هیدروژئولوژی، سال هشتم، شماره ۱، تابستان ۱۴۰۲
Hydrogeology, Volume 8, No. 1, Summer 2023

شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه قره‌سو با استفاده از مدل QUAL2Kw

موسی اکبری نیاری[۱]، وحید رضاوردی‌نژاد*[۲]، جواد بهمنش[۳]، محمدرضا نیک‌پور[۴]

۱- دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۳- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
* نویسنده مسئول: v.verdinejad@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

چکیده

هدف از پژوهش حاضر، ارزیابی توانایی مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه قره‌سو استان اردبیل است. نظر به اینکه رودخانه قره‌سو تامین کننده اصلی آب سد مخزنی سبلان است که در آینده‌ای نزدیک از آن به عنوان آب شرب شهرستان مشگین شهر استفاده خواهد شد، لذا پایش دقیق کیفی رودخانه مذکور برای تدوین سیاست‌ها و برنامه-ریزی‌های مدیریتی بسیار حائز اهمیت است. بازه‌ای به طول ۷۱/۵ کیلومتر به عنوان مسیر مورد مطالعه انتخاب شد. برای مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل، اندازه‌گیری‌های میدانی در شش ایستگاه در ۱۴ آبان ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام گرفت. مقدار جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) برای پارامترهای دبی، هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات، pH، اکسیژن محلول، قلیائیت و دمای آب در مرحله واسنجی به‌ترتیب ۱/۱۷، ۵۰۵/۸، ۹/۲، ۰/۲۲، ۰/۳۵، ۱۰۹/۸۵ و ۲/۵۴ و در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب ۰/۵۱، ۲۱۲/۸۸، ۸۶/۱۱، ۱۰/۷۹، ۰/۸۹، ۵/۱۱، ۳۵/۵۴ و ۴/۸ به‌دست آمد. نتایج نشان داد روند تغییرات پارامترهای کیفی در طول مسیر مورد مطالعه به علت تخلیه پساب تصفیه خانه‌های فاضلاب شهرک صنعتی شماره ۲ و شهر اردبیل، کشتارگاه طیور سامیان و کشتارگاه صنعتی اردبیل به رودخانه قره‌سو با نوسانات شدید همراه بود. با این وجود، به دلیل توان بالای خودپالایی رودخانه، پارامترهای کیفی رودخانه در بازه‌های پایین‌دست مسیر مورد مطالعه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافت. همچنین دو سناریو با شرایط نزدیک به واقعیت تعریف گردید. نتایج سناریوها نشان داد که عملکرد مدل منطقی بوده و با افزایش دمای منابع آلاینده نقطه‌ای، کیفیت آب رودخانه کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: خودپالایی، رودخانه قره‌سو، کیفیت آب، مدل QUAL2Kw.

مقدمه

آب‌های سطحی جاری از مهم‌ترین منابع آبی هستند که نقش حیاتی در تأمین آب مورد نیاز بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت و شرب دارند. از سوی دیگر در دهه‌های اخیر، با رشد بی‌رویه جمعیت و توسعه واحدهای صنعتی، ورود آلاینده‌ها و پساب‌های صنعتی به محیط زیست و منابع آب افزایش یافته است. گسترش آلودگی منابع آب به‌خصوص آب-های سطحی، اکوسیستم‌های طبیعی و سلامت جوامع انسانی را به شدت تهدید می‌کند (ونانی و همکاران، ۱۴۰۱). یکی از نیازمندی‌های اصلی در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب، ارزیابی کیفیت آب رودخانه‌ها در ابعاد زمان و مکان است (خنک و همکاران، ۱۴۰۰). که مهم‌ترین عوامل مؤثر در کیفیت آب رودخانه‌ها، جنس سازندهای حوضه، رژیم آبدهی رودخانه و نقش آب‌های زیرزمینی در تامین آب رودخانه، نحوه‌ی استفاده از رودخانه، کمیت و کیفیت آب برگشتی و نیز نقش انسان می‌باشد (خدابخش و همکاران، ۱۳۹۸). از سوی دیگر، اندازه‌گیری میدانی پارامترهای کیفی آب در حجم بالا نیازمند زمان و هزینه زیاد است. از این‌رو، به‌کارگیری مدل‌های عددی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه و تخمین دقیق خصوصیات کیفی آن، ضروری به‌نظر می‌رسد. برای شبیه‌سازی

جریان رودخانه و پیش‌بینی پارامترهای کیفی آن، غالباً مدل-های عددی یک بعدی[1] به‌کار گرفته می‌شود. در این مدل‌ها، میانگین سرعت در جهت طولی جریان مبنای شبیه‌سازی قرار می‌گیرد و از مولفه‌های افقی و عمودی سرعت صرفنظر می‌شود (Marlina et al., 2018). از جمله این مدل‌ها می‌توان به QUAL2E، MIKE11، HSPF، WASP، EXAMS و SALMON-Q اشاره کرد (Kannel et al., 2011). در این میان، مدل‌های QUAL2EU و QUAL2KW جزء مدل‌های پیشرفته کیفیت آب محسوب شده و توسط محققان بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند (Raeisi et al., 2022).

Arora et al. (2020) در مطالعه‌ای پایش و شناسایی جریان آب رودخانه یامونای دهلی را با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام دادند. آن‌ها هم‌چنین از سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) برای شبیه‌سازی پارامترهای DO، BOD[2] (اکسیژن خواهی بیولوژیکی) و COD[3] (اکسیژن خواهی شیمیایی) رودخانه مذکور استفاده کردند. در تحقیق آن‌ها، برای تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم قطعیت در نتایج شبیه‌سازی از مدل مونت کارلو استفاده شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده آنها، به‌کارگیری مدل مونت کارلو در محیط QUAL2Kw می‌تواند به عنوان تصمیم گیرنده برای طراحی سیاست‌های مدیریت منابع آب و استفاده از استراتژی‌های مختلف کاهش آلاینده‌ها عمل کند. Betti et al. (2022) به بررسی کیفیت آب رودخانه کارنگ موموس به عنوان یکی از سرشاخه های رودخانه ماهاکم در شهر سامریندای کشور اندونزی؛ با استفاده از مدل Qual2kw پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که ظرفیت بار آلودگی رودخانه کارنگ موموس به‌ازای پارامترهای BOD، COD، DO، NH_4 و TSS از مقدار مجاز تعیین شده فراتر رفته است و برای استفاده شرب مناسب نیست. بنابراین لازم است بار آلودگی رودخانه کاهش یابد تا از آن بتوان به عنوان آب شرب استفاده نمود. Khadka et al. (2022) به واسنجی و اعتبارسنجی کیفیت آب رودخانه باگماتی در کشور نپال با استفاده از مدل Qual2Kw پرداختند. محدوده مورد مطالعه آن‌ها ۹/۵ کیلومتر از طول رودخانه بود و از پارامترهای DO، CBOD[4] (اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی کربنی)، pH و دما برای واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده کردند. نتایج تحقیق نشان داد که تغییرات در DO و CBOD در چهار ایستگاه منتخب از خوکانا تا کاتوال داها بسیار زیاد بود و پارامتر DO به طور قابل توجهی در بازه پایین دست افزایش داشت. Marlina et al. (2018) با استفاده از مدل Qual2Kw به بررسی تغییرات اثر پوشش ابر، سرعت باد و دمای آب بر غلظت BOD و DO به منظور انتخاب استراتژی مدیریت کیفیت آب در رودخانه وینونگو کشور اندونزی پرداختند. نتیجه مدل‌سازی حاکی از آن بود که متغیر پوشش ابر بر غلظت DO و BOD در رودخانه وینونگو تأثیر نمی‌گذارد و متغیر سرعت باد هم تنها تأثیر کمی بر تغییر غلظت DO و BODدر رودخانه وینونگو دارد. در حالی که تغییر دمای آب تأثیر معنی‌داری بر غلظت DO و تأثیر کمی بر غلظت BOD در رودخانه وینونگو دارد. Raeisi et al. (2022) با استفاده از مدل ریاضی QUAL2Kw شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه حوضه مارون و جراحی واقع در جنوب غربی ایران را انجام دادند. نتایج تحقیق بیانگر آن بود که رودخانه از نظر آلودگی اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD) به دلیل تخلیه پساب‌های شهری و صنعتی و همچنین هدایت الکتریکی (EC) به دلیل زهکشی زمین های کشاورزی، در شرایط بحرانی قرار دارد. همچنین نتایج مرحله اعتبارسنجی نشان داد که مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی حوضه رودخانه مارون و جراحی قابل اعتماد است. مطالعات مدل-سازی در ایران برای اولین بار در سال ۱۹۹۰ توسط سازمان خوار و بار جهانی (FAO) صورت گرفت (سعیدی رضوی و همکاران، ۱۳۹۲). زلقی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی شبیه‌سازی پارمترهای کیفی NO_3 و PO_4 را در هفت ایستگاه از رودخانه دز با استفاده از مدل کیفی Qual2kw انجام دادند و از مقادیر پارامترهای کیفی رودخانه و سایر اطلاعات به دست آمده از مطالعات صحرایی جهت واسنجی و پیش بینی مدل استفاده نمودند. نتایج حاصل از مدل، گویای شرایط واقعی رودخانه بود که نشان از توانایی بالای مدل Qual2kw در شبیه سازی پارامترهای کیفی بود. امامقلی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی دیگر به بررسی مقایسه‌ای کیفیت جریان آب رودخانه در شرایط موجود و در شرایط تغییرپذیری در هندسه آبراهه اصلی رودخانه قزل اوزن پرداختند. آن‌ها برای شبیه‌سازی شرایط موجود رودخانه از دو مدل ریاضی کیفیت آب Qual2kw و WASP استفاده کردند. آن‌ها، پارامترهای مختلف

[1] One dimensional (1D)
[2] Biological Oxygen Demand
[3] Chemical Oxygen Demand
[4] Carbonaceous Bological Oxygen Demand

کیفی و هیدرولیکی آب شامل DO، BOD، COD، Norg[5] (نیتروژن آلی)، NH_3، دبی، عمق آب، دما و pH مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که هر دو مدل دارای توانایی مناسبی در شبیه‌سازی شاخص‌های کیفی آب هستند. محمدی قلعه‌نی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی به ارزیابی میزان تغییرات اکسیژن محلول رودخانه سفید رود در اثر تغییر پارامترهای موثر بر آن در محیط مدل Qual2kw پرداختند. در تحقیق آن‌ها آنالیز حساسیت مدل Qual2kw با استفاده از نرم افزار YASAIw انجام گرفت. طبق نتایج کمترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای پارامتر pH به ترتیب برابر ۰/۰۶ و ۰/۰۴ و بیشترین آن برای پارامتر فسفر کل به ترتیب برابر ۱/۰۸ و ۰/۹۶ به‌دست آمد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که اکسیژن محلول در رودخانه سفید رود بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به ضریب هوادهی، عمق جریان و ضریب زوال اکسیژن خواهی بیولوژیکی دارد. نیک اختر و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی کیفیت آب رودخانه ارداک از منابع تامین کننده آب شرب شهر مشهد با به‌کارگیری مدل Qual2kw پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که مدل در مورد پارامترهای DO، pH، COD، NO_3 تطابق خوبی با واقعیت دارد و قادر است به خوبی وضعیت پارامترهای کیفی آب را در هر دو شاخه از رودخانه ارداک شبیه‌سازی نماید. مقصودی و همکاران (۱۴۰۰) کیفیت آب رودخانه بهشت آباد را با استفاده از مدل Qual2kw شبیه سازی کردند. آن‌ها کیفیت آب این رودخانه را در دو سرشاخه تشکیل دهنده آن، با طراحی دو سناریو جهت بهبود آن در پائین دست تحلیل کردند. پارامترهای کیفی شبیه سازی شده آن‌ها شامل دما، EC، TS، DO، BOD، COD، pH، نیترات، اورتوفسفات، آمونیوم، کلیفرم مدفوعی در دو سناریو با دبی متفاوت بود. نتایج تحقیق نشان داد که با جلوگیری از تخلیه آب رودخانه‌های بالادست (کیار و جونقان) به رودخانه بهشت‌آباد به دلیل آلودگی زیاد آن‌ها و همچنین اضافه شدن آب چشمه باغ رستم در ادامه مسیر، کیفیت آب این رودخانه در پائین‌دست بهبود خواهد یافت. خنک و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی دقت نرم افزار Qual2kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی رودخانه سفید رود در پائین-دست سد سفید رود پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که نرم افزار Qual2kw توانایی لازم برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود را دارد. به طوری که بیشترین و کمترین دقت مدل برابر با ۳/۳ و ۴۷/۵ درصد به ترتیب برای پارامترهای pH و نیتروژن کل حاصل شد. محمدی و همکاران (۱۳۹۸) در تحقیقی به واسنجی مدل Qual2kw با استفاده از الگوریتم چرخه آب (WCA) پرداختند. آن‌ها برای این منظور داده‌های کیفی رودخانه یامورا در هند را مورد بررسی قرار دادند و نتایج واسنجی حاصل از دو الگوریتم ژنتیک و WCA را مقایسه کردند و در نهایت نتیجه گرفتند که الگوریتم WCA نسبت به الگوریتم ژنتیک در واسنجی مدل Qual2kw از عملکرد و دقت مطلوب‌تری برخوردار است و می‌توان از آن برای کالیبراسیون مدل استفاده کرد. ونائی و همکاران (۱۴۰۱) پارامترهای اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی و شیمیایی رودخانه عباس آباد همدان را با استفاده از مدل Qual2kw در فصل‌های بهار (تر) و تابستان (خشک) بررسی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که روند تغییرات اکسیژن محلول در فصول تر و خشک تقریبا یکنواخت و خطی بوده که ناشی از شیب زیاد و هوادهی بالای رودخانه می‌باشد. هدف از پژوهش حاضر، شبیه‌سازی پارامترهای اصلی کیفیت آب رودخانه قره سو واقع دراستان اردبیل شامل دبی جریان، دمای آب، pH، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات و قلیائیت با استفاده از مدل Qual2kw بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در شش ایستگاه می‌باشد. از آنجایی که رودخانه قره‌سو تامین کننده اصلی آب سد مخزنی سبلان است که در آینده‌ای نزدیک برای مصرف آب شرب شهرستان مشگین‌شهر مورد استفاده قرار خواهد گرفت و با توجه به این که انواع آلاینده‌های شهری، کشاورزی و صنعتی به این رودخانه وارد می‌شود لذا پایش دقیق کیفی این رودخانه ضروری به نظر می‌رسد و واسنجی و صحت‌سنجی مدل Qual2kw برای رودخانه قره‌سو و ارزیابی توان خودپالایی آن، می‌تواند برای اتخاذ تدابیر و رویکردهای آتی منطقه مفید باشد. تاکنون یک تحقیق در مورد شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه قره‌سو با مدل Qual2kw انجام شده است که در آن منابع آلاینده اصلی موجود در مسیر رودخانه از جمله پساب تصفیه خانه فاضلاب شهر اردبیل، پساب کشتارگاه طیور سامیان و کشتارگاه صنعتی اردبیل مدل‌سازی نشده است؛ همچنین واسنجی مدل تهیه شده نیز در طی یک‌سال و با داده‌های اخذ شده از سازمان‌ها و ارگان‌ها انجام یافته است (حسینی، ۱۳۹۸).

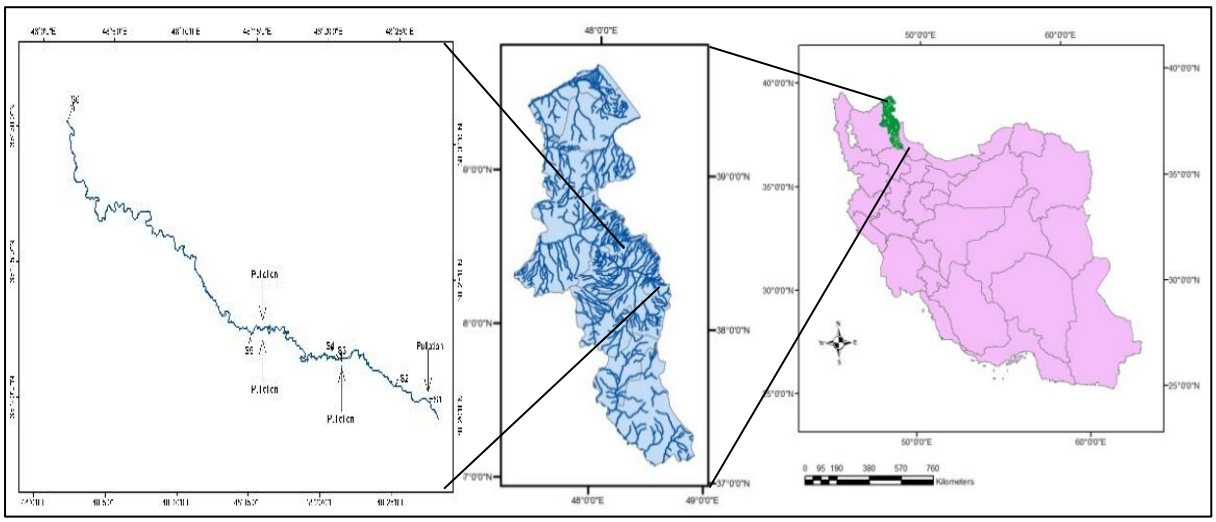
[5] Organic Nitrogen

ولی در تحقیق حاضر، اولا کلیه منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در مسیر رودخانه درمدل‌سازی لحاظ شده است. ثانیا واسنجی و صحت سنجی مدل با به‌کارگیری داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی دو ساله انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رود خانه قره‌سو با ۲۸۵ کیلومتر طول و حدود ۵۵۴ میلیون مترمکعب متوسط آبدهی سالانه، طویل‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه داخلی استان اردبیل به شمار می‌رود و از رشته‌کوه‌های تالش (باغرو) در شرق استان اردبیل سرچشمه می‌گیرد و در مسیر خود ضمن عبور از دشت اردبیل، آب‌های جاری این قسمت از جمله بالخلی‌چای را جمع‌آوری می‌نماید و سرانجام در محل شهرستان اصلاندوز به رودخانه مرزی ارس تخلیه می شود. از آنجایی که رودخانه قره سو در مسیر جریان خود محل ورود و تخلیه فاضلاب های خانگی، پساب‌های صنعتی و زه‌آب‌های کشاورزی زیادی است و با توجه به این‌که هر رودخانه تا حدود معینی ظرفیت پذیرش آلاینده های ورودی و خودپالایی آن‌ها را دارد؛ لذا توجه به نقش و توان خود پالایی رودخانه قره‌سو و شبیه‌سازی کیفیت آب آن به عنوان یکی از مهمترین رودخانه‌های دائمی استان اردبیل و تامین کننده آب سد مخزنی سبلان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (حسینی، ۱۳۹۸). در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه.

Figure 1- Geographical location of the study area.

مدل QUAL2Kw

مدل QUAL2Kw آخرین مدل از سری مدل‌های QUAL است که توسط Pelletier et al. (2006) در دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تافت در ایالت ماساچوست آمریکا تهیه شده است. این مدل قابلیت انجام تجزیه و تحلیل عدم قطعیت را داراست و می‌تواند معادلات مربوط به رودخانه را هم در شرایط دائمی و هم در شرایط شبه‌دینامیکی حل کند (Pelletier et al. 2006). روابط حاکم بر QUAL2Kw، معادلات مربوط به حرکت افقی، پراکنشی و عکس‌العملی توده آب، همراه با در نظر گرفتن منابع خارجی وارد شونده و یا خارج شونده از سیستم است. یک تعادل جریانی فرض شده و جریان پایدار و غیر یکنواخت برای حل جابه‌جایی افقی توده‌ها استفاده می‌شود (عاشق معلا، ۱۳۹۴). روابط بیلان به‌کار برده شده در مدل QUAL2Kw، شامل بیلان جریان، بیلان دما و بیلان جرم است. رابطه بیلان جریان برای بازه iام از رودخانه در مدلQUAL2Kw، به‌صورت رابطه ۱ تعریف می‌شود:

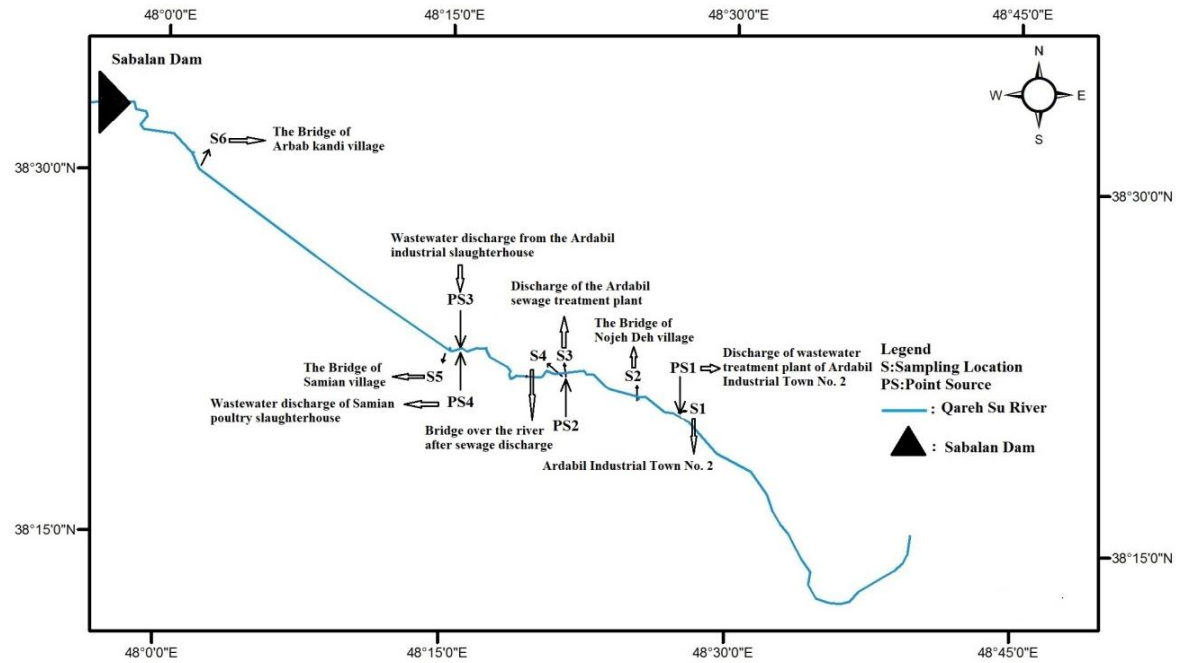
$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{ab,i} \qquad (۱)$$

که در آن Q_i دبی خروجی از بازه i ام، Q_{i-1} دبی ورودی به بازه i ام، $Q_{in,i}$ دبی آلاینده ورودی به بازه i ام، $Q_{ab,i}$ دبی آلاینده خروجی از بازه i ام که مجموع آلاینده های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای را شامل می‌شود.

معادله اصـــلی که مدل مذکور، به حل آن می‌پردازد، معادله جابجایی/پخش یک بعدی ا ست. رابطه بیلان جرم برای بازه i ام از رودخانه، در مدل QUAL2Kw به‌صورت رابطه ۲ تعریف می شود:

$$\frac{dci}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}c_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}c_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i}c_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(c_{i-1} - c_i) + \frac{E'_i}{V_i}(c_{i+1} - c_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \quad (۲)$$

هر یک از ترم‌های این رابطه، تغییرات غلظت ماده مورد نظر (جزء کیفی آب) نسبت به زمان را بیان می‌کند. در این رابطه، S_i نشان دهنده Sink و یا Source جزء کیفی در اثر واکنش‌ها و مکانیزم‌های انتقال جرم است. C_i غلظت جزء کیفی در آب رودخانه، Q_i دبی خروجی از بازه i ام، Q_{i-1} دبی ورودی به بازه i ام، $Q_{ab,i}$ دبی آلاینده خروجی از بازه i ام که مجموع آلاینده‌های نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای را شامل می‌شود، V حجم آب، E' ضریب پخشیدگی حجمی بین بازه i و i+1 ، W_i مقدار خالص حرارت دریافت شده از منابع نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای به بازه iام. لازم به ذکر است که رابطه بیلان جرم فوق، برای تمامی اجزاء به جز جلبک کف آبراهه، مورد استفاده قرار می‌گیرد (طاهری سودجانی و همکاران، ۱۳۹۴). برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه، دبی، شیب طولی رودخانه بین هر ایستگاه، ضریب مانینگ، عرض کف، شیب دیواره، فاصله بین هر کدام از ایستگاه‌ها، دمای متوسط هوا، دمای نقطه شبنم، دمای آب، سرعت باد، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، تعداد روزهای ابری، درصدی از رودخانه که در اثر کوه‌ها و پوشش گیاهی زیر سایه قرار گرفته‌اند، و اینکه آیا در کف رودخانه جلبک وجود دارد یا خیر، مورد نیاز مدل می‌باشد (ونائی و همکاران، ۱۴۰۱). در پژوهش حاضر، تعداد شش ایستگاه نمونه‌برداری بر روی رودخانه قره سو از محل شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل تا پل روستای ارباب کندی (به طول ۷۱/۵ کیلومتر) انتخاب گردید. در شکل ۲، موقعیت جغرافیایی محل‌های نمونه‌برداری و منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در مسیر مورد مطالعه، نشان داده شده است. شبیه سازی دبی، دما، هدایت الکتریکی، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات، قلیائیت و pH آب رودخانه قره‌سو در آبان ماه سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ انجام گرفت. عملیات برداشت اطلاعات و داده‌های کیفی رودخانه قره سو در تاریخ‌های ۱۴ آبان ماه ۱۴۰۰ و ۱۳ آبان ماه ۱۴۰۱ انجام گرفت. از داده‌های آبان ماه ۱۴۰۰ به‌منظور واسنجی و از داده‌های آبان ماه ۱۴۰۱ برای صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. داده‌های قابل اندازه گیری در محل‌های نمونه برداری با رعایت اصول نمونه‌برداری انجام گرفت و نمونه‌ها با رعایت کلیه استانداردها برای انجام آزمایش‌های مربوطه به آزمایشگاه منتقل شدند.



شکل ۲- موقعیت جغرافیایی محل‌های نمونه‌برداری و منابع آلاینده نقطه‌ای.

Figure 2. Geographical location of sampling locations and point pollutant sources.

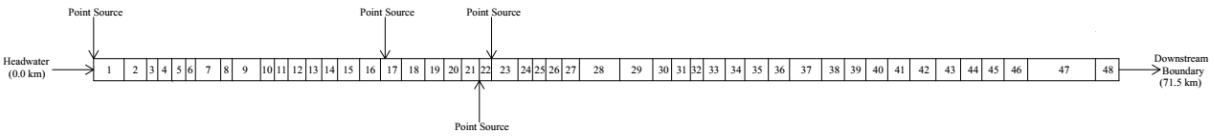
از ایستگاه‌های نمونه‌برداری در ماه‌های مورد بررسی نمونه-برداری گردید و آزمایش‌های کیفی مورد نیاز انجام شد. برای تعیین ماه بحرانی از نظر کیفیت آب رودخانه، با توجه به شناخت میدانی از رودخانه و بی‌آب بودن رودخانه در فاصله زمانی خرداد تا شهریور به دلیل استفاده کشاورزان از آب رودخانه در بالادست، ماه آبان به عنوان ماه خشک رودخانه انتخاب گردید. با توجه به این که منابع آلاینده غیرنقطه‌ای قابل ملاحظه‌ای در طول مسیر مورد مطالعه وجود نداشت بنابراین فقط منابع آلاینده نقطه‌ای مدل‌سازی گردید که جدول ۱ عناوین منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در طول مسیر مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

جدول ۱- عناوین منابع آلاینده نقطه‌ای موجود در طول مسیر مورد مطالعه.
Table 1- Titles of point pollutant sources along the studied route.

Name of point source	Point Source
Discharge of wastewater treatment plant of Ardabil Industrial Town No. 2	PS1
Discharge of the Ardabil sewage treatment plant	PS2
Wastewater discharge from the Ardabil industrial slaughterhouse	PS3
Wastewater discharge of Samian poultry slaughterhouse	PS4

شبیه‌سازی هندسی رودخانه در مدل QUAL2Kw

مدل QUAL2Kw سیستم رودخانه را به صورت شبکه‌ای متشکل از سراب، بازه و تقاطع تقسیم می‌کند. سراب محل شروع رودخانه است. بازه، طول رودخانه و تقاطع محل ریختن شاخه فرعی به شاخه اصلی است. انتخاب طول بازه باید به گونه‌ای انجام شود که در طول آن، مشخصات هندسی (نظیر سطح مقطع، شیب، ضریب زبری) و ضرایب بیولوژیکی (نظیر سرعت زوال، ثابت سرعت ته‌نشینی) ثابت باشد (عاشق‌معلا و همکاران، ۱۳۹۴). این تقسیم‌بندی برای رودخانه قره سو مطابق شکل ۳ انجام پذیرفت.



شکل ۳- نحوه بازه‌بندی مسیر رودخانه قره‌سو.
Figure 3- How to divide the route of Qarasu river.

عملیات واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

هدف از واسنجی، صرفاً یکی کردن نتایج مدل با نتایج اندازه‌گیری شده نیست، بلکه عملیات وا سنجی باید با دید میدانی، دقت مهندسی و دلیل منطقی برای ایجاد تغییرات باشد. همچنین تاثیر تغییر پارامترها بر یکدیگر مشخص می‌شود (Turner et al., 2009). برای واسنجی مدل اصول و ضوابطی رعایت می شود تا اختلاف مقادیر برداشت شده و شبیه سازی شده تا حد امکان منطبق شود. به توصیه Sener et al. (2017) و Kannel et al. (2011) ابتدا به‌ترتیب پارامترهای دبی، سرعت و عمق جریان و سپس پارامترهای دما، هدایت الکتریکی و در انتها پارامترهای وابسته به اکسیژن واسنجی می‌شود. علت این ترتیب، تأثیر سایر پارامترها بر روی پارامترهای DO و BOD می‌با شد. عملیات وا سنجی برای تک تک پارامترها انجام می شود تا با کاهش مقدار خطای مدل، مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه سازی شده به یکدیگر نزدیک شوند (Kannel et al., 2011). با مقایسه اطلاعات اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، می‌توان علت عدم تطابق این مقادیر را مشخص کرد. بدین منظور برای هر پارامتر به غیر از دبی، در مرحله واسنجی از پنج داده اندازه‌گیری شده و در مرحله صحت‌سنجی از شش داده اندازه‌گیری شده استفاده شد. برای دبی در هر دو مرحله واسنجی و صحت سنجی از دو داده اندازه‌گیری شده استفاده شد.

تعریف سناریوها

بعد از صحت سنجی مدل، به منظور ا ستفاده از نتایج مدل در جهت کمک به تدوین سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی، سناریوهای اول و دوم با توجه به توسعه شهر اردبیل و به دنبال آن افزایش پساب تصفیه خانه‌ها و همچنین ادامه‌دار بودن خشکسالی‌های اخیر با لحاظ شرایط نزدیک به واقعیت تعریف گردید. به طوری که سناریوی اول با ویژگی‌های کاهش ۲۰ درصدی دبی سرشاخه رودخانه و کاهش ۵۰ درصدی پارامترهای کیفی منابع آلاینده نقطه‌ای، ثابت نگه داشتن دمای منابع آلاینده نقطه‌ای و افزایش دو برابری دبی منابع مذکور و سناریوی دوم با ویژگی های سناریوی اول ولی با افزایش دو برابری دمای پساب منابع آلاینده نقطه‌ای مطابق جداول شماره ۲ و ۳ تعریف گردید. سپس مدل برای هر سناریو اجرا گردید که خروجی مدل در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. جدول ۴ مقادیر درصد افزایش یا کاهش پارامتر های کمی و کیفی آب رود خانه قره سو را در سناریوی اول نسبت به مرحله صحت سنجی و جدول ۵ مقادیر درصد افزایش یا کاهش پارمترهای کمی و کیفی آب رودخانه قره سو را در سناریوهای اول و دوم نسبت به مرحله صحت‌سنجی و سناریوی دوم را نسبت به سناریوی اول نشان می‌دهد.

جدول ۲- ویژگی‌های سناریوی اول.

Table 2- Characteristics of the first scenario.

Parameter	Percentage of Increase/Decrease
Headwater of the river	-20%
Discharge of Point Pollutant Sources	200%
Temperature of Point Pollutant Sources	Constant
Electrical conductivity of Point Pollutant sources	200%
Dissolved Oxygen of Point Pollutant sources	-50%
Biochemical Oxygen Demand of Point Pollutant sources	200%
Electrical conductivity of Point Pollutant sources	200%
Nitrate of Point Pollutant sources	200%
Alkalinity of Point Pollutant sources	200%
pH of Point Pollutant sources	Constant

جدول ۳- ویژگی‌های سناریوی دوم.

Table 3- Characteristics of the second scenario.

Parameter	Percentage of Increase/Decrease
Headwater of the river	-20%
Discharge of Point Pollutant Sources	200%
Temperature of Point Pollutant Sources	200%
Electrical conductivity of Point Pollutant sources	200%
Dissolved Oxygen of Point Pollutant sources	-50%
Biochemical Oxygen Demand of Point Pollutant sources	200%
Electrical conductivity of Point Pollutant sources	200%
Nitrate of Point Pollutant sources	200%
Alkalinity of Point Pollutant sources	200%
pH of Point Pollutant sources	Constant

جدول ۴- مقادیر درصد افزایش یا کاهش پارامترها در سناریوی اول نسبت به مرحله صحت سنجی.

Table 4- The values of the percentage increase or decrease of the parameters in the first scenario compared to the validation stage.

Parameter	Percentage of Increase/Decrease
Q (m^3/s)	43.26
T (c°)	7.27
EC (µmhos/cm)	16.64
DO (mg/l)	-7.62
BOD_5 (mg/l)	57.56
NO_3 (mg/l)	53.83
Alkalinity ($mgCaco_3/l$)	47.45
pH	-0.99

جدول ۵- مقادیر درصد افزایش یا کاهش پارامترها در سناریوهای اول و دوم نسبت به مرحله صحت سنجی و سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول.

Table 5- The values of the percentage increase or decrease of the parameters in the first and second scenarios compared to the validation stage and the second scenario compared to the first scenario.

Parameter	The percentage increase/decrease of the first scenario compared to the results of the validation stage	The percentage increase/decrease of the second scenario compared to the results of the validation stage	The percentage increase/decrease of the second scenario compared to the first scenario
Q (m^3/s)	43.26	43.26	0.11
T (c°)	7.27	36.93	32.2
EC (µmhos/cm)	16.64	15.64	0
DO (mg/l)	-7.62	-17.79	-9.66
BOD_5 (mg/l)	57.56	56.41	0.07
NO_3 (mg/l)	53.83	52.11	-3.18
Alkalinity ($mgCaco_3/l$)	47.45	46.78	0.57
pH	-0.99	0.11	1.09

محاسبه خطا در مدل QUAL2Kw

در پژوهش حاضر برای ارزیابی دقت مدل عددی از شاخص‌های درصد خطای نسبی[6]، میانگین خطای مطلق[7] و جذر میانگین مربعات خطا[8] مطابق روابط ۳ تا ۵ استفاده شد (Kannel et al. 2011). در روابط مذکور، S_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار اندازه‌گیری شده و n تعداد ایستگاه‌های پایش است.

$$PRE = \frac{|O_i - S_i|}{S_i} \times 100 \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|S_i - O_i|}{n} \quad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۵)$$

یافته‌های پژوهش

جدول ۶ مقادیر میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات را برای مرحله واسنجی و مرحله صحت سنجی نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۲ می‌توان دریافت که

[6] Percentage of Relative Error
[7] Mean Absolute Error
[8] Root Mean Square Error

دقت شبیه‌سازی پارامترهای دما، اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات و pH در مرحله واسنجی بالا و با توجه راهنمای تئوری مدل قابل قبول می‌باشد. دقت شبیه-سازی پارامترهای دبی، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH نیز در مرحله صحت سنجی بالا می‌باشد.

خروجی مدل

پارامترهای کیفی آب رودخانه قره سو در ۴۸ بازه در آبان ماه سال‌های ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱ شبیه سازی شد و نمودارهای تغییرات مقادیر و غلظت‌های پارامترهای مورد مطالعه در رودخانه قره‌سو در شکل ۴ نشان داده شده است.

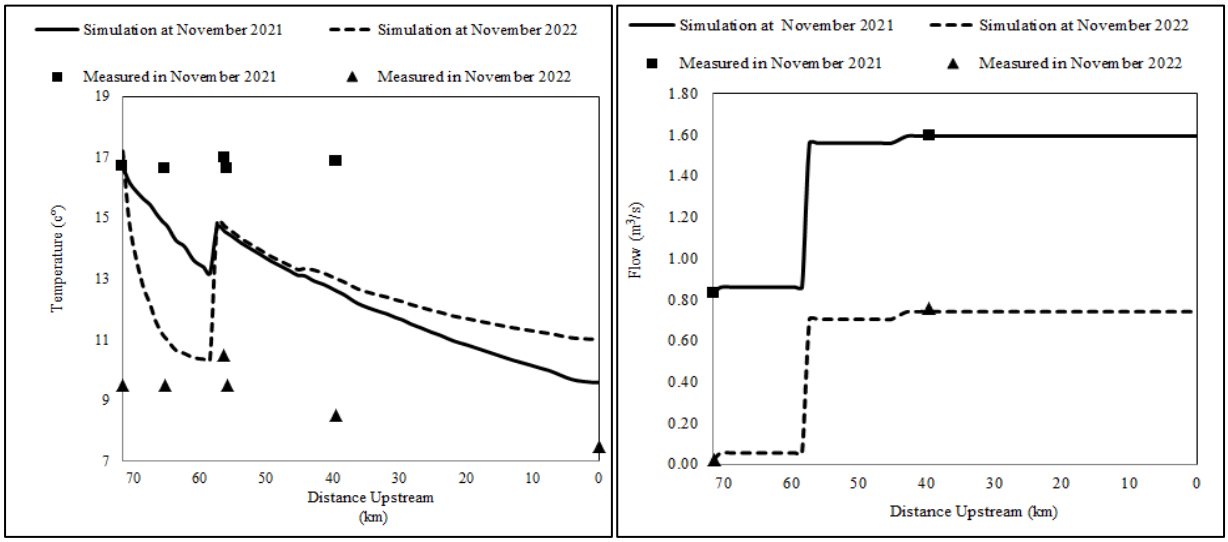
خروجی مدل در سناریوی اول

نمودارهای تغییرات مقادیر و غلظت‌های پارامترهای مورد مطالعه سناریوی اول و مقایسه آن با مرحله صحت‌سنجی در شکل ۵ نشان داده شده است.

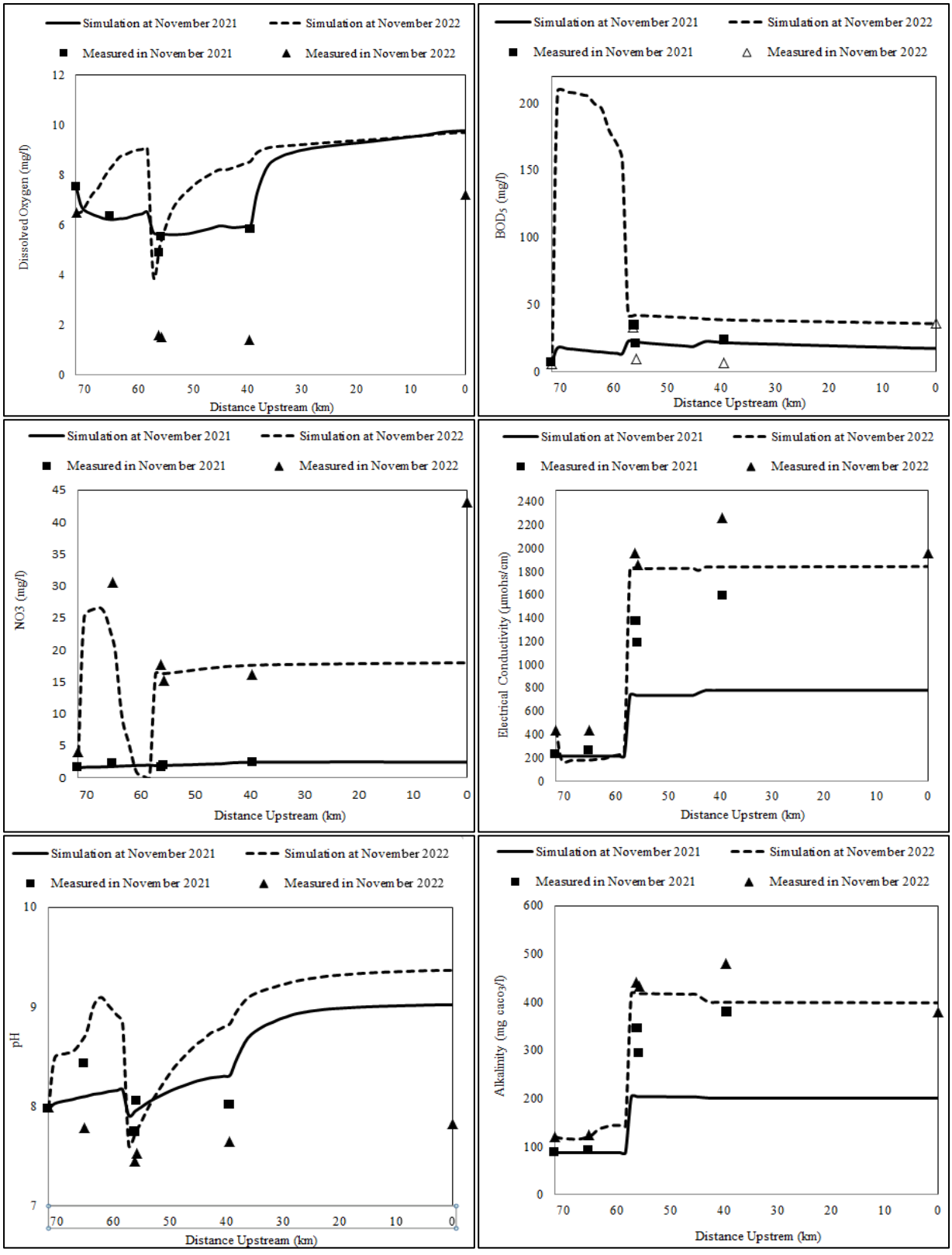
جدول ۶- مقادیر درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مراحل واسنجی و صحت سنجی.

Table 6- values of percentage of relative error, average absolute error and root mean square error of calibration and validation stages.

	Calibration			Validation		
Parameter	PRE	MAE	RMSE	PRE	MAE	RMSE
Q (m^3/s)	0.16	0.00	0.01	1.25	0.0	0.01
T (c°)	13.08	2.13	2.54	21.67	3.62	4.2
EC (µmhos/cm)	30.43	389.44	505.8	15.2	157.64	212.9
DO (mg/l)	4.28	0.22	0.35	212.36	4.3	5.1
BOD_5 (mg/l)	12.51	6.38	9.22	160.02	46.45	86.11
NO_3 (mg/l)	7.95	0.16	0.22	18.06	6.16	10.79
Alkalinity ($mgCaco_3/l$)	24.69	82.97	109.85	5.60	23.43	35.54
pH	2.33	0.17	0.22	9.73	0.70	0.89

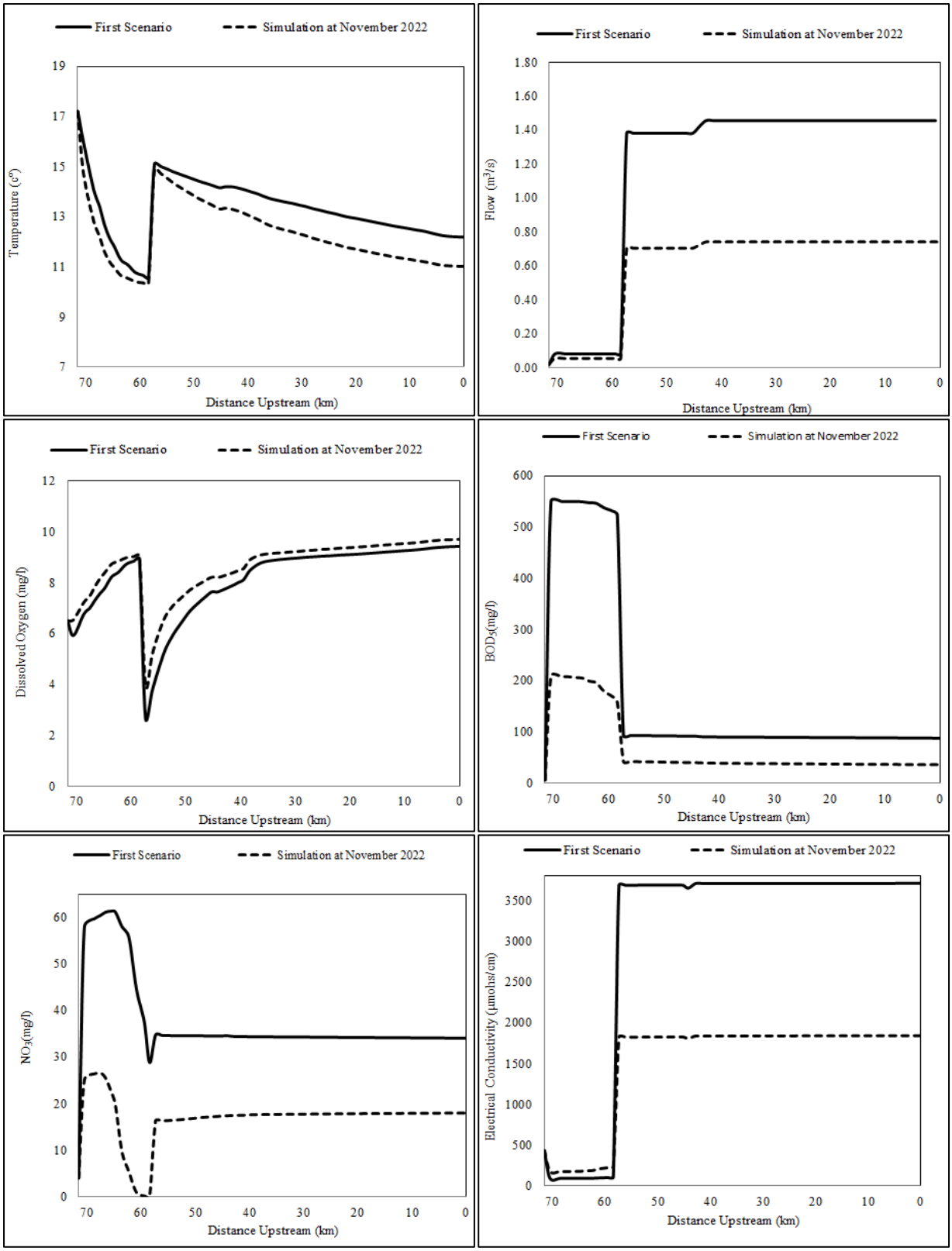


شکل ۴- واسنجی و صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.



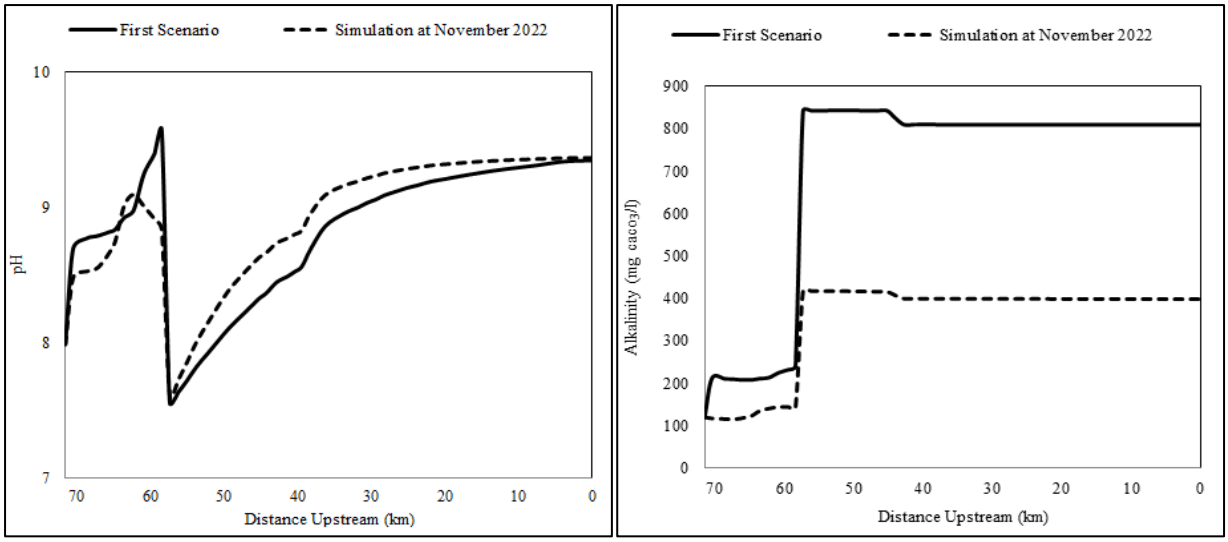
ادامه شکل ۴- واسنجی و صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.

Figure 4- Calibration and validation of the QUAL2Kw model for the parameters of flow, temperature, BOD_5, DO, EC, NO_3, alkalinity and pH in the Qarasu River of Ardabil.



شکل ۵- مقایسه نتایج سناریوی اول با نتایج مرحله صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.

Figure 5- Comparison of the results of the first scenario with the results of the validation stage of the QUAL2Kw model for the parameters of flow, temperature, BOD_5, DO, EC, NO_3, alkalinity and pH in the Qarasu River of Ardabil.

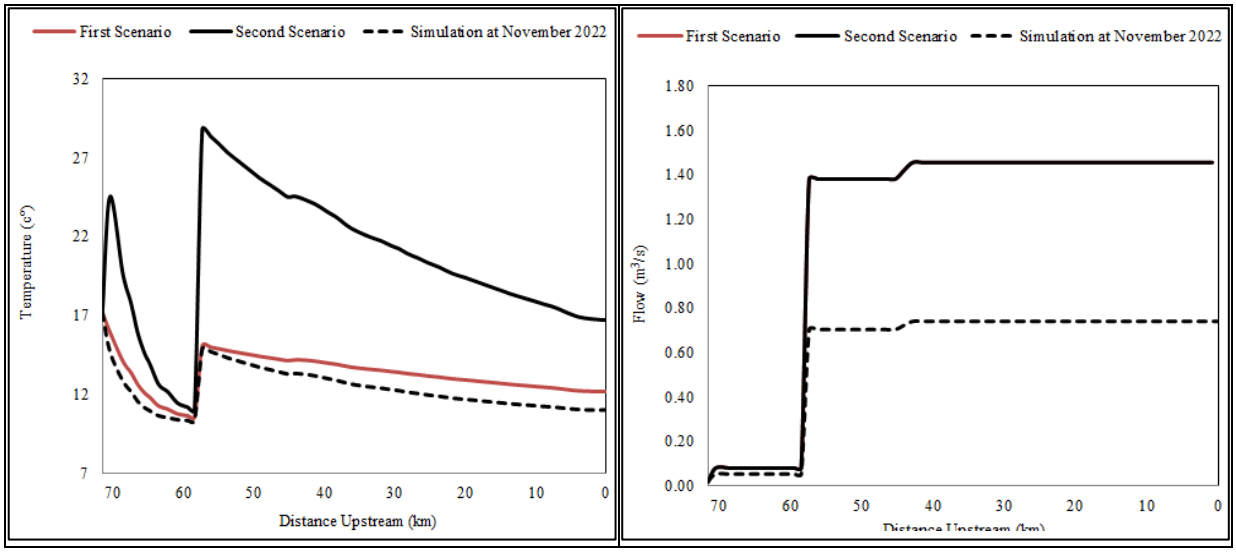


ادامه شکل ۵- مقایسه نتایج سناریوی اول با نتایج مرحله صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.

Figure 5- Comparison of the results of the first scenario with the results of the validation stage of the QUAL2Kw model for the parameters of flow, temperature, BOD_5, DO, EC, NO_3, alkalinity and pH in the Qarasu River of Ardabil.

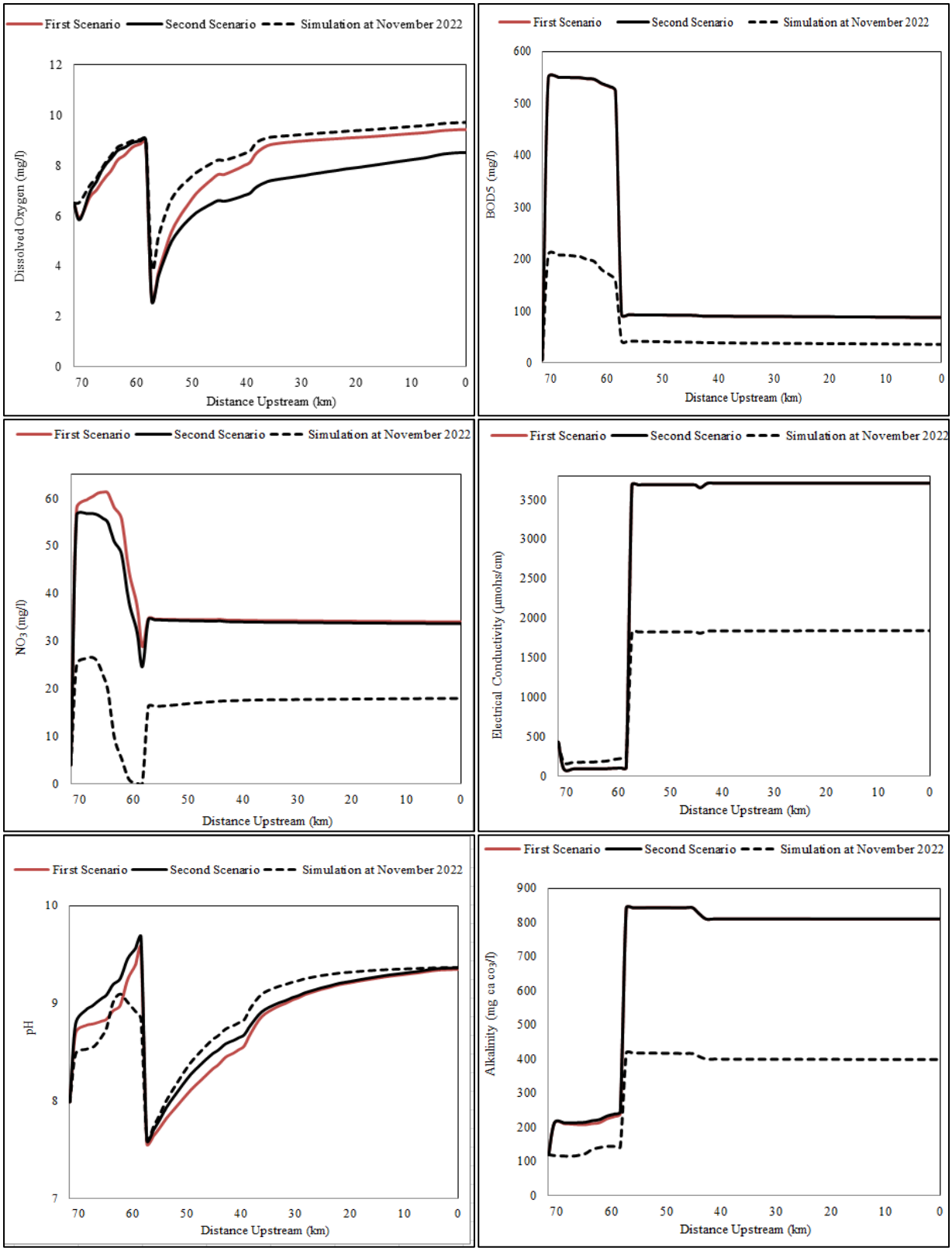
خروجی مدل در سناریوی دوم

نمودارهای تغییرات مقادیر و غلظت‌های پارامترهای مورد مطالعه سناریوی دوم و مقایسه آن با سناریوی اول و مرحله صحت‌سنجی در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- مقایسه نتایج سناریوهای اول و دوم با نتایج مرحله صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.

Figure 6- Comparison of the results of the first and second scenarios with the results of the validation stage of the QUAL2Kw model for the parameters of flow, temperature, BOD_5, DO, EC, NO_3, alkalinity and pH in the Qarasu river of Ardabil.



ادامه شکل ۶- مقایسه نتایج سناریوهای اول و دوم با نتایج مرحله صحت سنجی مدل QUAL2Kw برای پارامترهای دبی، دما، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، اکسیژن محلول، هدایت الکتریکی، نیترات، قلیائیت و pH در رودخانه قره‌سو اردبیل.

Figure 6- Comparison of the results of the first and second scenarios with the results of the validation stage of the QUAL2Kw model for the parameters of flow, temperature, BOD_5, DO, EC, NO_3, alkalinity and pH in the Qarasu river of Ardabil.

نتایج و بحث

تحلیل مقادیر به دست آمده از مدلQUAL2KW

عملیات شبیه سازی از بالادست رودخانه (ایستگاه شهرک صنعتی فاز دو اردبیل) شروع و تا پایین‌دست رودخانه (ایستگاه پل روستای ارباب کندی) انجام گرفت. نمودارهای اشکال۴ تا ۶ بیانگر مقادیر شبیه سازی شده در ۴۸ بازه مدل QUAL2Kw می‌باشد. به ترتیب پارامترهای دبی جریان، هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات، اکسیژن محلول، دمای آب، pHآب و قلیائیت شبیه سازی شدند. با توجه به مقادیر به دست آمده، از آنجایی که در اصول بازه‌بندی، باید ابتدا و انتهای عملیات شبیه سازی را برای مدل مشخص کرد، ابتدای شبیه‌سازی، ایستگاه شهرک صنعتی فاز دو اردبیل و انتهای آن ایستگاه پل روستای ارباب کندی تعیین شده است. به طور خلاصه، مدل عملیات شبیه سازی را از نقطه ۷۱/۵ کیلومتر (ایستگاه شهرک صنعتی فاز دو اردبیل) با توجه به مقادیر وارد شده شروع کرده و تا نقطه صفر (ایستگاه پل روستای ارباب کندی) ادامه می‌دهد و در طی این مسیر، مقدار ۸ پارامتر برای هریک از ۴۸ بازه، گزارش می‌کند. تغییرات ناگهانی در نقاطی است که پساب در آن تخلیه گردیده است. که از این نقاط به عنوان منابع نقطه‌ای نام برده شده است. مقادیر جهش یافت در بازه‌های ۱۷، ۲۲ و ۲۳ اتفاق افتاده است. علت این تغییر ناگهانی در مقادیر پارامترها، تخلیه پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در بازه ۱۷، تخلیه پساب کشتارگاه طیور سامیان در بازه ۲۲ و تخلیه پساب کشتارگاه صنعتی اردبیل در بازه ۲۳ به این رودخانه می‌باشد. در ادامه، تحلیل مقادیر به‌دست آمده از مدل QUAL2Kw و تاثیرات منابع نقطه‌ای مذکور بر هر پارامتر شبیه‌سازی شده مورد بررسی قرار گرفته است.

دبی جریان

در مرحله واسنجی در سرشاخه، دبی رودخانه قره‌سو ۰/۸۳ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که با اضافه شدن دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست، دبی رودخانه به ۱/۵۳ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۰/۱۶ در صد، صفر و ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی مدل در مرحله واسنجی دارد. در مرحله صحت‌سنجی در سرشاخه، دبی رودخانه قره‌سو ۰/۰۲۲ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که با اضافه شدن دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست، دبی رودخانه به ۰/۶۷۲ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۱/۲۵ در صد، صفر و ۰/۰۱ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد.

دمای آب

در مرحله واسنجی در سرشاخه، دمای رودخانه ۱۶/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با طی مسیر، دمای آب کم شده است ولی با اضافه شدن دبی پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دمای ۱۶/۵ درجه سانتی‌گراد، یک جهش در منحنی شبیه سازی اتفاق می‌افتد بعد از آن نیز روند کاهشی نمودار دوباره ادامه پیدا می‌کند. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۳/۰۸ درصد، ۲/۱۳ و ۲/۵۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نشان از دقت نسبتاً بالای شبیه‌سازی دما توسط مدل در مرحله واسنجی دارد. در مرحله صحت‌سنجی در سرشاخه، دمای رودخانه ۱۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که با طی مسیر دمای آب کاهش یافته است ولی با اضافه شدن دبی پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست، به میزان ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و با دمای ۱۵ درجه سانتی‌گراد، شبیه سازی دما روند افزایشی دارد. با طی مسیر دوباره روند کاهشی منحنی شبیه‌سازی دما ادامه می‌یابد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به‌ترتیب ۲۱/۶۷ در صد، ۳/۶۲ و ۴/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که نشان از دقت متوسط شبیه‌سازی دما توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد.

هدایت الکتریکی

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار هدایت الکتریکی رودخانه ۲۲۲ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد که با طی

مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و هدایت الکتریکی ۱۳۷۷ میکروموس بر سانتی‌متر، منحنی شبیه‌سازی هدایت الکتریکی در محل تخلیه پساب مذکور روند افزایشی دارد. بعد از آن با طی مسیر به سمت پائین‌دست شبیه‌سازی هدایت الکتریکی روند ثابتی را دارد. در صد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۳۰/۴۳ درصد، ۳۸۹/۴۵ و ۵۰۵/۸ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد که نشان از دقت نسبی شبیه سازی هدایت الکتریکی توسط مدل در مرحله واسنجی دارد. در مرحله صحت‌سنجی در سرشاخه، مقدار هدایت الکتریکی رودخانه ۴۳۴ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و هدایت الکتریکی ۱۹۵۶ میکروموس بر سانتی‌متر، منحنی شبیه سازی هدایت الکتریکی در محل تخلیه پساب مذکور روند افزایشی دارد. بعد از آن با طی مسیر به سمت پائین‌دست شبیه‌سازی هدایت الکتریکی روند ثابتی را دارد. در صد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۱۵/۲درصد، ۱۵۷/۶۴ و ۲۱۲/۸۸ میکروموس بر سانتی‌متر می‌باشد که نشان از دقت نسبتا بالای شبیه‌سازی هدایت الکتریکی توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد.

اکسیژن محلول

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار اکسیژن محلول رودخانه ۷/۵۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و اکسیژن محلول به میزان ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر، نمودار شبیه‌سازی اکسیژن محلول در محل تخلیه پساب مذکور مقداری کاهش می‌یابد و مقدار آن به ۵/۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. بعد از آن با طی مسیر به سمت پائین‌دست مقدار اکسیژن محلول در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری تا ۳۹/۵۸ از پائین‌دست ثابت می‌ماند سپس مقدار آن روند افزایشی داشته و تا ایستگاه ارباب کندی روند افزایشی ادامه پیدا می‌کند. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۴/۲۸ درصد، ۰/۲۲ و ۰/۳۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه سازی اکسیژن محلول توسط مدل در مرحله واسنجی دارد. در مرحله صحت‌سنجی در سرشاخه، مقدار اکسیژن محلول آب رودخانه ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و اکسیژن محلول به میزان ۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر، نمودار شبیه‌سازی اکسیژن محلول در محل تخلیه پساب مذکور به ۳/۸ میلی‌گرم در لیتر کاهش می‌یابد. بعد از آن با طی مسیر به سمت پائین‌دست مقدار آن افزایش تدریجی داشته و تا ایستگاه ارباب کندی روند افزایشی ادامه می‌یابد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۲۱۲/۳۶ درصد، ۴/۳ و ۵/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که نشان از دقت نسبتاً کم شبیه سازی اکسیژن محلول توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد. علت درصد خطای نسبی بالا می‌تواند از خطا در داده‌های اندازه‌گیری شده اکسیژن محلول باشد. با توجه به این که پارامتر اکسیژن محلول بایستی در محل اندازه‌گیری شود؛ به دلیل گران قیمت بودن دستگاه اندازه‌گیری اکسیژن محلول و عدم امکان تهیه آن، اندازه‌گیری اکسیژن محلول در محل میسر نشد و نمونه‌های آب با تاخیر چند ساعته به آزمایشگاه برده شد که این کار باعث خطا در اندازه‌گیری مقدار واقعی اکسیژن محلول شده و درصد خطای نسبی را زیاد کرده است.

اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار BOD_5 رودخانه ۱۰/۵ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و BOD_5 ۵۲/۵ میلی‌گرم بر لیتر، نمودار شبیه سازی BOD_5 در محل تخلیه پساب مذکور مقداری افزایش پیدا می‌کند و مقدار BOD_5 به ۳۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. بعد از آن نیز روند کاهشی نمودار دوباره ادامه پیدا می‌کند و در ایستگاه آخر (پل روستای ارباب کندی) به ۲۸ میلی گرم بر لیتر می‌رسد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر

شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۲/۵۱ درصد، ۶/۳۸ و ۹/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که نشان از دقت نسبتا بالای شبیه سازی BOD_5 تو سط مدل در مرحله وا سنجی دارد. در مرحله صحت سنجی در سر شاخه، مقدار BOD_5 رودخانه ۹ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که با طی مسیر و در کیلومتر ۷۰ یکباره مقدار BOD_5 توسط مدل به حدود ۳۰۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد و این افزایش به دلیل تخلیه پساب تصفیه خانه شهرک صنعتی فاز ۲ اردبیل با دبی حدود ۰/۰۳۲ مترمکعب بر ثانیه و BOD_5 ۵۲۵ میلی‌گرم بر لیتر به رودخانه قره‌سو می‌با شد. با طی م سیر و در محل تخلیه پ ساب ت صفیه خانه فا ضلاب اردبیل در فا صله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌د ست و با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و BOD_5 ۴۹/۵ میلی‌گرم بر لیتر، نمودار شبیه سازی BOD_5 در محل تخلیه پساب مذکور مقداری افزایش پیدا می‌کند و مقدار BOD_5 به ۳۳ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. بعد از آن نیز روند کاهشی نمودار دوباره ادامه پیدا می‌کند و در ای ستگاه آخر (پل رو ستای ارباب کندی) به ۴۵ میلی گرم بر لیتر می‌ر سد. در صد خطای ن سبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۱۶۰/۰۲درصد، ۴۶/۴۵ و ۸۶/۱۱ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که این خطای زیاد به دلیل وارد شدن پساب تصفیه‌خانه فاضلاب شهرک صنعتی شماره دو اردبیل می‌باشد و عدم توانایی شبیه سازی اک سیژن‌خواهی بیولوژیکی تو سط مدل را ن شان می‌دهد.

نیترات

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار نیترات رودخانه ۰/۵۴۰ میلی‌گرم نیترات بر لیتر می‌با شد که با طی مسیر و با ا ضافه شدن پ ساب ت صفیه خانه فا ضلاب اردبیل در فا صله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و مقدار نیترات ۰/۶۳۴ میلی‌گرم نیترات بر لیتر، منحنی شبیه‌سازی نیترات در محل تخلیه پساب مذکور اندکی افزایش می‌یابد و بعد از آن با طی مسیر، شبیه‌سازی روند ثابتی را تا انتهای م سیر دارد. در صد خطای ن سبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۷/۹۵درصد، ۰/۱۶ و ۰/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی نیترات توسط مدل در مرحله وا سنجی دارد. در مرحله صحت سنجی در سر شاخه، مقدار نیترات رودخانه ۱/۴۴ میلی‌گرم نیترات بر لیتر می‌با شد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست و با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و مقدار نیترات ۶/۳۴ میلی‌گرم نیترات بر لیتر، نمودار شبیه سازی نیترات در محل تخلیه پساب مذکور اندکی افزایش می‌یابد و بعد از آن با طی م سیر، شبیه سازی روند ثابتی را تا انتهای مسیر دارد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۱۸/۰۶ درصد، ۶/۱۶ و ۱۰/۷۹ میلی‌گرم نیترات بر لیتر می‌باشد که نشان از دقت نسبتا بالای شبیه سازی نیترات توسط مدل در مرحله صحت سنجی دارد. در مرحله صحت سنجی، با توجه به شنای مرغابی‌های اهالی روستای نوجه‌ده در حوالی ایستگاه پل روستای نوجه‌ده در فاصله ۶۵/۲ کیلومتری از پائین‌دست، مقدار نیترات آب رودخانه قره‌سو در این محدوده بالا می‌باشد. بعد از ای ستگاه پل رو ستای نوجه‌ده مقدار نیترات کاهش پیدا می‌کند و در کیلومتر ۵۶ از پائین د ست به دلیل ورود پ ساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل، مقدار نیترات مجدداً افزایش یافته و با یک روند ثابت تا انتها پیش می‌رود ولی در مرحله وا سنجی، داده‌های شبیه سازی شده با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت داشته و با یک روند ثابتی تا انتها پیش می‌رود.

قلیائیت

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار قلیائیت آب رودخانه قره‌سو ۸۷ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و قلیائیت ۳۴۶ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر، نمودار شبیه‌سازی قلیائیت در محل تخلیه پساب افزایش می‌یابد و بعد از آن با طی مسیر، شبیه‌سازی روند ثابتی را تا انتها دارد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۲۴/۶۹ در صد، ۸۲/۹۶ و ۱۰۹/۸۵ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر می‌با شد که ن شان از دقت نسبی شبیه‌سازی پارامتر قلیائیت توسط مدل در مرحله وا سنجی دارد. در مرحله صحت سنجی در سر شاخه، مقدار قلیائیت آب رودخانه قره‌سو ۱۲۰ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲

کیلومتری از پائین‌دست با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و قلیائیت ۴۳۲ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر، نمودار شبیه‌سازی قلیائیت افزایش می‌یابد و بعد از آن با طی مسیر، شبیه سازی روند ثابتی را تا انتها دارد. در صد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۵/۶ درصد، ۲۳/۴۳ و ۳۵/۵۴ میلی‌گرم کربنات کلسیم در لیتر می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه سازی قلیائیت توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد.

pH آب

در مرحله واسنجی در سرشاخه، مقدار pH رودخانه ۷/۴۷ می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست با دبی ۰/۷ مترمکعب بر ثانیه و pH ۷/۲۵، منحنی شبیه سازی pH در محل تخلیه پساب مذکور به طور ملایم افزایش می‌یابد و در فاصله ۳۹/۵۸ کیلومتری از پائین‌دست و با اضافه شدن پساب کشتارگاه صنعتی گوشت اردبیل و کشتارگاه طیور سامیان هر کدام با pH ۸/۵، منحنی شبیه‌سازی pH جهش نسبی داشته و بعد از آن روند ثابتی دارد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه سازی شده به ترتیب ۲/۲۳ در صد، ۰/۱۷ و ۰/۲۲ می‌باشد که نشان از دقت بالای شبیه‌سازی pH توسط مدل در مرحله واسنجی دارد. در مرحله صحت سنجی در سرشاخه، مقدار pH رودخانه ۷/۴۹ می‌باشد که با طی مسیر و با اضافه شدن پساب تصفیه‌خانه فاضلاب اردبیل در فاصله ۵۶/۳۲ کیلومتری از پائین‌دست با دبی ۰/۶۵ مترمکعب بر ثانیه و pH ۶/۹۵، منحنی شبیه‌سازی pH در محل تخلیه پساب مذکور روند افزایشی می‌یابد. مجدداً در فاصله ۳۹/۵۸ کیلومتری از پائین‌دست و با اضافه شدن پساب کشتارگاه صنعتی گوشت اردبیل و کشتارگاه طیور سامیان هر کدام به‌ترتیب با pH ۸ و ۸/۱، منحنی شبیه سازی pH جهش نسبتاً ملایمی دارد و بعد از آن روند ثابتی دارد. درصد خطای نسبی، میانگین خطای مطلق و خطای جذر میانگین مربعات مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر شبیه‌سازی شده به ترتیب ۹/۷۳ درصد، ۰/۷ و ۰/۸۹ می‌باشد که نشان از دقت نسبتا بالای شبیه‌سازی pH توسط مدل در مرحله صحت‌سنجی دارد. در پژوهش مشابه انجام گرفته توسط خنک و همکاران (۱۴۰۰) نیز بیشترین دقت مدل QUAL2Kw به‌ازای پارامتر pH به‌دست آمده بود.

تحلیل مقادیر به دست آمده از اجرای سناریوی اول

با توجه به این که دبی منابع آلاینده نقطه‌ای در سناریوی اول دو برابر شده است لذا تغییرات دبی رودخانه در سناریوی اول نسبت به مرحله صحت‌سنجی افزایش ۴۳/۲۶ درصدی را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که افزایش دمای منابع آلاینده نقطه‌ای باعث کاهش کیفیت منابع آلاینده نقطه‌ای می‌شود لذا افزایش ۷/۲۷ درصدی دمای سناریوی اول نسبت به مرحله صحت سنجی این موضوع را به‌خوبی نشان می‌دهد. همچنین پارامترهای هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات و قلیائیت به ترتیب افزایش ۱۶/۶۴، ۵۷/۵۶، ۵۳/۸۳، ۴۷/۴۵ در صدی در سناریوی اول نسبت به مرحله صحت‌سنجی را دارد که با توجه افزایش دو برابر مقدار پارامترهای مذکور در سناریوی اول، نشان از عملکرد منطقی مدل ساخته شده دارد. میزان اکسیژن محلول نیز با توجه به کاهش کیفیت آب سناریوی اول، نسبت به مرحله صحت‌سنجی کاهش ۷/۶۲-درصدی دارد که با توجه به کاهش پارامترهای کیفی منابع آلاینده نقطه‌ای، این کاهش منطقی می‌باشد. با توجه به ثابت ماندن مقدار pH در سناریوی اول، تغییرات آن نیز ناچیز می‌باشد. نتایج سناریوی اول نشان داد که با افزایش دبی منابع آلاینده نقطه‌ای و کاهش پارامترهای کیفی منابع آلاینده نقطه‌ای، غلظت پارامترهای کیفی هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات و قلیائیت در طول رود خانه افزایش و غلظت اکسیژن محلول در طول رودخانه کاهش می‌یابد به عبارت دیگر کیفیت آب رودخانه بدتر می‌شود. با توجه به ویژگی‌های سناریوی اول، قبل از اجرای مدل نیز انتظار می‌رفت که با افزایش دبی پساب‌های وارده به رودخانه و افزایش غلظت پارمترهای کیفی پساب‌ها، کیفیت آب رودخانه بدتر شود. از آنجایی که مدل نیز این نتایج را به خوبی نشان می‌دهد پس عملکرد مدل منطقی می‌باشد.

تحلیل مقادیر به دست آمده از اجرای سناریوی دوم

تنها فرق سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول، دو برابر شدن دمای پساب منابع آلاینده نقطه‌ای در سناریوی دوم می‌باشد. با اجرای سناریوی دوم معلوم شد که افزایش دمای پساب منابع آلاینده نقطه‌ای باعث کاهش کیفیت آب می‌شود.

به طوری که میزان اکسیژن محلول سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول کاهش ۹/۶۶- درصدی را نشان می‌دهد. همچنین کاهش ۳/۱۸- درصدی مقدار نیترات نیز در سناریو دوم مشهود است ولی در سایر پارامترهای کیفی آب تغییر قابل ملاحظه‌ای مشاهده نشد. افزایش دمای ۳۲/۲ در صدی آب رودخانه در سناریوی دوم با توجه به دو برابر شدن دمای پساب منابع الاینده نقطه‌ای نیز منطقی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، پارامترهای کیفی آب رودخانه قره‌سو توسط مدل QUAL2Kw شبیه‌سازی شد. به‌منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل عددی، پارامترهای دبی، هدایت الکتریکی، اکسیژن خواهی بیولوژیکی، نیترات، pH آب، اکسیژن محلول، قلیائیت و دمای آب در بازه‌ای به طول ۷۱/۵ کیلومتر از شهرک صنعتی شماره ۲ اردبیل تا پل روستای ارباب کندی در شش محل در طول مسیر مورد مطالعه در آبان ماه سال ۱۴۰۰ و سال ۱۴۰۱ اندازه‌گیری شد. در مرحله واسنجی، کمترین خطای مدل عددی به‌ترتیب برای پارامترهای دبی، pH، اکسیژن محلول، نیترات، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی و دما حاصل شد و در مرحله صحت سنجی نیز، کمترین خطای مدل به‌ترتیب برای پارامترهای دبی، قلیائیت، pH، هدایت الکتریکی و نیترات بدست آمد. روند تغییرات پارامترهای کیفی در طول مسیر مورد مطالعه به علت تخلیه پساب تصفیه خانه فاضلاب شهرک صنعتی شماره دو اردبیل، تخلیه پساب تصفیه خانه فاضلاب اردبیل، تخلیه پساب کشتارگاه طیور سامیان و تخلیه پساب کشتارگاه صنعتی اردبیل به رودخانه قره سو با نوسانات شدید همراه بود. با این وجود، به دلیل شیب نسبتاً زیاد و هوادهی بالای رودخانه، پارامترهای کیفی رودخانه در بازه‌های پایین‌دست مسیر مورد مطالعه بهبود یافت. به عنوان مثال، مقدار اکسیژن محلول که یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سلامت آب محسوب می شود، در انتهای مسیر (پل روستای ارباب کندی) به بالاترین مقدار خود رسید. به منظور بررسی عملکرد مدل و با لحاظ شرایط نزدیک به واقعیت دو سناریو برای اجرا با مدل تهیه شده، تعریف شد. سناریوی اول با مشخصات کاهش ۲۰ در صدی دبی سرشاخه رودخانه و کاهش ۵۰ درصد پارامترهای کیفی منابع آلاینده نقطه‌ای، ثابت ماندن دمای منابع آلاینده نقطه‌ای و افزایش دو برابری دبی منابع مذکور، اجرای مدل با شرایط سناریوی اول انجام گرفت و نتایج آن عملکرد منطقی مدل ساخته شده را نشان داد. همچنین سناریو دوم با لحاظ کلیه شرایط سناریوی اول ولی با افزایش دو برابری دمای پساب منابع آلاینده نقطه‌ای، باعث کاهش کیفیت آب رودخانه شد که بیانگر این واقعیت است که افزایش دمای پساب منابع آلاینده نقطه‌ای وارده به رودخانه، باعث کاهش کیفیت آب رودخانه می‌شود. نظر به اینکه رودخانه قره‌سو تامین کننده اصلی آب سد مخزنی سبلان است که در آینده‌ای نزدیک برای مصرف آب شرب شهرستان مشگین‌شهر مورد بهره‌برداری قرار خواهد گرفت، لذا نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌تواند برای اتخاذ تدابیر و رویکردهای آتی منطقه بسیار حائز اهمیت باشد. همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که مدل QUAL2Kw توانایی شبیه‌سازی پارامترهای دبی، pH و نیترات را در رودخانه قره‌سو با دقت کافی دارد.

منابع

امامقلی، ز. یاسی، م.، ۱۳۹۸. اثربخشی تغییرپذیری‌های هندسی رودخانه بر کیفیت جریان آب (مطالعه موردی: رود خانه قزل اوزن). انجمن هیدرولیک ایران، مجله هیدرولیک، ۱۴(۴)، ۱-۱۷.

حسینی، ی.، ۱۳۹۸. بررسی ظرفیت کیفیت و خودپالایی رودخانه قره سو با استفاده از مدل های Qual2kw و WQI. مجله اکوبیولوژی تالاب، ۱۱(۳)،۴۱-۶۰.

خدابخش، س. کبیری، ش. افشارنیا، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی کیفی آب سطحی و زیرزمینی حوضه رودخانه خررود (جنوب استان قزوین). مجله هیدروژئولوژی، ۴ (۱)، ۴۲-۵۳.

خنک، آ. سرائی تبریزی، م. بابازاده، ح. صارمی، ع. محمدی قلعه‌نی، م.، ۱۴۰۰. مدلسازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استفاده از Qual2kw. مجله پژوهش آب ایران، ۱۵(۱)، ۱۲۱-۱۳۱.

زلقی، م. افروس، ع.، ۱۳۹۸. شبیه سازی کیفی نیترات و فسفات در طول رودخانه دز با استفاده از مدل QUAL2KW. مجله تحقیقات خاک و آب ایران،۵۰(۹): ۲۰۹۹-۲۱۱۱.

سعیدی رضوی، ب. عرب، ع.، ۱۳۹۹. بررسی ارتباط سطح آب زیرزمینی با رودخانه و تحلیل ضریب جریان روزانه آن. مجله هیدروژئولوژی، ۵ (۱)، ۹۷-۸۴.

طاهری سودجانی ه. براتی خ. شایان نژاد م.، ۱۳۹۴. معرفی معادلات اساسی مدل QUAL2Kw و راهنمای کاربردی مدل. نشریه آب و توسعه پایدار، ۲ (۲): ۴۲-۳۵.

عاشق معلا، م.، ۱۳۹۴. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه با مدل QUAL2Kw. چاپ اول. تهران: نشر تالاب.

محمدی، م. قادری، ک. احمدی، م.، ۱۳۹۸. ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در کالیبراسیون مدل کیفی QUAL2Kw. مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۵۰(۴)، ۹۱۱-۹۲۰.

محمدی قلعه‌نی، م. ابراهیمی، ک.، ۱۳۹۸. آنالیز حساسیت مدل Qual2kw در مدل‌سازی پارامتر های کیفی سفیدرود. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۱۳(۵)، ۱۲۳۳-۱۲۴۵.

مقصودی، ر. عابدی کوپایی، ج. میرعباسی نجف آبادی، ر.، ۱۴۰۰. بررسی اثرات برداشت آب رودخانه بهشت آباد بر کیفیت آب پایین دست با استفاده از مدل های Qual2kw. مجله تحقیقات خاک و آب ایران، ۵۲(۹)، ۲۴۸۵-۲۴۹۹.

نیک اختر، م. رحمتی، س. مساح بوانی، ع.، ۱۳۹۸. شبیه سازی کیفیت آب سطحی با استفاده از مدل QUAL2Kw (رودخانه اردک، استان خراسان رضوی). مجله علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲(۱۱)، ۹۳-۱۰۵.

ونایی، ع. معروفی، ص. آذری، آ.، ۱۴۰۱. شبیه سازی آلودگی در رودخانه‌های پر شیب کوهستانی با استفاده از مدلQUAL2Kw. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۵(۱): ۱۹-۳۴.

Betti, S. H., and Nurhayati, E. 2022. Water Modelling of Karang Mumus River Using QUAL2Kw Application. The 2nd Conference of Sustainability and Resilience of Coastal Management, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 1095 012036.

Kannel, P.R., Kanel, S.R., Lee, S., Lee, Y.S., and Gan, T.Y. 2011. A review of public domain water quality models for simulating dissolved oxygen in rivers and streams. Environ. Model. Assess, 16: 183–204.

Khadka, P., and Man Shakya, N. 2022. Water Quality Calibration of Bagmati River Using QUAL2Kw. Proceedings of 11th IOE Graduate Conference, 2350-8906.

Marlina, N., and Melyta, D. 2018. Analysis Effect of Cloud Cover, Wind Speed, and Water Temperature to BOD and DO Concentration Using QUAL2Kw Model (Case Study In Winongo River, Yogyakarta). In Proceedings of the 5th International Conference on Sustainable Built Environment (ICSBE 2018), Banjarmasin, Indonesia.

Pelletier, G.J., Steven, C.Ch., and Hua, T. 2006. QUAL2Kw - A framework for modeling Water Quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environmental Modeling and Software, 21: 419-425.

Raeisi, N., Moradi, Sh., 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.14(5): 705.

Sener, S., Sener, E. and Davraz, A., 2017. Evaluation of Water Quality Using Water Quality Index (WQI) Method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of the Total Environment, 584: 131-144.

Arora, S., and Keshari, A. 2020. Monte Carlo Simulation and Fuzzy Modelling of River Water Quality for Multiple Reaches Using QUAL2kw. In book: Environmental Processes and Management, 3-24.

Turner, D.F., Pelletier, G.J. and Kasper, B. 2009. Dissolved Oxygen and pH Modeling of a Periphyton Dominated, Nutrient Enriched River. Journal of Environmental Engineering, 135(8): 645-652.