

## تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه دیواندره با استفاده از مدل QUAL2Kw

زهرا باباخانی<sup>۱</sup>، مهدی سرائی تبریزی<sup>۲\*</sup>، حسین بابازاده<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

۲. استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران

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

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۱۱)

## چکیده

مطالعات خودپالایی رودخانه‌ها، اطلاعات کمی مورد نیاز برای محاسبه بار آلودگی قابل تحمل در محیط طبیعی رودخانه را فراهم می‌آورد و همچنین به فهم کامل‌تر از فرایندهای زیست‌محیطی منجر می‌شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه دیواندره و کاهش آلودگی رودخانه از طریق تطابق بیشتر میزان ورود آلاینده‌ها در بازه‌های مختلف رودخانه با توان خودپالایی آن است. پژوهش حاضر به بررسی روند تغییرات خودپالایی رودخانه دیواندره برای پارامترهای اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (CBOD)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، دما و محاسبه درصد خودپالایی برای پارامترهای زوال‌پذیر BOD و COD پرداخته و به منظور پیش‌بینی چگونگی تغییرات آنها از مدل شبیه‌ساز کیفی QUAL2Kw استفاده شده است. به منظور ارزیابی و اعتباریابی نتایج مدل، از شاخص‌های آماری مربع تفاضلات (AME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد به دلیل افزایش سکونتگاه‌های انسانی، تأثیر فاضلاب‌ها، رواناب‌های کشاورزی و همچنین ورود رودخانه‌های فرعی چم‌زرد و یول‌گشتی، وضعیت زیست‌محیطی رودخانه دیواندره در بازه‌های انتهایی آن نگران‌کننده است و اقدامات کنترلی را ایجاب می‌کند. از میان دو پارامتر کیفی زوال‌پذیر بررسی شده، خودپالایی BOD به میزان ۷۵ درصد بیشتر از COD است. همچنین، دقیق‌ترین شبیه‌سازی مربوط به pH و در عین حال کمترین دقت شبیه‌سازی مختص به EC است.

**کلیدواژگان:** پارامترهای کیفیت آب، خودپالایی، رودخانه دیواندره، شبیه‌سازی، مدل QUAL2Kw.

## مقدمه

حفاظت و نگهداری از رودخانه‌ها به منظور کنترل حجم آلودگی‌ها و استفاده بیشتر از این خاصیت که به آن ظرفیت خودپالایی رودخانه گفته می‌شود، امری اجتناب‌ناپذیر است. خودپالایی، توان طبیعی یک توده آبی در زدودن آلاینده‌ها از خود است. به بیان دیگر، حذف یا کاهش مواد آلی، مواد معدنی و سایر آلاینده‌ها از رودخانه به واسطه فعالیت جوامع زیستی ساکن در آن، خودپالایی نامیده می‌شود [۱].

میزان بارگذاری قابل تحمل برای رودخانه‌های مختلف، برحسب عوامل زمانی و مکانی و همچنین نوع و شدت بار مواد زائد، متفاوت است. با توجه به تنوع و تعدد منابع آلاینده و همچنین متغیر بودن توان خودپالایی رودخانه‌ها، اعمال استاندارد تخلیه پساب، به تنهایی کافی نیست و علاوه بر آن، متناسب کردن میزان بارگذاری مواد زائد با توان خودپالایی یک رودخانه، براساس وضعیت اقلیمی، هیدرولوژیکی، هندسی و همچنین شرایط اقتصادی، اجتماعی، سیاسی براساس استانداردهای کیفیت آب و کاربری آن، امری ضروری است [۱].

حسینی و حسینی تغییرات توان خودپالایی رودخانه کارون در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ را بررسی کردند. آنها به این منظور تغییرات مؤلفه‌های pH و EC و BOD در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ را برای دو ماه دی و مرداد توسط مدل کالیبره شده QUAL2Kw شبیه‌سازی کردند. سپس، نتایج به‌دست‌آمده را با داده‌های مشاهده‌شده در ایستگاه‌های مد نظر مقایسه کردند. سپس، به منظور مقایسه داده‌های مشاهده‌شده با داده‌های محاسباتی، از مربع ضریب همبستگی ( $R^2$ ) متوسط خطای مطلق (MAE) بهره بردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها بیان‌کننده عدم خودپالایی مؤلفه هدایت الکتریکی (EC) در رودخانه کارون برای سال ۲۰۰۸ و عدم خودپالایی مؤلفه اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) در سال ۲۰۱۴ بود. همچنین، بهترین شبیه‌سازی مدل برای مؤلفه pH به دست آمد و در رتبه‌های بعدی به ترتیب مؤلفه‌های BOD و EC قرار گرفتند [۲].

خدا محمدی و بوستانی در تحقیق خود به ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر در بازه مد نظر پرداختند. در پژوهش یادشده به منظور آگاهی از روند تغییرها و پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه کر از نرم‌افزار QUAL2K استفاده شد. همچنین، تعداد هفت موقعیت

مناسب به منظور نمونه‌برداری در بازه مد نظر انتخاب شده و اکسیژن محلول در دو ماه شهریور و اسفند که به ترتیب کم‌آب‌ترین و پرآب‌ترین ماه‌های سال در منطقه مطالعه‌شده هستند، اندازه‌گیری شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد روند تغییرات اکسیژن محلول طی ماه‌های اسفند و شهریور مناسب است و هرگز به مرز بحرانی نمی‌رسد. در حال حاضر، رودخانه کر توانایی خودپالایی دارد و با توجه به روند کاهش دبی و افزایش تأثیر فاضلاب‌ها، وضعیت رودخانه کر در آینده با مشکلات بیشتری روبه‌رو خواهد شد. از دیگر یافته‌های پژوهش یادشده می‌توان به این نکته اشاره کرد که مدل QUAL2K برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه مناسب است و موجب افزایش سرعت، دقت و کاهش هزینه‌های پایش کیفیت آب آن می‌شود [۳]. شگری و همکارانش در مطالعه‌ای پارامترهای آمونیم و نیترات در طول رودخانه گرگر را با استفاده از مدل QUAL2Kw کالیبره و صحت‌سنجی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان داد مدل تطابق خوبی با واقعیت دارد. این محققان منابع و مراکز آلوده‌کننده رودخانه گرگر را فاضلاب‌های روستاهای مسیر، پساب‌ها و فاضلاب‌های مزارع و حوضچه‌های پرورش ماهی و زهکش‌های کشاورزی گزارش کردند [۴].

کلبرگی و همکارانش با به‌کارگیری مدل کیفیت آب QUAL2K برای توسعه مدل DO-BOD و ارزیابی نتایج برای رودخانه گاتا‌پراب‌ها در منطقه کارناکاکا به طول ۵۰ کیلومتر از نرم‌افزار ArcGIS برای به‌دست‌آوردن برخی داده‌های هندسی رودخانه به منظور ورودی به QUAL2K استفاده کردند. آنها برای کالیبره و صحت‌سنجی مدل، مقادیر D0 و BOD در شش موقعیت مختلف را پایش کردند و پس از کالیبراسیون و صحت‌سنجی، به پیش‌بینی کیفیت آب تحت شرایط مختلف داده‌ها پرداختند. مقادیر SE و MME برای BOD طی کالیبراسیون به ترتیب ۱/۴۱ و ۱/۱۲ و برای DO ۱/۲۸ و ۰/۹۰ بود که مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل با مقادیر اندازه‌گیری‌شده تطابق نزدیکی دارد [۵].

سردا و سدگیر، با هدف بررسی کارایی استانداردهای کیفیت آب در رودخانه گوداواوری در هندوستان و همچنین به منظور مقایسه تغییرات ماهانه کیفیت جریان با استانداردهای کیفی آب، از داده‌های صحرایی از مدل تک‌بعدی QUAL2Kw استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل به عمق آب حساسیت زیادی دارد و به منبع

سرشاخه‌های رودخانه قزل‌اوزن است که سرشاخه‌های آن رودخانه‌های هانه، گلان، گمرش نامیده می‌شوند و در محلی به نام گزمل به یکدیگر می‌پیوندند و قزل‌اوزن را تشکیل می‌دهند. رودخانه پس از دریافت جریان شاخه‌هایی وارد منطقه دیواندره می‌شود و از جنوب این شهر می‌گذرد و به شهرستان بیجار می‌رسد. در این ناحیه شاخه‌های شهر زوره، کوله، چم‌زرد، یول‌گشتی و رودخانه شوراب وارد آن می‌شوند. شکل ۱ موقعیت رودخانه دیواندره را نشان می‌دهد. همچنین، در جدول ۱ به مشخصات برخی سرشاخه‌های مهم حوضه دیواندره - بیجار اشاره شده است.

#### جمع‌آوری داده

به منظور شناسایی موقعیت رودخانه دیواندره، لایه اطلاعاتی آن در محیط GIS با مقیاس ۱/۵۰۰۰۰ تعیین شد. برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه دیواندره اطلاعاتی مانند دبی، شیب طولی رودخانه بین هر ایستگاه، ضریب مانینگ، عرض کف، شیب دیواره، فاصله بین هر یک از ایستگاه‌ها، دمای متوسط هوا، دمای نقطه شبنم، دمای آب، سرعت باد، تعداد روزهای ابری، درصدی از رودخانه که بر اثر کوه‌ها و پوشش گیاهی زیر سایه قرار گرفته‌اند و وجود داشتن یا نداشتن جلبک در کف رودخانه، مورد نیاز است.

اطلاعات هواشناسی مدل از مرجع و همچنین سایت سازمان هواشناسی استخراج شد و بقیه پارامترها براساس ایستگاه‌های نمونه‌برداری وارد مدل شدند. روی رودخانه دیواندره ۱۰ ایستگاه نمونه‌برداری شامل هفت ایستگاه روی شاخه اصلی رودخانه دیواندره و سه ایستگاه روی سه شاخه ورودی به این رودخانه (چم‌شهر، چم‌زرد و یول‌گشتی) وجود دارد که در جدول ۲ و شکل ۲ موقعیت ایستگاه‌های پایش روی رودخانه دیواندره نشان داده شده است. نمونه‌برداری از این رودخانه، به طور فصلی و در چهار نوبت توسط سازمان حفاظت محیط زیست انجام گرفته است. نوبت اول تا چهارم نمونه‌گیری برای این بازه به ترتیب در اسفند ۱۳۸۶، خرداد، شهریور و آذر ۱۳۸۷ انجام شده است. به دلیل کامل بودن داده‌های آذرماه ۱۳۸۷ از این دوره به منظور کالیبراسیون مدل استفاده شد و برای هر پارامتر، شبیه‌سازی در فصل پاییز (آذر) صورت گرفت.

جریان نقطه‌ای، CBOD, TN و نیتریفیکاسیون حساسیت متوسطی دارد. مدل برای شبیه‌سازی مدیریت‌های مختلف کیفی آب در دوره بحرانی به منظور رسیدن به معیارهای کیفی آب به کار برده شد (حداقل DO کوچک‌تر یا مساوی ۵ میلی‌گرم در لیتر، حداکثر CBOD, TN, TC و دما به ترتیب کوچک‌تر یا مساوی ۳، ۲/۵ و ۰/۱ میلی‌گرم در لیتر و کوچک‌تر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد و محدوده pH بین ۵/۶ تا ۸/۵). نتایج پژوهش آنها نشان داد اکسیژن خواهی محلی برای رسیدن به حداقل غلظت DO در رودخانه مؤثر است و مدل QUAL2Kw نتایج بهتری در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب در رودخانه دارد [۶].

با توجه به نتایج مطالعات انجام‌شده، به نظر می‌رسد که مدل شبیه‌ساز کیفی QUAL2Kw برای مدل‌سازی کیفیت آب و ارزیابی توان خودپالایی رودخانه مناسب است. رودخانه دیواندره از سرشاخه‌های رودخانه قزل‌اوزن است که همانند دیگر رودخانه‌ها از گزند انواع فعالیت‌های انسانی، صنعتی و کشاورزی در امان نیست و انواع آلاینده‌های به‌وجودآمده از فعالیت‌های مختلف انسانی به آن وارد می‌شود. هدف اصلی پژوهش حاضر، شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه دیواندره با کمک مدل QUAL2Kw و کاهش آلودگی رودخانه از طریق تطابق بیشتر میزان ورود آلاینده‌ها در مناطق مختلف رودخانه با توان خودپالایی آن است. همچنین، درخور یادآوری است تا کنون مطالعاتی در خصوص ارزیابی خودپالایی رودخانه دیواندره صورت نگرفته است، بنابراین نتایج این بررسی می‌تواند در تدوین برنامه کنترل بارگذاری مواد آلاینده (TMDL) برای بهبود کیفیت آب رودخانه دیواندره و کاربری‌های مشابه در سازمان‌های مربوطه به کار گرفته شود. برای دستیابی به این هدف، تعدادی هدف فرعی یا عملیاتی از جمله ارزیابی شرایط رودخانه از لحاظ کیفی، تعیین آلاینده‌های غالب و ارائه راه‌کارهای لازم برای بهبود وضعیت کیفی رودخانه در تحقیق حاضر مد نظر است.

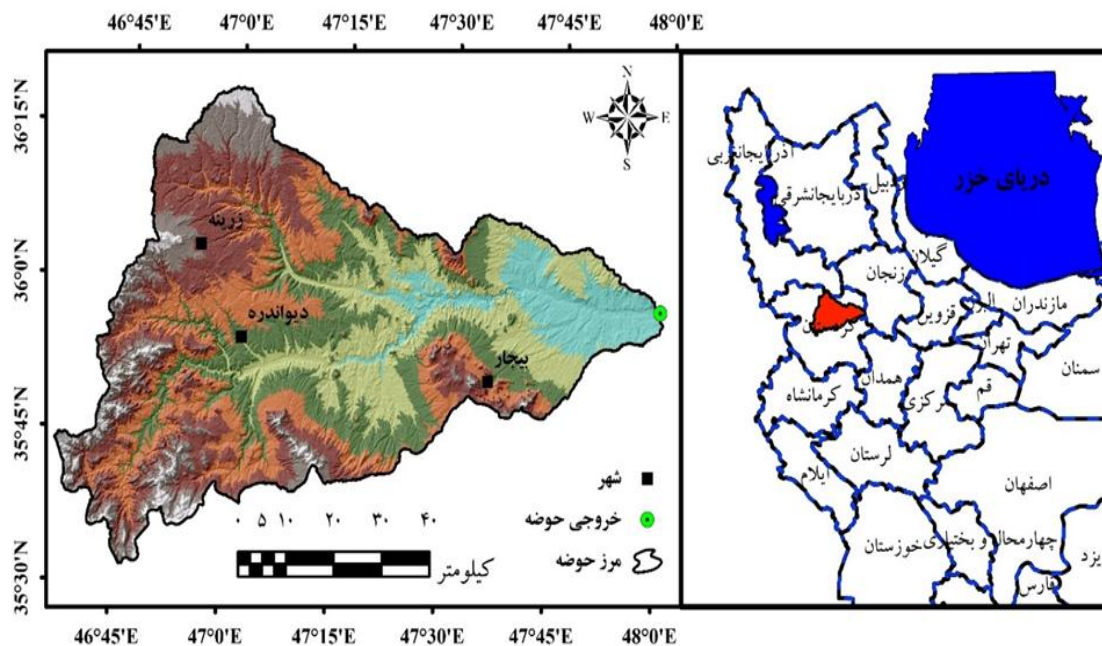
#### مواد و روش‌ها

##### معرفی رودخانه مطالعه‌شده

حوضه آبریز رودخانه دیواندره بیجار از نظر موقعیت جغرافیایی در ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۱۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۶ درجه و ۳۸ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۳ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این حوضه جزء

جدول ۱. مشخصات برخی سرشاخه‌های مهم حوضه دیواندره - بیجار

رودخانه اصلی	رودخانه فرعی	محل جریان رودخانه	سرشاخه‌های مهم رودخانه	محل اتصال به رودخانه اصلی	نوع رودخانه
قزل‌اوزن	خنجره	بخش مرکزی شهرستان سنندج	هانه گلان	روستای بزیوانان	دایمی
	بیجار	شهرستان بیجار	قمشلو	پس از روستای قشلاق	دایمی



شکل ۱. موقعیت رودخانه دیواندره

جدول ۲. موقعیت ایستگاه‌های نمونه برداری

موقعیت	مختصات جغرافیایی		کد ایستگاه	شماره ایستگاه
	عرض	طول		
رودخانه قزل‌اوزن ابتدای سرشاخه نزدیک روستای هزار کانیان	N ۳۵ ۴۵ ۱۳	E ۴۶ ۴۸ ۵۰	۱-k۰۹-۰۱	ایستگاه ۱
رودخانه قزل‌اوزن قبل از اتصال رودخانه دیواندره نزدیک پل نساره	N ۳۵ ۵۲ ۸.۶	E ۴۷ ۳ ۳۸	۲-k۰۹-۰۲	ایستگاه ۲
بعد از اتصال فاضلاب دیواندره در روستای آغاجری	N ۳۵ ۵۳ ۱۶	E ۴۷ ۸ ۱۷	۳-k۰۹-۰۳	ایستگاه ۳
رودخانه چم‌شهر زوره خروجی سد سیازاخ	N ۳۵ ۵۱ ۳۲	E ۴۷ ۰۰ ۱۱	۴-k۰۹-۰۴	ایستگاه ۴
رودخانه قزل‌اوزن نزدیک روستای زرد کمر قبل از اتصال چم‌زرد	N ۳۵ ۵۴ ۰	E ۴۷ ۲۰ ۴۷	۵-k۰۹-۰۵	ایستگاه ۵
چم‌زرد قبل از اتصال به قزل‌اوزن	N ۳۵ ۵۳ ۴۱	E ۴۷ ۲۱ ۶	۶-k۰۹-۰۶	ایستگاه ۶
رودخانه یول‌گشتی قبل از اتصال به قزل‌اوزن	N ۳۵ ۵۸ ۱۹	E ۴۷ ۲۶ ۱۷	۷-k۰۹-۰۸	ایستگاه ۷
رودخانه قزل‌اوزن قبل از اتصال یول‌گشتی	N ۳۵ ۵۸ ۹	E ۴۷ ۲۶ ۳	۸-k۰۹-۰۹	ایستگاه ۸
رودخانه قزل‌اوزن، خروجی استان کردستان، روستای بیانلو	N ۳۵ ۵۹ ۳۸	E ۴۷ ۵۱ ۱۴	۹-k۰۹-۱۹	ایستگاه ۹
رودخانه قزل‌اوزن قبل از اتصال تلوار، حوالی روستای گنداب	N ۳۶ ۰۰ ۱۳	E ۴۸ ۰۱ ۲۱	۱۰-k۰۹-۲۱	ایستگاه ۱۰



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری رودخانه دیواندره

رودخانه (m)،  $u$  سرعت متوسط جریان (m/s)،  $s$  جمله چشمه یا چاه داخلی (mg) و  $V$  حجم المان، هستند. به منظور حل عددی معادله یادشده، باید طول رودخانه به المان‌های محاسباتی یا بازه<sup>۵</sup> تقسیم شود. از جمله نقاطی که می‌توان از آنها به عنوان محل ابتدا و انتهای المان استفاده کرد، عبارت‌اند از: نقاط دارای تغییر ناگهانی در غلظت اکسیژن محلول (مانند محل سازه‌های آبی)، و یا همچنین نقاط دارای تغییر سریع در شیب بستر رودخانه. تعداد بازه‌های محاسباتی رودخانه دیواندره در این شبیه‌سازی برابر ۴۶ بازه انتخاب شد. سپس، براساس داده‌ها و اطلاعات موجود، مدل QUAL2Kw اجرا شد. برای به دست آوردن مختصات جغرافیایی در ابتدا و انتهای بازه‌های محاسباتی و ارتفاع این نقاط، از بسته نرم‌افزاری GIS بهره گرفته شد. مشخصات بازه‌های انتخابی در جدول ۳ ارائه شده است. طبق جدول ۳، طول کل مسیر بررسی شده در رودخانه دیواندره برابر ۱۶۸ کیلومتر است. هرچه تعداد بازه‌ها کوچک‌تر و تعداد پارامترهای اندازه‌گیری شده بیشتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی افزایش می‌یابد. همچنین، تعداد ایستگاه‌های پایش کیفی موجود روی رودخانه، تعداد برداشت‌ها و اطلاعات

شبیه‌سازی کیفی آب رودخانه دیواندره با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw

مدل Qual2kw برای نخستین بار در سال ۲۰۰۶ و توسط Pelletier و همکارانش ارائه شد [۷]. از آن زمان به بعد، به طور پیوسته تکمیل یافت. این مدل، قابلیت بهینه‌یابی ضرایب سینتیکی به کمک الگوریتم ژنتیک دارد که همین الگوریتم، این مدل را از مدل قدیمی Qual2k متمایز می‌سازد. این برنامه قابلیت شبیه‌سازی ۱۹ پارامتر در رودخانه‌ها را به صورت یک‌بعدی با جریان دائمی غیر یکنواخت دارد و می‌تواند اثر بارگذاری را به دو صورت نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای منظور کند. معادله اصلی که مدل یادشده، به حل عددی آن می‌پردازد، معادله جابه‌جایی/پخش یک‌بعدی است که شامل جملات جابه‌جایی<sup>۱</sup>، پراکندگی<sup>۲</sup>، چشمه/چاه داخلی<sup>۳</sup>، چشمه/چشمه/چاه خارجی<sup>۴</sup> به صورت رابطه ۱ است [۸].

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial \left( A_x \cdot D_L \cdot \frac{\partial C}{\partial X} \right)}{A_x \cdot \partial X} - \frac{\partial (A_x \cdot \bar{U} \cdot C)}{A_x \cdot \partial X} + \frac{dC}{dt} + \frac{S}{V} \quad (1)$$

که در آن  $c$  غلظت ماده آلاینده (mg/l)،  $t$  زمان (s)،  $A$  سطح مقطع المان عمود بر جریان، ضریب پراکندگی،  $X$  طول

1. Advection
2. Dispersion
3. Sink
4. Source

5. Reach

$m$  تعداد جفت از مقادیر پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌شده متغیرهای حالت است.

### برآورد خطا در مدل‌سازی

به منظور ارزیابی دقت هر یک از مؤلفه‌های شبیه‌سازی‌شده با مقادیر مشاهداتی، از شاخص‌های آماری مربع تفاضلات (AME) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. شکل ریاضی این آماره‌ها در روابط ۳ و ۴ ارائه شده است.

$$AME = \frac{\sum |y_i^{\wedge} - y_i|}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{\wedge} - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

که در آن:  $AME$  میانگین مربعات خطا؛  $RMSE$  مجذور میانگین مربعات خطا؛  $y_i^{\wedge}$  داده‌های اندازه‌گیری‌شده؛  $y_i$  داده‌های پیش‌بینی‌شده و  $n$  تعداد نمونه‌های اندازه‌گیری‌شده است.

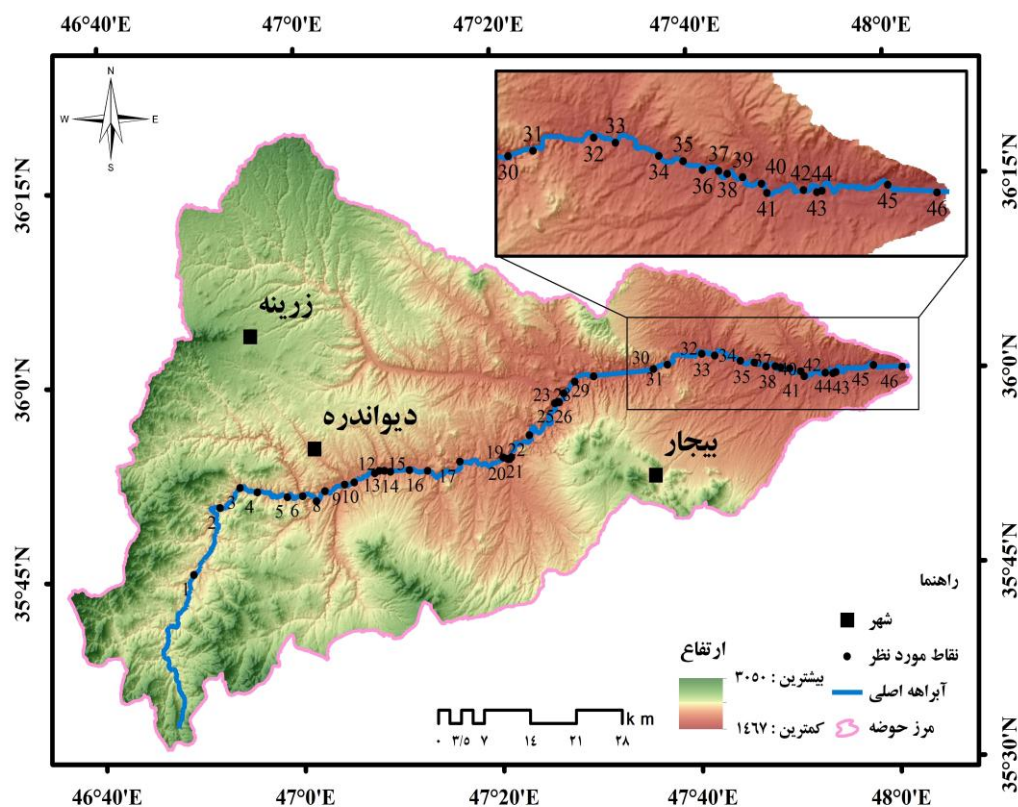
برداشت‌شده اهمیت زیادی در دقت شبیه‌سازی مدل دارد. ورود منابع غیرنقطه‌ای ناشناخته و نبود اطلاعات کافی از منابع نقطه‌ای ورودی و خروجی به رودخانه، از دلایل ایجاد اختلاف بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل است. برای داشتن بیشترین دقت محاسباتی، مدل استفاده‌شده باید کالیبره شود. به این منظور، از داده‌های آذرماه ۱۳۸۷ استفاده شد. سپس، با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل و مقدار اندازه‌گیری‌شده، صحت عملکرد مدل برای شرایط جدید و میزان اطمینان به مدل واسنجی‌شده بررسی شد.

محاسبه درصد اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری‌شده و مقادیر شبیه‌سازی‌شده

به منظور محاسبه درصد اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده از رابطه ۲ استفاده شد [۹].

$$MAPE = \left( \frac{\sum (|P_{i,j} - O_{i,j}|)}{\sum (O_{i,h})} \right) * 100 / m \quad (2)$$

که در آن:  $MAPE$  میانگین قدر مطلق درصد خطا؛  $O_{i,j}$  داده‌های اندازه‌گیری‌شده؛  $P_{i,j}$  داده‌های پیش‌بینی‌شده و



شکل ۳. موقعیت بازه‌های استفاده‌شده رودخانه دیواندره در مدل کیفی

$$Q_{c,p} \times C_{c,p} \quad (7)$$

که در آن  $Q$  و  $C$  مانند تعریف قبلی هستند و زیرنویس  $c.p$  به نقطه کنترل اشاره دارد.

انتخاب رودخانه‌های بررسی‌شده، به گونه‌ای بوده است که در ابتدا و انتهای بازه‌های رودخانه، ایستگاه پایش کیفی قرار داشته باشد. داده‌های مربوط به آلاینده‌های نقطه‌ای موجود در مسیر نیز، طی برنامه پایش، ثبت شده است. به این ترتیب، مقادیر دبی و غلظت پارامترهای کیفی برای ابتدای رودخانه، انتهای رودخانه (نقطه کنترلی) و همچنین منابع نقطه‌ای، مشخص هستند. آنچه باقی می‌ماند، منابع غیرنقطه‌ای مسیر است که داده‌های آن، از شبیه‌سازی کیفی به دست آمده است [۱۰].

#### نتایج و بحث

در نرم‌افزار QUAL2Kw تعداد زیادی ضریب و پارامتر قابلیت انتخاب برای واسنجی شدن را دارند. مقادیر در نظر گرفته‌شده برای شبیه‌سازی در جدول ۳ نشان داده شده است.

نتایج و خروجی مدل به صورت یک سری از نمودارهای اکسلی است که به صورت گرافیکی نشان داده می‌شوند یا براساس ساعت‌های روز به صورت جدول ارائه می‌شود. ابتدا کالیبراسیون پارامترهای هیدرولیکی و سپس پارامترهای کیفی انجام شد. نمودار مربوط به شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای دبی، سرعت جریان، عمق، دما، هدایت الکتریکی، BOD، COD، DO و pH تهیه شد که در هر مورد نقاط مشاهده‌شده نیز روی نمودارهای شبیه‌سازی (برای مقایسه) قرار داده شده‌اند. این نمودارها در شکل ۴ ارائه شده‌اند. در این نمودارها نقاط مشاهده‌شده به صورت نقطه‌ای نشان داده شده‌اند. همچنین، در جدول ۴ میزان اختلاف (درصد) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی پارامترها نشان داده شده است.

با توجه به نمودارهای شکل ۴ موارد زیر نتیجه‌گیری می‌شود:

دبی: روند تغییرات دبی در طول رودخانه تا کیلومتر ۲۱ به صورت افزایش بوده و از کیلومتر ۲۱ تا انتهای رودخانه کاهش دبی مشاهده می‌شود. افت دبی در انتهای مسیر از مقدار ۲/۸۵ به ۲/۱ مترمکعب در ثانیه به علت تراکم زمین‌های کشاورزی در پایین‌دست رودخانه و

#### تعیین ظرفیت خودپالایی یا میزان بار ورودی

به منظور بررسی قدرت خودپالایی رودخانه، دو انتخاب مهم وجود دارد:

۱. پارامترهای کیفی و ۲. بازه و مقطع (نقطه کنترل) مطالعه‌شده.

با توجه به برنامه پایش و مواد اندازه‌گیری‌شده در حوضه سفیدرود، پارامترهای COD و BOD برای بررسی انتخاب شد، که هر دو پارامتر، از آلاینده‌های اصلی رودخانه‌ها به شمار می‌روند. نقطه کنترل، محلی از رودخانه است که نتایج خودپالایی برای رودخانه، تا آن نقطه ارائه می‌شود. این نقطه، هم می‌تواند در انتهای تک‌تک پارامترهای شبیه‌سازی قرار داشته باشد و هم در انتهای سرشاخه مد نظر. در حالت نخست، با توجه به تعداد زیاد پارامترهای شبیه‌سازی، عملاً امکان‌پذیر نیست و تا حد زیادی تفسیر نتایج خروجی را مشکل می‌کند. به این دلیل در مطالعه حاضر نقطه کنترل، مقطع انتهایی هر بازه انتخاب شد.

به منظور ارزیابی قدرت خودپالایی، نیاز به محاسبه بار ورودی کل و بار خروجی کل، از ابتدای رودخانه تا محل نقطه کنترل است که به کمک آنها، درصد خودپالایی از رابطه ۵ محاسبه می‌شود:

$$P_C = \frac{L_i - L_0}{L_i} * 100 \quad (5)$$

که در آن:  $P_C$ ، میزان خودپالایی (به صورت درصد)؛  $L_i$  و  $L_0$ ، به ترتیب میزان بار ورودی و خروجی کل هستند. واحد میزان بار ورودی برای پارامترهای BOD و COD برابر  $kg/day$  است.

میزان بار ورودی  $L_i$  در هر سرشاخه از رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$(Q_h \times C_h) + (Q_p \times C_p) + (Q_{n,p} \times C_{n,p}) \quad (6)$$

که در آن  $Q$  و  $C$  به ترتیب برابر با دبی (مترمکعب بر ثانیه) و غلظت پارامترهای کیفی (میلی‌گرم در لیتر) است. زیرنویس‌های  $p$  و  $n.p$  به ترتیب اشاره دارد به سراب، منابع نقطه‌ای و منابع غیرنقطه‌ای.

میزان بار خروجی  $L_0$  در هر سرشاخه از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

جدول ۳. پارامترهای کالیبراسیون و مقادیر آنها

پارامتر	مقدار	واحد	نماد	کمینه	بیشینه
<b>اکسیژن</b>					
مدل هوادهی	Internal				
اصلاح دما	۱/۰۲۴		qa		
اثر باد بر هوادهی	None				
O2 برای اکسیداسیون کربن	۲/۶۹	gO2/gC	roc		
O2 برای نیتروژن اکسیداسیون NH4	۴/۵۷	gO2/gN	ron		
مدل محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون CBOD	Exponential			۰/۶	۰/۶
پارامتر محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون CBOD	Exponential		Ksofc		
مدل محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون	Exponential			۰/۶	۰/۶
پارامتر محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون	Exponential		Ksona		
مدل افزایش دهنده اکسیژن در اکسیداسیون	Exponential			۰/۶	۰/۶
پارامتر افزایش دهنده اکسیژن در اکسیداسیون	Exponential		Ksodn		
مدل محدودکننده اکسیژن در فرایند تنفس فیتوپلانکتون	Exponential			۰/۶	۰/۶
پارامتر محدودکننده اکسیژن در فرایند تنفس فیتوپلانکتون	Exponential		Ksop		
مدل افزایش اکسیژن در فرایند تنفس جلبک کف	Exponential			۰/۶	۰/۶
پارامتر افزایش اکسیژن در فرایند تنفس جلبک کف	Exponential		Ksob		
<b>Fast CBOD</b>					
میزان اکسیداسیون	۰/۳	d/	kdc	۰	۵
اصلاح دما	۱/۰۴۷		qdc	۱	۱/۰۷
<b>COD</b>					
میزان زوال	۰/۶۸	d/		۰	۰/۸
سرعت سقوط	۱	m/d		۰	۱

جدول ۴. میزان اختلاف (درصد) بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی پارامترهای بررسی شده

پارامتر	عمق	سرعت	دما	هدایت الکتریکی	CBOD	COD	DO	PH
مشاهده‌ای و شبیه‌سازی (MAPE)	۸/۵۰	۵/۲۳	۱/۰۲	۲/۴۳	۲/۹۱	۱/۹۳	۱/۳۱	۰/۴۵

برداشت آب برای امور کشاورزی است. همچنین، مقدار دبی که در کیلومتر ۱۳۳ و ۹۴ به صورت پیک بالا رفته است، رودخانه‌های فرعی هستند که به رودخانه اصلی وارد شده و سبب افزایش ناگهانی مقدار دبی رودخانه شده‌اند.

**هدایت الکتریکی (EC):** هدایت الکتریکی یک پارامتر زوال‌ناپذیر است. در سراب رودخانه مقدار EC اندازه‌گیری شده با میزان پیش‌بینی مدل هم‌خوانی دارد. روند تغییرات EC تا کیلومتر ۲۱ تغییر محسوسی نداشته و مقدار خیلی کم افزایش بوده است، اما از این نقطه به بعد به علت تأثیر نزدیکی مناطق کشاورزی و شست‌وشوی زمین‌های آن، کاهش مقدار دبی و کاهش خودپالایی آب مقدار غلظت این پارامتر طبق پیش‌بینی مدل روند افزایشی به خود گرفته است که در نمونه‌های اندازه‌گیری شده این اتفاق به علت تأثیرگذاری منابع غیر نقطه‌ای تا حدودی نامشخص است. همچنین، ممکن است بالا رفتن غلظت EC در انتهای مسیر ناشی از وجود سازندهای زمین‌شناسی شورکننده در بستر رودخانه باشد. براساس جدول ۴، میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای هدایت الکتریکی ۲/۴۳ درصد است.

برداشت آب برای امور کشاورزی است. همچنین، مقدار دبی که در کیلومتر ۱۳۳ و ۹۴ به صورت پیک بالا رفته است، رودخانه‌های فرعی هستند که به رودخانه اصلی وارد شده و سبب افزایش ناگهانی مقدار دبی رودخانه شده‌اند. چون شبیه‌سازی دبی با استفاده از رابطه تفاضل جرمی انجام می‌شود، داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده کاملاً با هم تطابق دارند.

**سرعت و عمق:** با توجه به اینکه برای شبیه‌سازی هر دو پارامتر سرعت و عمق از رابطه مانینگ استفاده می‌شود، این دو پارامتر به هم مرتبط هستند و روی هم تأثیر می‌گذارند. براساس جدول ۴، میزان اختلاف بین نقاط اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای سرعت و عمق جریان به ترتیب ۵/۲۳ و ۸/۵۰ درصد است، چون عرض مقطع رودخانه به صورت مستطیل در نظر گرفته شد، انتظار می‌رود چنین خطایی را ایجاد کند.

**دما:** دمای آب در آذرماه ۱۳۸۷ تقریباً با روند صعودی همراه بوده است و نقاط پیکی که در نمودار دیده می‌شود، بیان‌کننده ورود منابع نقطه‌ای با دمای بیشتری نسبت به



مناسب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، بیان‌کننده شبیه‌سازی مناسب این مدل برای پارامتر COD و BOD است. براساس جدول ۴، میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای COD ۱/۹۳ درصد است.

**اکسیژن محلول (DO):** اکسیژن محلول بسیار تابع تغییرات BOD و COD است، چون این دو پارامتر فرایندهایی هستند اکسیژن خواه و در محلی که BOD و COD بالا رود، انتظار می‌رود مقدار اکسیژن محلول کاهش یابد و به عکس. در این رودخانه DO نزدیک به DO اشباع است که علت آن کوهستانی بودن، شیب نسبتاً زیاد بستر و تلاطم زیاد رودخانه و همچنین نبود سکونتگاه‌های انسانی در آن بازه است. در انتهای رودخانه با توجه به اینکه مقدار BOD و COD افزایش می‌یابد اما مقدار DO شبیه‌سازی شده روند کاهشی دارد و رفتار متفاوتی را نسبت به مقدار اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که به علت عدم قطعیت‌هایی که مدل با آن مواجه است، عدم انطباق داده‌های اندازه‌گیری شده و مشاهداتی پذیرفته خواهد شد. براساس جدول ۴، میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای اکسیژن محلول ۱/۳ درصد است.

**(pH):** برای تعیین میزان pH توسط مدل معادلات تعادل، موازنه جرم و الکترون خنثایی که در آن کربن غیرآلی عامل تعیین‌کننده است، به کار می‌رود. همان‌طور که از شکل پیداست، مقدار اندازه‌گیری شده و مدل شبیه‌سازی شده هم‌خوانی زیادی با هم دارند و شبیه‌سازی در این پارامتر به خوبی صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر این پارامتر از روند یکنواخت و یکسانی تبعیت می‌کند و تفاوت زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده وجود ندارد. در آب‌های سطحی مقدار pH تغییر زیادی نخواهد کرد، زیرا طی مسیر با کربنات‌ها و بی‌کربنات‌هایی که در مسیر وجود دارد خود را به حد غلظت تعادل می‌رساند. براساس جدول ۴، میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای pH ۰/۴۵ درصد است.

نتایج مقادیر برآورد خطا برای کالیبراسیون پارامترهای کیفی در جدول ۵ ارائه شده است.

**اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD):** اکسیژن خواهی بیوشیمیایی از مهم‌ترین شاخص‌های بررسی کیفیت آب در رودخانه به شمار می‌آید. مقدار غلظت BOD در ابتدای بازه پنج میلی‌گرم در لیتر است که در ۴۰ کیلومتر بعد از آن با توجه به اینکه سرشاخه‌ها در محل کوهستانی و صعب‌العبور کم‌جمعیت واقع شده است، شیب و تلاطم زیاد و همچنین نبود منابع گسترده در بالادست رودخانه سبب افزایش ورود اکسیژن از هوا به داخل رودخانه شده و روی قدرت خودپالایی رودخانه تأثیر می‌گذارد و سبب افزایش میزان خودپالایی و کاهش غلظت BOD می‌شود و نمودار روند کاهشی را نشان می‌دهد. در ادامه مسیر به علت ورود رودخانه به پهنه دشت و کم شدن تدریجی شیب بستر و افزایش سکونتگاه‌های انسانی با جمعیت زیاد و فواصل نزدیک به هم و تخلیه فاضلاب‌های روستایی به صورت منابع گسترده و همچنین ورود رودخانه‌های فرعی و رواناب‌های کشاورزی، رودخانه مقداری توان خودپالایی خود را از دست می‌دهد و مقدار BOD تا کیلومتر ۲۱ روند افزایشی به خود می‌گیرد که پس از گذشتن از مناطق روستایی تغییر روند می‌دهد و در انتهای رودخانه مقدار BOD از ۱۵ به ۱۴ میلی‌گرم کاهش می‌یابد. طبق جدول ۴، میزان اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده برای BOD ۲/۹ درصد است.

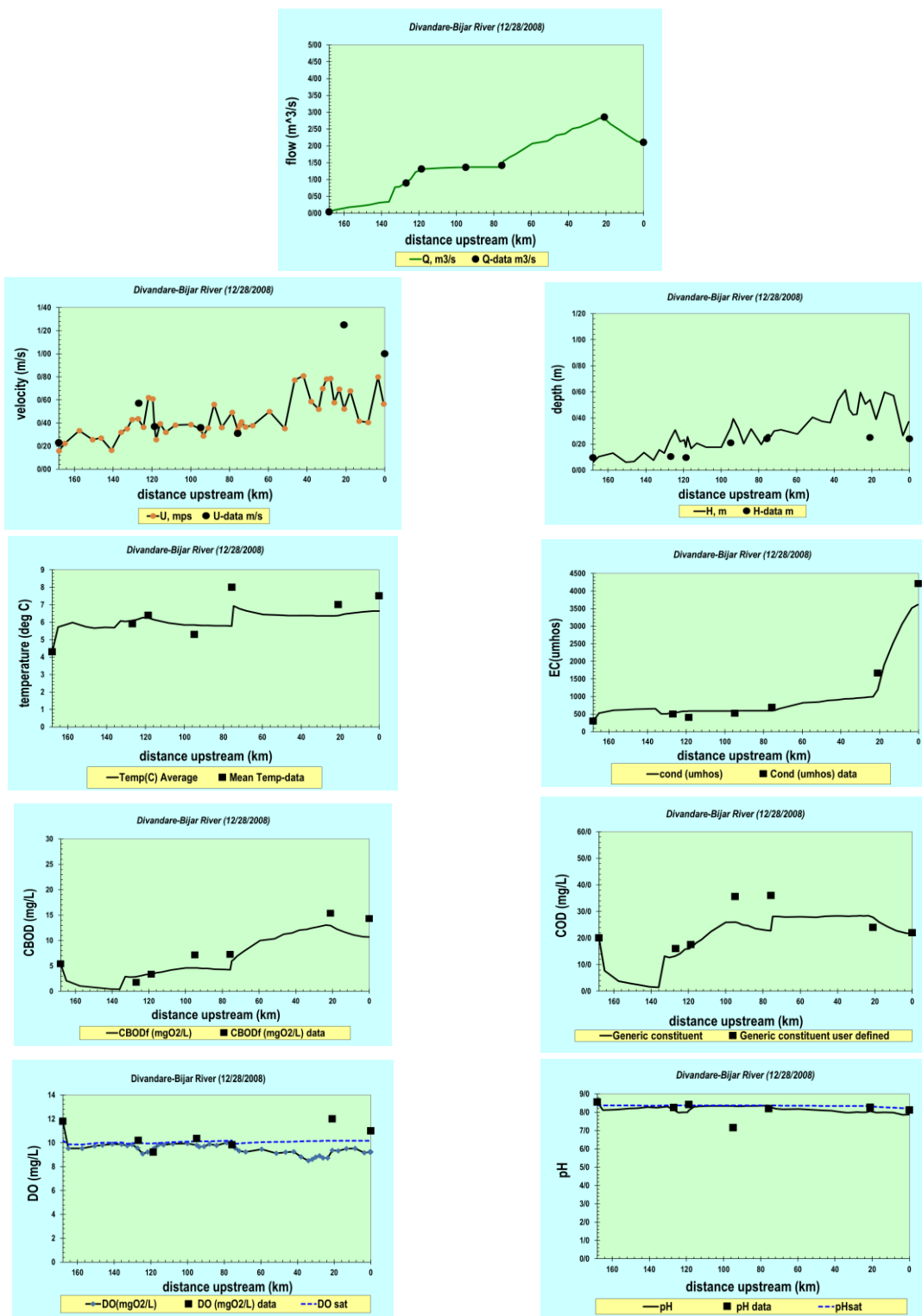
**اکسیژن خواهی شیمیایی (COD):** چون منبع پارامترهای COD و BOD یکی است، رفتار مشابهی از خود نشان می‌دهند. با توجه به اینکه سرشاخه‌ها در منطقه کوهستانی هستند و جمعیتی وجود ندارد و شیب زیاد و افزایش تلاطم رودخانه سبب شده است که قدرت خودپالایی افزایش یافته و مقدار COD مانند BOD کاهش یابد، ولی در ادامه با ورود رودخانه از منطقه کوهستانی به قسمت هموار و افزایش مناطق مسکونی در اطراف رودخانه اصلی و ورود آلاینده‌ها و رودخانه فرعی که COD بیشتری نسبت به رودخانه اصلی دارند، مقدار COD روند افزایشی به خود گرفته و قدرت خودپالایی رودخانه کاهش یافته است. در انتها چون در طولی از رودخانه مناطق مسکونی وجود ندارد، قدرت خودپالایی رودخانه افزایش یافته و مقدار COD کاهش یافته است. انطباق

جدول ۵. مقادیر برآورد خطا برای کالیبراسیون پارامترهای کیفی

پارامتر	عمق	سرعت	دما	هدایت الکتریکی	CBOD	COD	DO	PH
AME	۰/۱۱	۰/۲۱	۰/۴۶	۲۰۱/۴۸	۱/۵۹	۳/۳۱	۰/۹۷	۰/۲۶
RMSE	۰/۱۳	۰/۳۳	۰/۶۱	۲۹۹/۵۲	۲/۰۲	۴/۹۷	۱/۳۲	۰/۴۸

جدول ۶. مقادیر برآورد خطا برای کالیبراسیون پارامترهای کیفی

پارامتر	LI	Lo	PC
BOD	۹۳/۱۶	۲۲/۴۳	۷۵/۹۳
COD	۱۰۲/۵۸	۴۶/۲	۵۴/۹۶



شکل ۴. روند تغییرات پارامترهای کیفی در طول رودخانه دیواندره

دیواندره در بازه‌های انتهایی رودخانه نگران‌کننده است و باید در مدیریت کیفی توجه زیادی به آن شود. با توجه به روند کاهش دبی و افزایش تأثیر فاضلاب‌ها، وضعیت رودخانه دیواندره در آینده با مشکلات بیشتری روبه‌رو خواهد شد.

در رودخانه دیواندره با حرکت به سمت پایاب، تغییرات pH تقریباً روند ثابتی داشته است، هر چند که در این مسیر روند EC افزایشی است. بیشترین تغییرات EC در پایین دست رودخانه اتفاق می‌افتد که می‌تواند به علت تأثیر نزدیکی مناطق کشاورزی و شست‌وشوی زمین‌های آن در این منطقه و کاهش مقدار دبی باشد.

DO، BOD و COD به‌عنوان فاکتورهای مهم مرتبط با شرایط زندگی جانداران آبی و تعیین میزان آلودگی در کیفیت آب اهمیت دارند. با توجه به نمودارهای شبیه‌سازی شده می‌توان نتیجه گرفت DO روندی نوسانی کاهش‌ی دارد و BOD و COD دارای روندی نوسانی افزایشی هستند که این اتفاق ورود منابع آلاینده ناشناخته در مسیر رودخانه به خصوص در میان دست را نشان می‌دهد، اما رودخانه قادر به خودپالایی پارامترهای BOD و COD به ترتیب به میزان ۷۵ درصد و ۵۴ درصد است.

مدل با توجه به مقادیر AME و RMSE دقیق‌ترین شبیه‌سازی با کمترین مربع تفاضلات (۰/۲۶) و ریشه میانگین مربعات خطا (۰/۴۸) را برای مؤلفه pH داشته است که با نتایج حسینی و حسینی مطابقت دارد. همچنین DO، BOD، COD و EC در رتبه‌بندی‌های بعدی قرار دارند [۲].

#### تشکر و قدردانی

داده‌های استفاده‌شده در مقاله حاضر از سازمان حفاظت محیط زیست تهیه شده و طی برنامه پایش رودخانه سفیدرود توسط شرکت مشاور یکم جمع‌آوری شده است. نویسندگان به این وسیله مراتب سپاس خود را بابت در اختیار گذاشتن این داده‌ها اعلام می‌دارند.

#### منابع

- [1].Tajrishi, M, Abrishamchi, A, Ahmadi M, Torkian, A. Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision. Study guideline of river Self-purification Capacity. Islamic Republic of Iran. water technical report No. 481. 2009; 161 pp [Persian]

هر چه مقدار این پارامترها کوچک‌تر باشد، بیان‌کننده دقت بیشتر نتایج مدل به داده‌های اندازه‌گیری شده است. جدول ۵ نشان می‌دهد مدل بیشترین و کمترین دقت شبیه‌سازی را به ترتیب برای pH و هدایت الکتریکی داشته است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود مدل QUAL2Kw دقت زیادی در شبیه‌سازی پارامتر pH از خود نشان داد که با نتایج حسینی و همکارانش مطابقت دارد [۲]. مقادیر درصد خودپالایی پارامترهای کیفی زوال‌پذیر با توجه به رابطه‌ای که در بخش مواد و روش‌ها پیشنهاد شده، در طول رودخانه محاسبه شده و در جدول ۶ نشان داده شده است. درصدهای خودپالایی به‌دست‌آمده نشان‌دهنده میزان خودپالایی رودخانه برای پارامتر COD و BOD است. پارامتر BOD با مقدار ۷۵ درصد، بیشترین میزان خودپالایی را دارد.

#### نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه تا کنون روی رودخانه مطالعه‌شده مطالعات کیفی با استفاده از مدل QUAL2Kw انجام نگرفته است، هدف اصلی پژوهش حاضر شبیه‌سازی تغییرات پارامترهای کیفی آب رودخانه دیواندره با کمک مدل QUAL2Kw و کاهش آلودگی رودخانه از طریق تطابق بیشتر میزان ورود آلاینده‌ها در مناطق مختلف رودخانه با توان خودپالایی آن است. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی می‌توان چنین بیان کرد که:

مدل QUAL2Kw ظرفیت خوبی در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی رودخانه‌های نیمه‌کوهستانی و نسبتاً پرشیب دارد و موجب افزایش سرعت و دقت و کاهش هزینه‌های پایش کیفیت آب رودخانه دیواندره می‌شود که نتایج تحقیق حاضر مؤید این ادعاست. می‌توان از این مدل برای برنامه‌ریزی و مدیریت کمی و کیفی رودخانه و همچنین پیش‌بینی شرایط آبی استفاده کرد. همچنین ترکیب نتایج پژوهش حاضر با مطالعات زیست‌محیطی در زمینه مهاجرت گونه‌های ماهی‌ها و الگوی رشد آنها در سال‌های اخیر، به نتایج علمی جدیدتری منجر خواهد شد.

در حال حاضر، رودخانه دیواندره توانایی خودپالایی را به‌خصوص در بالادست خود دارد، اما با ورود رودخانه به پهنه دشت، و به دلیل افزایش سکونتگاه‌های انسانی، تأثیر فاضلاب‌ها، رواناب‌های کشاورزی و همچنین ورود رودخانه‌های فرعی چم‌زرد و یول‌گشتی وضعیت زیست‌محیطی رودخانه

- [2]. Hosseini P, Hosseini Y. Investigating the variation of self-propagation power of Karun River in 87 and 92 years using QUAL2KW model in Ahvaz city. *AmirKabir Journal of Civil Engineering*. 2017;49(1):35-46. [Persian]
- [3]. Khodam Mohammadi M, Boustani F. Assessment of self-healing power and the role of dissolved oxygen in the quality of water in the river of Khor (Case study: Droodzan Dam down to Lake Tashkh-Bakhtegan). *Journal of Water Resources Engineering*. 2017;7(27):85-98. [Persian]
- [4]. Shokri S, Hooshmand A, Moaz H. Qualitative simulation of ammonium and nitrate in the Gregor River using the QUAL2KW model. *Journal of Wetland Ecobiology*. 2015;7(68):23-57. [Persian]
- [5]. Kalburgi PB, Shareefa RN, Deshannavar UB. Development and Evaluation of BOD-DO Model for River Ghataprabha near Mudhol (India), using QUAL2K. *IJ Engineering and Manufacturing*. 2015;5(1),15-25.
- [6]. Sarda P, Sadgir DP. Water Quality Modeling and Management of Surface Water using Soft Tool. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*. 2015;4(9),2988-2992.
- [7]. Pellerire GJ, Chapra SC, Tao H. QUAL2Kw- A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. *Environmental Modeling & Software*. 2006;21(3),419-425.
- [8]. Pelletier GJ, Chapra SC. QUAL2Kw user manual (version 5.1): A modelling framework for simulating river and stream water quality. Environmental Assessment Program, Olympia, Washington. 2008,112 pp.
- [9]. Rafiee M, Akhondali AM, Moazed H, Lyon SW, Jaafarzadeh N, Zahraie B. A Case Study of Water Quality Modeling of the Gargar River, Iran. *Journal of hydraulic structures*. 2013;1(2):10-22.
- [10]. Azimi MM, Hashemi S, Barekatin S, Jafari Gol F. Investigation of self-purification With the help of the results of qualitative simulation (study area: Sefidrood river). National Water Conference with Clean Water Approach, University of Water and Power Industry (Shahid Abbaspour), Tehran, Iran. 2009. [Persian]