s M^3	سرعت جریان	T °C	EC /cm mmho	DO mg/L	pH -	TN mg/L	TP mg/L	TSS mg/L	CBOD mg/L
مرحله واسنجی	MAE	۶/۶	۰/۳۸	۲/۷	۳۴۰۱	۰/۶۲	۰/۳۱	۱/۲۷	۰/۰۴	۳۰۸	۰/۳۹
	MBE	۲/۶	۰/۲	−۲/۰۴	۱۶۴۹	۰/۳۹	−۰/۰۲	۰/۸۴	−۰/۰۳	−۲۹/۴	−۰/۳۱
	RMSE	۸/۴	۰/۴۳	۳/۵	۴۵۷۳	۰/۷۶	۰/۳۷	۱/۵۶	۰/۰۵	۴۶۳	۰/۶۱
مرحله صحت سنجی	MAE	۴/۱	۰/۲۹	۲/۷	۷۹۷	۰/۴۰	۰/۱۲	۰/۳۷	۰/۰۲	۴۱۹	۰/۵۸
	MBE	۱/۶	۰/۱۵	۱/۰۱	−۵۰۸	−۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۱۴	−۰/۰۱	−۲۳	−۰/۲۸
	RMSE	۵/۸	۰/۳۴	۳/۶	۱۰۲۱	۰/۵۰	۰/۱۵	۰/۴۹	۰/۰۴	۶۴۲	۰/۸۰

جدول ۶: مقادیر پارامترهای خطا در شبیه‌سازی پارامترهای رودخانه قزل‌اوزن.

زمان نمونه‌برداری	DO mg/L	CBOD mg/L	TN mg/L	TP mg/L
اسفند ۱۳۹۶	%۴۴	%۵۷	%۲۵	%۵۲
تیر ۱۳۹۷	%۸۹	%۴۰	%۳۴	%۳۸
مهر ۱۳۹۷	%۹۶	%۵۶	%۹۱	%۶۵
آذر ۱۳۹۷	%۸۱	%۸۰	%۸۱	%۶۶
میانگین	%۷۸	%۵۸	%۵۹	%۵۵

جدول ۶ مقادیر پارامترهای خطای مدل شامل میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین خطای اریبی (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) را برای پارامترهای کمی و کیفی شبیه‌سازی‌شده در رودخانه قزل‌اوزن با استفاده از مدل Qual2kw را نشان می‌دهد. بررسی مقادیر جدول شماره ۶ نشان می‌دهد بهترین نتیجه شبیه‌سازی مربوط به پارامتر pH و فسفر کل است. به‌طوری‌که شاخص RMASE و MAE در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل کمترین مقدار ۰/۳۷ و ۰/۱۵ و ۰/۰۵ و ۰/۰۴ به دست آمد. در این مرحله نیز حدود شاخص‌های آماری قابل‌قبول است که کمترین مقادیر میانگین قدر مطلق خطا (MAE) در مورد پارامترهای اکسیژن محلول، pH، فسفر کل ۰/۴، ۰/۱۲ و

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

۰/۰۲ به‌دست‌آمده. مقادیر منفی MBE در مرحله واسنجی برای دما،TP،TSS، BODو در مرحله صحت سنجی برای پارامتر EC،DO،TSS، TP،BOD به دست آمد که نشان می‌دهد مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل کم‌تر از مقادیر واقعی می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش از مدل Qual2kw جهت ارزیابی توان خود پالایی رودخانه قزل‌اوزن استفاده گردید. نتایج بررسی مقادیر DO نشان داد که مقدار پارامتر DO از سراب تا پایاب در رودخانه قزل‌اوزن در دوره‌های مطالعاتی به حد اشباع خود رسیده است که مشابه مطالعات و نتایج خنک و همکاران (۱۴۰۰) در رودخانه سفیدرود می‌باشد. ایشان نیز به این نتیجه رسیدند که مقدار DO رودخانه سفیدرود از بالادست به پایین‌دست افزایش داشته که می‌تواند حاکی از توان خود پالایی رودخانه سفیدرود باشد. نمودار تغییرات پارامتر BOD روند افزایشی اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در طول رودخانه قزل‌اوزن نشان داد که ناشی از نامطلوب‌تر شدن وضعیت کیفی آب این رودخانه از بالادست به سمت پایین‌دست رودخانه به خاطر ورود انواع آلاینده‌ها است. نتایج شبیه‌سازی BOD در این پژوهش مشابه نتایج شبیه‌سازی BOD در پژوهش حسینی و همکاران (۱۳۹۶) بر روی رودخانه کارون می‌باشد. ایشان نیز به این نتیجه رسیدند که مقدار BOD در ماه دی به علت افزایش رواناب‌ها و مواد آلی و شست و شوی مزارع نسبت به ماه مرداد افزایش‌یافته است. مهردادی و همکاران (۲۰۰۶) در ارزیابی پتانسیل خود پالایی رودخانه تجن بیان کردند که میزان BOD و COD در نیمه دوم هرسال بیشتر از نیمه اول آن است. روند تغییرات غلظت pH در کل طول مسیر رودخانه قزل‌اوزن تقریباً یکنواخت و ثابت بود. این موضوع حاکی از توان خود پالایی رودخانه در منطقه مطالعاتی است که مشابه پژوهش‌های Khonok و همکاران (۲۰۲۲)، باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) و حسینی و حسینی (۱۳۹۶) در شبیه‌سازی مدل برای پارامترpH به دست آمد. باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) ورود منابع غیر نقطه‌ای ناشناخته و نبود اطلاعات کافی از منابع نقطه‌ای ورودی و خروجی به رودخانه را از دلایل ضعف در شبیه‌سازی توسط مدل دانستند. دبی در طول رودخانه قزل‌اوزن برای اسفند ۱۳۹۶ و مهر ۱۳۹۷ از ایستگاه چهارم روندی افزایشی داشت که دلیل بر اضافه شدن شاخه فرعی به رودخانه اصلی است. همچنین نتایج شبیه‌سازی‌شده نشان داد که مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی‌شده در مرحله واسنجی و صحت سنجی شده انطباق خوبی باهم داشته است که نشان از دقت خوب مدل در شبیه‌سازی دبی می‌باشد عبدالهی و همکاران (۱۳۹۷) در پژوهش خود بر روی رودخانه کارون نیز به این نتیجه رسیدند که مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده بسیار به هم نزدیک بوده و مدل عملکرد مناسبی را در پارامتر دبی داشته است. نتایج شبیه‌سازی دما در پژوهش مذکور مشابه پژوهش و نتایج حسینی و همکاران (۱۳۹۶) بر روی رودخانه کارون می‌باشد. ایشان نیز در ارزیابی و شبیه‌سازی دما در رودخانه کارون به این نتیجه رسیدند که دمای آب در ماه سرد (دی) به‌طور طبیعی کاهش چشمگیری داشته است. نتایج شبیه‌سازی حسینی (۱۳۹۸) بر روی رودخانه قره‌سو نیز همانند نتایج این پژوهش بوده و مقدار دما در ماه گرم (تیر) افزایش داشته است. مقدار TSS در کل دوره‌های مطالعاتی بیشتر از میزان استاندارد مجاز ۴۰ میلی‌گرم بر بود. در تیرماه ۱۳۹۷ به بیشترین مقدار خود رسید ولی از ایستگاه دوم تا ۶۰ کیلومتری از پایاب روندی کاهشی داشت و بعدازآن تا انتها به دلیل ورود فاضلاب ناشی از روستای پاوه رود، شهر آب‌بر و شهر گیلوان روندی افزایشی پیدا کرد که همین نتایج در مطالعات سایر رودخانه‌های کشور مانند رودخانه تجن توسط ورسه و همکاران (۱۳۹۳)، حسینی و همکاران (۱۳۹۶) بر روی رودخانه کارون در بازه زرگان ـ کوت امیر مطابقت دارد. در رودخانه قزل‌اوزن به‌مانند نتایج پژوهش حسینی و همکاران (۱۳۹۵) بر روی رودخانه کارون شبیه‌سازی EC در اسفند و مهر روندی تقریباً کاهشی داشت. ایشان بیان داشتند در ماه‌های خنک سال اگرچه میزان تبخیر و اثر کاهش حجم دبی کمتر است اما اثر منابع غیر نقطه‌ای که حاصل از شست و شوی زمین‌های اطراف رودخانه می‌باشد بیشتر است. همچنین نوشادی و همکاران (۱۳۹۰) در شبیه‌سازی رودخانه کر در ماه ژانویه و آگوست همین مطلب را برای این مؤلفه عنوان کرده است و بیان می‌دارد که آلودگی‌های ناشی از رواناب به‌عنوان یک منبع غیرمتمرکز آلودگی هستند و مدل‌ها به‌سختی می‌توانند آن را پیش‌بینی کنند. همین نتایج در مطالعات سایر رودخانه‌های کشور مانند رودخانه تجن توسط ورسه و همکاران (۱۳۹۳)، حسینی و همکاران (۱۳۹۶)

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

بر روی رودخانه کارون در بازه زرگان ـ کوت امیر مشاهده‌شده است. نیتروژن کل اندازه‌گیری شده در ماه‌های اسفند و مهر مقدار نیتروژن کل در طول رودخانه قزل‌اوزن روندی کاهشی داشت این وضعیت با نتایج حاصل از پژوهش آریایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸) بر روی رودخانه شاهرود مشابهت دارد ایشان به این نتیجه رسیدند که بیشترین و کمترین دقت مدل در شبیه‌سازی نیتروژن کل در تیر و مهر به‌دست‌آمده است.

بیشترین مقادیر فسفر کل در رودخانه قزل‌اوزن در اسفندماه ۱۳۹۶ اندازه‌گیری شد که از علل آن می‌توان به باقی‌مانده استفاده کشاورزان از کودهای فسفاتِ در زمین‌های کشاورزی و ورود آن به رودخانه در سرآب اشاره کرد. نتایج ارزیابی پارامتر TP هم‌راستا با نتایج هاشمی و همکاران (۱۳۹۷) در رودخانه تالار می‌باشد. ایشان نیز به این نتیجه رسیدند که باوجود روند کاهشی ـ نوسانی در طول مسیر رودخانه، اما درنهایت استفاده از آب این رودخانه در مسیر، محدودیتی برای اهداف کشاورزی ایجاد نکرده است. نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده توسط مدل Qual2kw برای پارامترهای کیفی با توجه به مقادیر خطا MAE و RMSE و MBE نشان می‌دهد که بهترین شبیه‌سازی مربوط به پارامتر pH و فسفر کل است. به‌طوری‌که در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل کمترین مقدار به دست آمد بیشترین توان خودپالایی رودخانه قزل‌اوزن برای پارامترهای اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) ۹۶، فسفر کل (TP) ۸۰ و نیتروژن کل (TN) ۹۱ درصد اتفاق افتاد. درنهایت با توجه به نتایج حاصل از واسنجی و صحت سنجی مدل می‌توان گفت که مدل با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی رودخانه قزل‌اوزن است. خنک و همکاران ۱۴۰۰، رزقیان و همکاران ۱۳۹۴، آریایی‌نژاد و همکاران ۱۳۹۷ و حسینی و همکاران ۱۳۹۶ سایر محققین نیز در پژوهشات خود کارایی مناسب مدل را گزارش کردند.

هدف از تحقیق حاضر ارزیابی دقت مدل Qual2kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در رودخانه قزل‌اوزن است. با توجه به وضعیت تغییرات کیفیت آب در طول بازه‌ی موردبررسی راهکارهای مدیریتی مانند انجام طرح پایش مستمر و حداقل فصلی در طول بازه رودخانه به‌منظور ارزیابی اثرات آلاینده‌های مختلف، کاهش بار آلاینده‌های ورودی در بازه‌های رودخانه دارای توان خود پالایی کم و مدیریت مکانی و زمانی آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای پیشنهاد می‌شود.

منابع

آریایی‌نژاد، ر.، سرائی تبریزی، م. و بابازاده، ح.، ۱۳۹۸. مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2KW (مطالعه موردی: رودخانه شاهرود). مجله علوم و تکنولوژی محیطزیست، دوره بیست و یکم، صفحات ۱۳-۱.

باباخانی، ز.، سرایی تبریزی، م. و بابازاده، ح.، ۱۳۹۸. تعیین ظرفیت خود پالایی رودخانه‌ی دیواندره با استفاده از مدل QUAL2KW. اکو هیدرولوژی، ۶(۳): صفحات ۶۸۴-۶۷۳.

حسینی، پ. و حسینی، ی.، ۱۳۹۶. بررسی تغییرات توان خود پالایی رودخانه کارون در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ با استفاده از مدل QUAL2KW در محدوده شهر اهواز. مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، ۴۹(۱): صفحات ۴۵-۳۵.

حسینی. پ.، ایلدرومی. ع. ر. و حسینی، ی.، ۱۳۹۵. بررسی کارایی مدل QUAL2KW در خود پالایی رودخانه (مطالعه موردی رودخانه کارون در بازه زرگان ـ کوت امیر). مجله علوم و تکنولوژی محیطزیست، ۱۸(۴)، صفحات ۱۲۲-۱۰۳.

خنک ا. سرای تبریزی م. بابازاده ح. صارمی ع. و محمدی قلنی م.، ۱۴۰۰. مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استفاده از نرم‌افزار QUAL2KW. مجله پژوهش‌های آب ایران،۴۰(۱۵): صفحات ۱۳۱-۱۲۱.

خوب. ن.، امین نژاد. ب. و امیدی، ا.، ۱۳۹۶. پایش کیفی و تعیین سهم رودخانه‌های واریزی برافزایش شوری رودخانه قزل‌اوزن در محدوده‌ی استان زنجان با استفاده از نرم‌افزار عددی QUAL2KW. مجله مهندسی منابع آب، ۳۲(۱۰): صفحات ۴۴-۳۳.

رزقیان.ف.، سبزی پور. ب. و سارنگ. ا.، ۱۳۹۴. مدل‌سازی کیفی رودخانه قره‌سو محدوده شهرستان کرمانشاه با مدل QUAL2KW. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

شاهی نژاد، ب.، ایزدی، ز. و بهزاد، ج.، ۱۴۰۰. ارزیابی مدل QUAL2KW در شبیه‌سازی کیفی رودخانه خرم‌آباد. مجله هیدرو ژئومورفولوژی، ۲۶(۸)، صفحات ۱۸۱-۱۶۵.

عبداللهی. ب.، ابراهیمی. ک.، عراقی نژاد. ش. و لیاقت. ع، ا.، ۱۳۹۷. ارزیابی سالیانه ضریب نرخ بازهوادهی رودخانه کارون (بازه ایستگاه ملاثانی تا کوت امیر). نشریه پژوهشات آب‌وخاک ایران، ۴۹ (۴)، صفحات ۹۳۴-۹۲۵.

عظیمی، م. م.، غواصیه، آ. ر.، هاشمی، ح.، برکتین، س. و جعفری گل، ف.، ۱۳۸۹. ارزیابی قدرت خود پالایی رودخانه با کمک نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیفی مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود. همایش ملی رویکرد آب پاک، دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور).

قلعه نی، م. و ابراهیمی، ک.، ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت مدل QUAL2KW در مدل‌سازی پارامترهای کیفی سفیدرود. مجله آبیاری و زهکشی ایران،۱۳(۵)، صفحات ۱۲۴۵- ۱۲۳۳.

موسویان، س. م.، ۱۳۹۹. بررسی نقش تغییر اقلیم بر دبی حوضه آبریز قزل‌اوزن با استفاده از روش‌های کمی و GIS. هفتمین همایش ملی مطالعات و پژوهشات نوین در حوزه علوم جغرافیا، معماری و شهرسازی ایران، تهران.

مهردادی، ن.، قبادی، م. و نصرآبادی، ت.، ۲۰۰۶. ارزیابی کیفیت و قابلیت تصفیه خود رودخانه تجن با استفاده از مدل QUAL2KW. مجله علوم و مهندسی بهداشت محیط، (۳)، صفحات ۲۰۴-۱۹۹.

مقیمی نژاد، س.، و ابراهیمی، ک.، و کراچیان، ر.، ۱۳۹۶. مطالعه تغییرات فصلی خود پالایی رودخانه کارون. مهندسی عمران امیرکبیر (امیرکبیر)، ۴۹(۴)، صفحات ۶۲۱-۶۳۴.

نوشادی، م. و حاتمی زاده، م.، ۱۳۹۰. اندازه‌گیری و شبیه‌سازی رودخانه کر با استفاده از مدل QUAL2KW. مجله آبیاری و زهکشی ایران.

ورسه، س.، پناهی. م.، خضری، م. و محمدی فاضل. ا.، ۱۳۹۳. بررسی اثر فعالیت‌های صنعتی بر نوسان COD، BOD و TSS در رودخانه تجن. نشریه علوم و مهندسی محیط‌زیست، ۱۳۹۳، ۱ (۲)، صفحات ۵۷-۴۵.

هاشمی، س، ز.، و غلامی سفیدکوهی، م. ع. و تبار احمدی، ض.، م.، ۱۳۹۷. ارزیابی و شبیه‌سازی کیفی رودخانه تالار با استفاده از مدل .QUAL2KW

Albuquerque, M. T. D., Antunes, I. M. H. R., Oliveira, N. P. and Pelletier, G., 2019. Impact of sewage effluent discharges prediction using QUAL2KW in a sensitive protected area: Portugal. SN Applied Sciences, 1(10): 1-8.

Chapra and Canale (2002). "Numerical Methods for Engineers, 4th Ed". New York, McGraw-Hill.

Jalalzadeh, A., Rabieifar, H., Vosoughifar, H., Razmkhah, A. and Fataei, E., 2020. Quality assessment of Zarrinehroud River Using Qual2k Simulation Model. Journal of Health and Hygien, 11(3): 384-396.

Ghorbani, Z., Amanipoor, H. and Battaleb-Looie, S., 2020. Water quality simulation of Dez River in Iran using QUAL2KW model. Geocarto International, 1-13.

Khonok, A., Tabrizi, M. S., Babazadeh, H., Saremi, A. and Ghaleni, M. 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.

Rafiee, G., Moezzi, F., Poorbagher, H., Rezaei Tavabe, K. and Nematollahi, M., 2022. Assessing water quality indices and self-purification capacity of Balighli-Chai and Ghare-Sou Rivers using QUAL2KW model. Environment and Water Engineering. doi: 10.22034/jewe.2022.336023.1756

Raeisi, N., Moradi, S. and Scholz, M., **2022**. Surface Water Resources Assessment and Planning with the QUAL2KW Model: A Case Study of the Maroon and Jarahi Basin (Iran). Water, 2022.14(5):705.

Torres-Bejarano, F. M., Verbel-Escobar, M. and Atencia-Osorio, M. C., 2022. Water quality model-based methodology to assess assimilative capacity of wastewater discharges in rivers. Global Journal of Environmental Science and Management, 8(4): 449-472.

Lusiana, N., Sulianto, A. A., Devianto, L. A. and Sabina, S., 2020. Penentuan Indeks Pencemaran Air dan Daya Tampung Beban Pencemaran Menggunakan Software QUAL2KW (Studi Kasus Sungai Brantas Kota Malang). Journal Wilayah dan Lingkungan, 8(2): 161-176. http://dx.doi.org/10.14710/jwl.8.2.161-176

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-06-08]