هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۲۶، سال هشتم، بهار ۱۴۰۰، صص ۱۸۱-۱۶۵
Hydrogeomorphology, Vol. 8, No. 26, Spring 2021, pp (165-181)
CC BY-NC

ارزیابی عملکرد مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی کیفی رودخانه‌ی خرم‌آباد

بابک شاهی‌نژاد[1*]، زهره ایزدی[2]، بهزاد جوادی[3]

۱- استادیار گروه مهندسی علوم آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۲- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران
۳- مدیر بخش مهندسی رودخانه و سواحل شرکت آب منطقه‌ای لرستان، خرم‌آباد، ایران

وصول مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۲۲ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

چکیده

در این پژوهش به شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه‌ی خرم‌آباد (خرم‌رود) به کمک مدل یک بعدی QUAL2Kw در طول یک بازه ۳۵ کیلومتری از رودخانه پرداخته شد. به همین منظور از پارامترهای مهم کیفی آب از جمله اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی ($CBOD_f$)، اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD)، نیترات (NO_3)، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) و پارامتر دما در دو ماه تیر و شهریور سال ۱۳۹۷ به ترتیب برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده گردید. نتایج نشان داد که با پیوستن رودخانه‌ی فرعی به رودخانه اصلی و تخلیه پساب منابع آلاینده صنعتی، شهری و کشاورزی به رودخانه، پارامترهای کیفی COD، NO_3 و $CBOD_f$ روند صعودی پیدا می‌کنند. نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی نشان داد شاخص NRMSE در مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای pH کمترین مقدار و به ترتیب برابر ۸/۸۳ و ۹/۲۲ درصد بدست آمد و برای EC به ترتیب ۱۱/۰۵ و ۱۳/۸۶ درصد محاسبه شد. شبیه‌سازی پارامتر DO نیز در طول رودخانه دارای نوساناتی بود این در حالی است که شاخص‌های آماری NRMSE، RMSE و MAE برای این پارامتر در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی در حد قابل قبولی بدست آمدند، به‌طوری که شاخص‌های فوق در مرحله‌ی واسنجی مدل به ترتیب ۱۲/۴۹ درصد، ۰/۹۱۷ میلی‌گرم بر لیتر و ۰/۷۲ میلی‌گرم بر لیتر و در مرحله‌ی صحت‌سنجی مدل به ترتیب ۲۴/۶۵ درصد، ۱/۷۸ میلی‌گرم بر لیتر و ۱/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد. همچنین مدل توانست با دقت خوبی پارامتر دما را در تیرماه (RMSE=۱/۹۲°C و MAE=۱/۵۷°C) و شهریورماه (RMSE=۲/۷۷°C و MAE=۲/۰۹°C) شبیه‌سازی کند. در نهایت نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر دقت مناسب مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای فوق در رودخانه‌ی خرم‌آباد بود.

کلمات کلیدی: پارامترهای کیفی، شبیه‌سازی، مدل QUAL2Kw، رودخانه‌ی خرم‌آباد، استان لرستان

* نویسنده‌ی مسئول
E-mail: shahinejad.b@lu.ac.ir

۱- مقدمه

آب‌های سطحی از مهم‌ترین منابع آب بوده و نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند. در میان آب‌های سطحی، رودخانه‌ها به دلیل این که تمرکز گسترده‌ای از فعالیت‌های بشر روی آن است، پذیرنده‌ی حجم وسیعی از آلودگی‌ها هستند (همموند و فیچنر[1]، ۲۰۱۴: ۴۸۶) و به علت عبور از بسترهای مختلف و ارتباط با محیط پیرامون خود، نوسانات کیفی زیادی دارند (بانژاد و همکاران، ۱۳۹۲: ۲۷۷). آلودگی و کاهش کیفیت منابع آب می‌تواند به‌طور مستقیم و غیرمستقیم سلامتی انسان را به خطر اندازد (بیاتی‌خطیبی و همکاران، ۱۳۹۳: ۹۳). امروزه اصلی‌ترین نگرانی در مورد آب‌های سطحی، مسئله‌ی کیفیت این آب‌ها است (چانگ[2]، ۲۰۰۸: ۳۲۸۵). بر همین اساس، شناخت کیفی منابع مناسب برای شرب و کشاورزی امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد (شهیدی و خادم‌پور، ۱۳۹۹: ۱).

قدرت طبیعی رودخانه‌ها در تصفیه و حذف مواد آلاینده از محیط‌زیست، موجب ترغیب استفاده از آنها به منظور تصفیه آلاینده‌ها حتی بیش از توانایی رودخانه شده است (عظیمی، ۱۳۸۷: ۱۰۵). هر رودخانه تا حد معینی ظرفیت پذیرش آلاینده‌های ورودی را دارا می‌باشد که این ظرفیت به عوامل مختلفی همچون دبی رودخانه، شرایط اولیه رودخانه، عمق رودخانه و غلظت پساب‌های تخلیه‌شده به رودخانه بستگی دارد (غفاری، ۱۳۸۵). برای تعیین عکس‌العمل رودخانه‌ها بر اثر تخلیه آلاینده‌ها به درون آن‌ها لازم است مطالعات خودپالایی انجام شود. به منظور تعیین ظرفیت خودپالایی رودخانه به ابزارهایی مانند مدل‌های کیفی نیاز است تا بتوان در شرایط مختلف کیفیت آب را پیش‌بینی کرد (ترابیان و هاشمی، ۱۳۸۱: ۵۲۸). امروزه استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی کیفی آبهای سطحی رواج گسترده‌ای یافته است و نرم‌افزارهای مختلفی برای این منظور طراحی شده است. از جمله مهم‌ترین این نرم‌افزارها که در این پژوهش نیز بکار گرفته شده است مدل یک بعدی QUAL2Kw است که متغیرهای کیفی آب را در حالت جریان پایدار و غیریکنواخت شبیه‌سازی می‌نماید. تا کنون مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی خودپالایی رودخانه به کمک مدل QUAL2Kw انجام شده است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود:

افروس و زلقی (۱۳۹۸)، به شبیه‌سازی پارامترهای نیترات و فسفات با استفاده از مدل QUAL2Kw در رودخانه دز پرداختند. نتایج مدل‌سازی آنها تا حد زیادی با شرایط واقعی رودخانه همخوانی داشت. امامقلی و یاسی (۱۳۹۸)، از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی کیفی رودخانه‌ی قزل‌اوزن در ۵ راهکار ساماندهی (۱-

1. Hemond & Fechner
2. Chang

عرض رودخانه، ۲- شیب جانبی، ۳- شیب طولی، ۴- ضریب زبری و ۵- تغییرپذیری همزمان عرض و شیب طولی) استفاده کردند. بررسی نتایج همه حالت‌های شبیه‌سازی شده نشان داد که بهترین گزینه برای بهبود شرایط کیفیت آب رودخانه به ترتیب کاهش عرض، افزایش عرض و کاهش شیب به‌طور همزمان و تعدیل زبری بستر می‌باشد.

اولیوییرا و همکاران[1] (۲۰۱۲)، کیفیت آب رودخانه‌ی سرتیما در پرتغال را به دلیل مواد مغذی که در اثر فعالیت‌های کشاورزی، دامپروری، فاضلاب خانگی و پساب صنعتی به آن می‌ریزد، بررسی کردند. داده‌های میدانی و غلظت آلاینده‌ها نشان داد که این رودخانه جز رودخانه‌های مغذی بشمار می‌رود. در این منطقه بیشترین نیتروژن و فسفر از فاضلاب خانگی به ترتیب با ۴۴ و ۴۶ درصد تولید می‌شود. نتایج مدلسازی نشان داد که همبستگی بین غلظت نیتروژن و فسفر در رودخانه وجود ندارد و به منظور خارج کردن رودخانه از حالت مغذی به حالت مزوتروفیک، نیتروژن و فسفر ورودی به رودخانه باید به ترتیب ۵ و ۱۰ برابر کاهش یابند. قربانی و همکاران[2] (۲۰۲۰)، کیفیت آب رودخانه دز را از نظر دبی، دما، EC و پارامتر BOD با استفاده از مدل QUAL2Kw 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 و PBIAS حاکی از دقت خوب و قابل قبول مدل و سازگاری خوب (۹۵٪) بین داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی بود. نتایج تحقیقات شارما و همکاران[3] (۲۰۱۷) و سردا و سادگیر[4] (۲۰۱۵) به ترتیب در بررسی کیفیت آب رودخانه یامونا و گوداواری در هند حاکی از دقت مناسب مدل QUAL2Kw در شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب در رودخانه است. با توجه به اهمیت رودخانه خرم‌آباد در تأمین آب مورد نیاز کشاورزی و صنعت منطقه، همچنین کمک به شناسایی منابع اصلی آلاینده در راستای بهبود کیفیت آب رودخانه و با توجه به اینکه در این رودخانه طی سال‌های اخیر پژوهش جامعی با مدل‌های کیفی انجام نشده است، لذا در این پژوهش به بررسی و شبیه‌سازی کیفیت آب این رودخانه و توانایی خودپالایی آن به کمک مدل QUAL2Kw پرداخته شد.

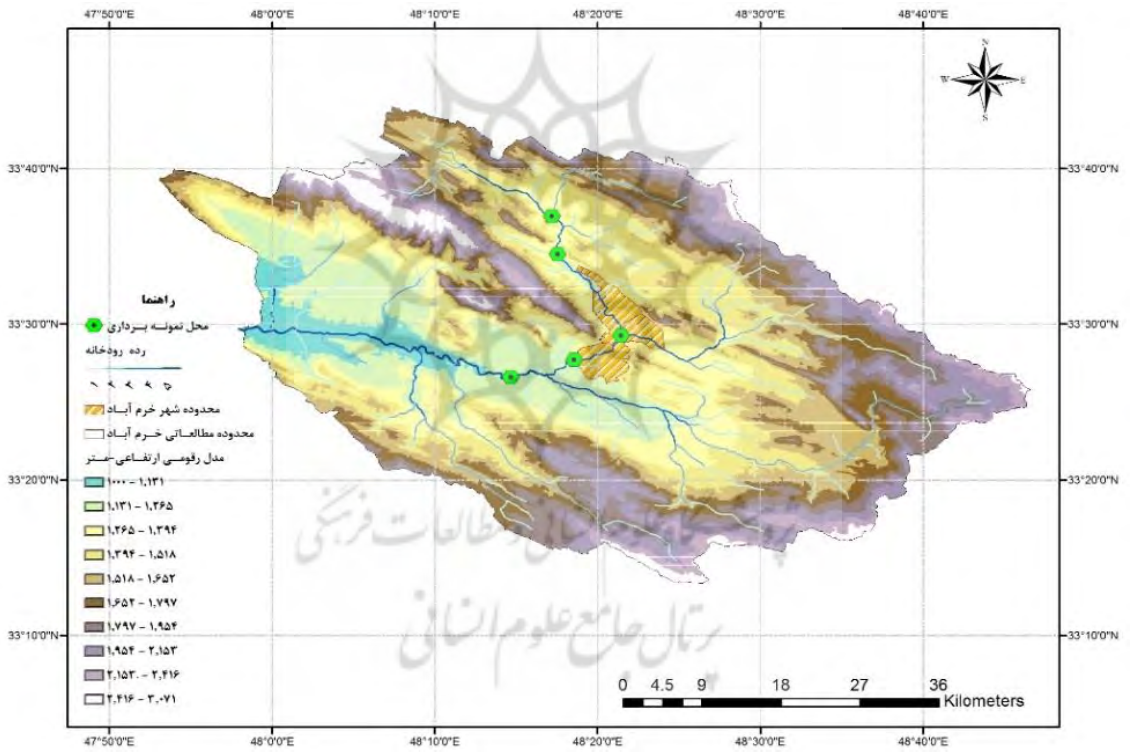
۲-مواد و روش

۲-۱-منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز خرم‌آباد واقع در حوضه‌ی آبریز کرخه با مساحت ۲۵۰۱ کیلومتر مربع در غرب ایران در استان لرستان با طول تقریبی آبراهه اصلی ۶۴ کیلومتر می‌باشد. رودخانه خرم‌آباد (خرم‌رود) از شاخه‌های مهم رودخانه کشکان می‌باشد که از دو رودخانه رباط و کرگانه که در مرکز شهر بهم پیوسته، تشکیل شده است و در حال

1. Oliveira et al.
2. Ghorbani et al.
3. Sharma et al.
4. Sarda & Sadgir

حاضر به واسطه عبور از مرکز شهر خرم‌آباد و تخلیه فاضلاب شهری، صنعتی و کشاورزی در آن در معرض آلودگی‌های گوناگون قرار دارد. بازه مورد مطالعه در این پژوهش حدود ۳۵ کیلومتر از طول رودخانه خرم‌آباد از سرچشمه خرم‌رود در بالادست روستای رباط نمکی تا ایستگاه هیدرومتری چم‌انجیر را شامل می‌شود که در مختصات جغرافیایی "۳۶°۳۳'۵۴ تا "۲۶°۳۳'۳۷ عرض شمالی و "۱۷°۴۸'۳۹ تا "۱۴°۴۸'۳۸ طول شرقی واقع شده است. شکل ۱ موقعیت محدوده‌ی مطالعاتی را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مطالعاتی

Fig (1): Geographical location of the study area

۲-۲-منابع آلاینده

منابع آلوده‌کننده‌ی رودخانه‌ی خرم‌آباد به سه بخش اصلی شهری، صنعتی و کشاورزی تقسیم می‌شوند. منابع آلاینده شهری خود به دو بخش فاضلاب‌های بهداشتی و رواناب‌های سطحی حاصل از بارندگی‌های تقسیم می‌شود. البته بخش عمده‌ای از فاضلاب‌های بهداشتی در تصفیه‌خانه فاضلاب خرم‌آباد تصفیه می‌شود. در بخش صنعت تعداد زیادی واحد صنعتی کوچک و بزرگ در اطراف و نزدیک رودخانه خرم‌آباد و در طول مسیر آن

مستقرند که به طور مستقیم و غیر مستقیم سبب آلودگی آن می‌شوند. برخی از صنایع، فاضلاب خام را مستقیماً و برخی دیگر بعد از تصفیه ناقص وارد رودخانه می‌کنند. از جمله این صنایع می‌توان به کارخانه‌های ماسه‌شویی، کارخانه آرد عشایر ایران، کارخانه شیر لرستان، کارخانه الکل‌سازی و... اشاره کرد. همچنین در اطراف رودخانه بویژه در شمال و جنوب، بخش قابل توجهی از زمین‌های کشاورزی قرار دارند که با برداشت آب از رودخانه و به دنبال آن تخلیه زه‌آبهای این اراضی به رودخانه سبب آلوده شدن آب و پایین آمدن کیفیت آن می‌شوند. لازم به ذکر است اطلاعات مورد نیاز مربوط به این منابع آلاینده از اداره محیط‌زیست استان تهیه شد.

۲-۳-ایستگاه‌های پایش (نمونه‌برداری)

با توجه به موقعیت منابع آلاینده موجود در رودخانه، ۵ نقطه در طول رودخانه به عنوان محل نمونه‌برداری در نظر گرفته شد که دو ایستگاه آن شامل ابتدا و انتهای محدوده مطالعاتی، یک ایستگاه در مرکز شهر خرم‌آباد (چند متر بعد از شاخه فرعی کرگانه) و دو ایستگاه دیگر به ترتیب قبل از ورود رودخانه به شهر و بعد از خروج آن از شهر انتخاب شدند. اطلاعات کمی و کیفی این ایستگاه‌ها با همکاری شرکت آب‌منطقه‌ای و اداره محیط‌زیست استان تهیه شد.

۲-۴-مدل QUAL2Kw

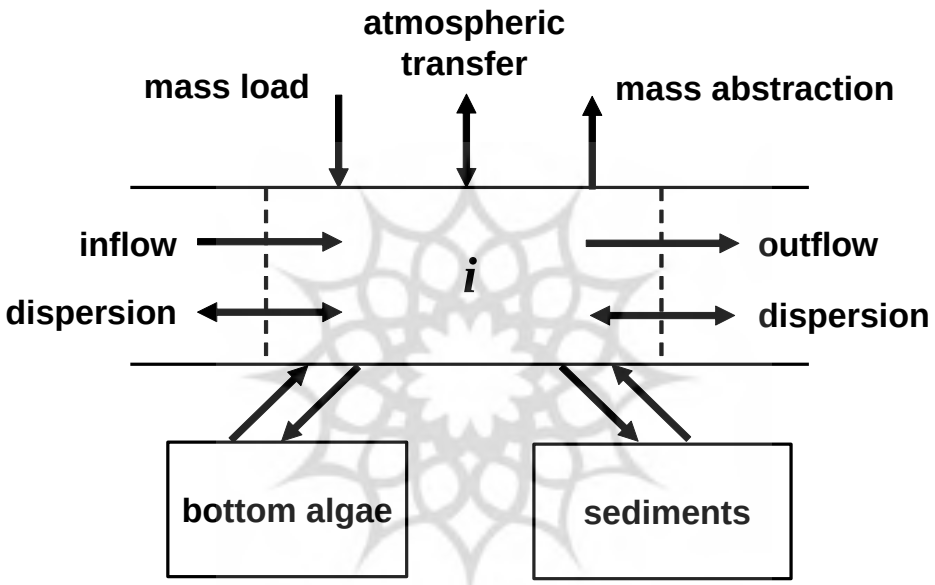
در این تحقیق از مدل QUAL2Kw نسخه ۵/۱ استفاده شد. از مزیت‌های این نسخه از مدل واسنجی خودکار آن است. مرور تحقیقات نشان داد که از این مدل بصورت گسترده در رودخانه‌های کشور از جمله کارون، دز، دیواندره و ... استفاده شده است. علاوه بر استفاده گسترده از مدل، سادگی نسبت به سایر مدل‌های کیفیت آب، نیاز به داده‌های حداقل و واسنجی خودکار از دلایل انتخاب این مدل در تحقیق حاضر است. معادله کلی بقای جرم استفاده شده در این مدل که براساس غلظت پارامتر کیفی برای هر المان (شکل ۲) استفاده می‌شود معادله جابجایی- انتشار است که به صورت زیر می‌باشد (پلتییر و چاپرا[1]، ۲۰۰۵):

$$\frac{dc_i}{dt} \cong \frac{Q_{i01}}{V_i} c_{i01} 0 \frac{Q_i}{V_i} c_i 0 \frac{Q_{ab,i}}{V_i} c_i \cdot \frac{E'_{i01}}{V_i} + c_{i01} 0 c_i , \cdot \frac{E'_i}{V_i} + c_{i.1} 0 c_i , \cdot \frac{W_i}{V_i} \cdot S_i \qquad (۱)$$

که در آن Q_i و Q_{ab} به ترتیب دبی جریان و دبی خروجی المان i بر حسب m^3/day، V_i حجم المان بر حسب m^3، C_i غلظت پارامتر کیفی در المان i بر حسب gr/m^3، t زمان بر حسب day، E_i ضریب انتشار بین المان i و

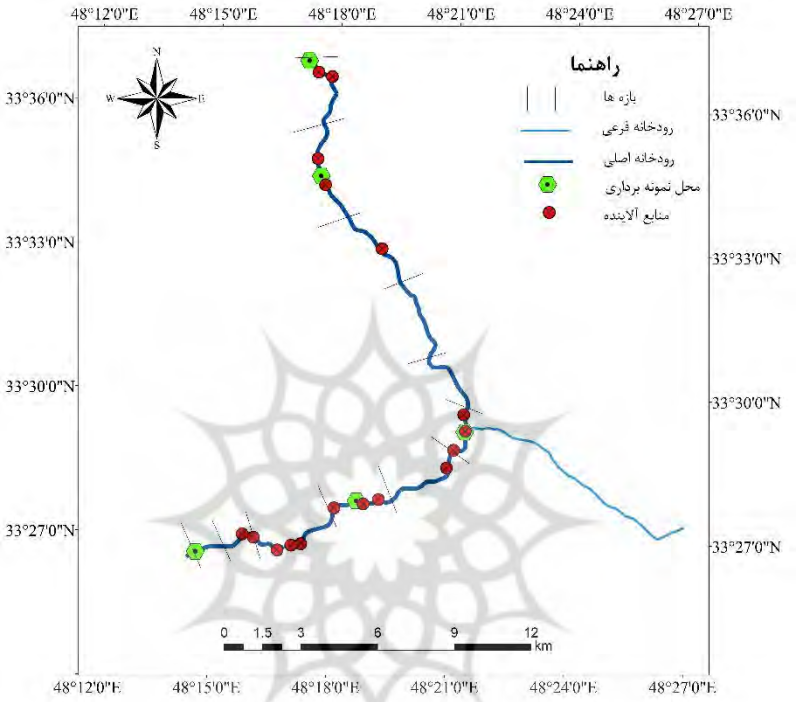
1. Pelletier & Chapra

i-1 بر حسب m^3/day، W_i بارگذاری خارجی پارامتر کیفی به المان i بر حسب (gr/day) و S_i تولید و مصرف پارامتر کیفی در اثر واکنش‌ها و مکانیسم انتقال جرم در المان i بر حسب ($gr/m^3/day$) می‌باشند.



شکل (۲): بیلان جرم المان i از یک بازه (پلتییر و چاپرا، ۲۰۰۵)
Fig (2): The mass balance of element i from a period (Peltier and Chapra, 2005)

داده‌های مورد نیاز مدل به سه بخش داده‌های هندسی- هیدرولیکی (شکل مقطع، ضریب زبری و مشخصات جریان شامل دبی، عمق و سرعت)، داده‌های کیفی و داده‌های هواشناسی تقسیم می‌شوند. به منظور شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه لازم است تا محدوده‌ی مطالعاتی به تعدای بازه‌ی کوچک‌تر تقسیم شود بر همین اساس رودخانه به ۱۱ بازه تقسیم‌بندی شد و به کمک معادله مانینگ هیدرولیک رودخانه شبیه‌سازی شد. داده‌های هواشناسی مورد نیاز مدل نیز به‌صورت ساعتی از ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد که در نزدیکی رودخانه قرار دارد تهیه شد. شکل ۳ موقعیت منابع آلاینده، ایستگاه‌های نمونه‌برداری و بازه‌بندی را در محدوده‌ی مطالعاتی نمایش می‌دهد.



شکل (۳): موقعیت منابع آلاینده، محل‌های نمونه‌برداری و بازه‌بندی محدوده‌ی مطالعاتی
Fig (3): Location of pollutant sources, sampling sites, and study area range

در این پژوهش سعی شده است به شبیه‌سازی پارامترهای مهم کیفی آب از جمله DO، $CBOD_f$، COD، NO_3، EC و pH و دما در رودخانه‌ی خرم‌آباد توسط مدل QUAL2Kw پرداخته شود. برای این منظور از داده‌های تیرماه سال ۱۳۹۷ برای واسنجی خودکار مدل استفاده شد. در ادامه به منظور صحت‌سنجی مدل، داده‌های شهریورماه همین سال بکار گرفته شد (دلیل انتخاب این دو ماه کامل بودن داده‌های این ماه‌ها در یک دوره‌ی کم‌آبی بود). در نهایت برای بررسی مدل در شبیه‌سازی از معیارهای ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)[1]، ریشه‌ی میانگین خطای نرمال شده (NRMSE)[2] و میانگین خطای مطلق (MAE)[3] استفاده شد که روابط آنها در ادامه آمده است. در تحقیقات مشابه داخلی و خارجی نیز از جمله باباخانی و همکاران (۱۳۹۸)، از معیارهای خطای MAPE، RMSE و MAE؛ آریایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸)، از دو معیار MAE و R^2؛ امامقلی

1. Root mean square error
2. Normalize root mean square error
3. Mean absolute error

و یاسی (۱۳۹۸) از معیارهای MAPE، RMSE و کانل و همکاران[1] (۲۰۰۷) و حسین و همکاران[2] (۲۰۱۴) از معیار RMSE ٪ استفاده شده است.

معیار NRMSE بر حسب درصد و معیارهای RMSE و MAE بر حسب واحد پارامتر مورد بررسی بیان می‌شوند. مقدار NRMSE ٪۱۰، ۱۰ تا ۲۰٪ و ۲۰ تا ۳۰٪ به ترتیب نشانگر وضعیت عالی، مناسب و متوسط مدل در شبیه‌سازی است. زمانی که مقدار این ضریب بیش از ۳۰ ٪ باشد نشان‌دهنده‌ی عدم اطمینان از مدل است. معیار RMSE متوسط پراکندگی اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. هر چه میزان معیارهای فوق به صفر نزدیک‌تر باشد، مدل از کارائی بهتری برخوردار است، به‌طوری‌که اگر تمامی مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای با هم برابر شوند، مقدار عددی این شاخص‌ها برابر صفر خواهند بود.

$$RMSE \cong \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{n} \right\}^{1/2} \quad (۲)$$

$$NRMSE \cong \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{n} (S_i - O_i)^2}{n} \right\}^{1/2} \times \frac{100}{\overline{O}} \quad (۳)$$

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

که در آن‌ها، S_i مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل، O_i مقادیر اندازه‌گیری شده، n تعداد مقادیر شبیه‌سازی شده یا اندازه‌گیری شده و $\overline{O}$ مقدار متوسط پارامتر اندازه‌گیری شده است.

۳-یافته‌ها و بحث

۳-۱-واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

واسنجی عبارت است از تخمین پارامترهای مدل به نحوی که اختلاف بین مقادیر اندازه‌گیری شده یک یا چند متغیر و مقادیر شبیه‌سازی شده آنها توسط مدل به حداقل برسد. پس از واسنجی، صحت‌سنجی مدل با استفاده از داده‌های مستقل و بدون تغییر در ضرایب و پارامترهای واسنجی‌شده، به منظور اثبات کارایی مدل در

1. Kannel et al.
2. Hossain et al.

شبیه‌سازی انجام می‌شود. اگر در این مرحله تطابق خوبی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود داشته باشد مدل برای استفاده در هدف مورد نظر قابل اطمینان می‌باشد.

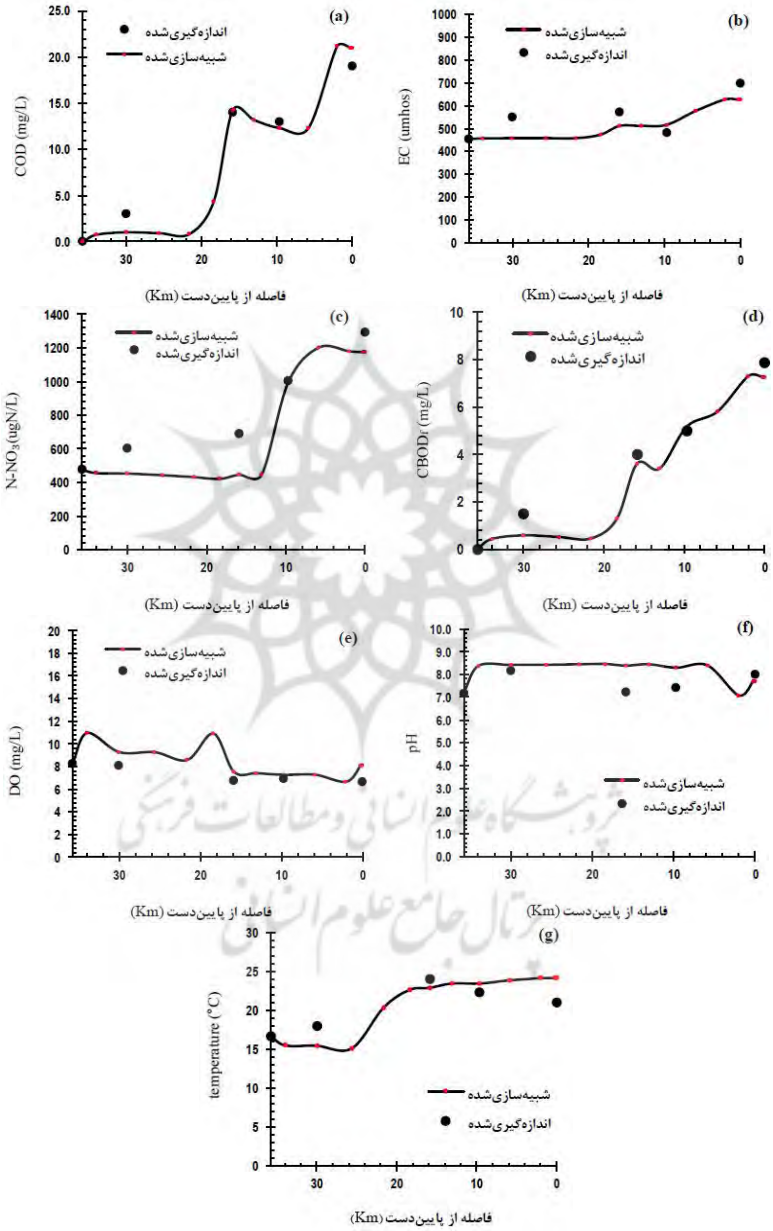
در این پژوهش واسنجی خودکار مدل به منظور تعدیل ضرایب سینتیکی جهت تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزا بصورت خودکار انجام گرفت. ضرایب و نرخ‌های مختلف مدل که در مرحله واسنجی نهایی شدند در جدول ۱ آمده است.

در ادامه نتایج واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی و دما در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده مقادیر پارامترهای pH (در هر دو ماه) و EC (در تیرماه) در طول رودخانه تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد. این موضوع حاکی از توان خودپالایی رودخانه در محدوده‌ی مطالعاتی می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی مدل در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مدل نیز این روند بدون تغییر را نشان می‌دهد. در تحقیق هاشمی و همکاران (۱۳۹۷)، در شبیه‌سازی رودخانه تالار همین نتیجه برای این دو پارامتر بدست آمد. باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز در تحقیقی که بر روی رودخانه دیواندره انجام دادند، عنوان کردند همخوانی زیادی بین مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی پارامتر pH وجود دارد، زیرا در آب‌های سطحی مقدار pH در طی مسیر با کربنات و بی‌کربنات‌هایی که در مسیر وجود دارد به حد غلظت تعادل می‌رسد. در هر دو ماه تیر و شهریور تغییرات اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی (CBOD) و اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) در ابتدای مسیر رودخانه دارای مقدار کمی می‌باشد. در اواسط طول محدوده‌ی مطالعاتی با پیوستن شاخه فرعی کرگانه به رودخانه و همچنین در فواصل انتهایی بازه‌ی مورد مطالعه با ورود منابع آلاینده‌ای چون کشتارگاه‌ها و واحدهای صنعتی از جمله الکل‌سازی، این دو پارامتر با شیب تندی افزایش می‌یابند. با توجه به اینکه رودخانه خرم‌آباد مصرف کشاورزی دارد و با توجه به استانداردهای زیست‌محیطی برای حد مجاز دو پارامتر BOD و COD (به ترتیب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر) آب رودخانه از لحاظ این دو پارامتر مشکلی برای مصرف کشاورزی ندارد. این درحالی است که رودخانه با توجه به مقدار تخلیه پساب‌های گوناگون قادر به خودپالایی خود در این دو پارامتر در بازه‌ی مطالعاتی نمی‌باشد به‌طوری‌که تفاوت مقادیر CBOD و COD در ابتدا و انتهای بازه‌ی مطالعاتی به ترتیب حدود ۲۰ و ۸ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

جدول (۱): مقادیر پارامترها و ضرایب واسنجی‌شده مدل QUAL2Kw

Table (1): Calibrated parameters and coefficients of QUAL2Kw model

پارامتر		مقدار	واحد	نماد
استوکیومتری	کربن	۴۰	gC	gC
	نیتروژن	۷,۲	gN	gN
	فسفر	۱	gP	gP
	وزن خشک	۱۰۰	gD	gD
	کروفیل	۱	gA	gA
اکسیژن	مدل هوادهی	Internal	-	-
	ضریب اصلاحی دما	۱/۰۲۴	-	θ_a
	اکسیژن برای اکسیداسیون کربن	۲/۶۹	gO_2/gC	r_{oc}
	مدل محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون CBOD	نمایی	-	-
	پارامتر محدودکننده اکسیژن در اکسیداسیون CBOD	۰/۶	L/mgO2	K_{socf}
	مدل افزایش‌دهنده اکسیژن در دنیتریفیکاسیون	نمایی	-	-
	پارامتر افزایش‌دهنده اکسیژن در دنیتریفیکاسیون	۰/۶	L/mgO2	K_{sodn}
اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی کند	نرخ هیدرولیز	۳/۲۴۶۲	/d	k_{hc}
	ضریب اصلاحی دما	۱/۰۴۷	-	θ_{hc}
	نرخ اکسیداسیون	۰/۴۵۶۳۸	/d	K_{dcs}
	ضریب اصلاحی دما	۱/۰۴۷	-	θ_{dcs}
اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی تند	نرخ اکسیداسیون	۰/۶۵۸	/d	K_{dc}
	ضریب اصلاحی دما	۱/۰۴۷	-	θ_{dc}
نیترات	دنیتریفیکاسیون	۰/۸۲۳۹	/d	K_{dn}
	ضریب اصلاحی دما	۱/۰۷	-	θ_{dn}
	انتقال دنیتریفیکاسیون بستر	۰/۴۸۴۶۶	m/d	v_{di}
اسیدیته	نسبت فشار دی‌اکسیدکربن	۳۴۷	ppm	p_{CO2}
اکسیژن‌خواهی شیمیایی	نرخ زوال	۰/۸	/d	-
	سرعت ته‌نشینی	۱	m/d	-

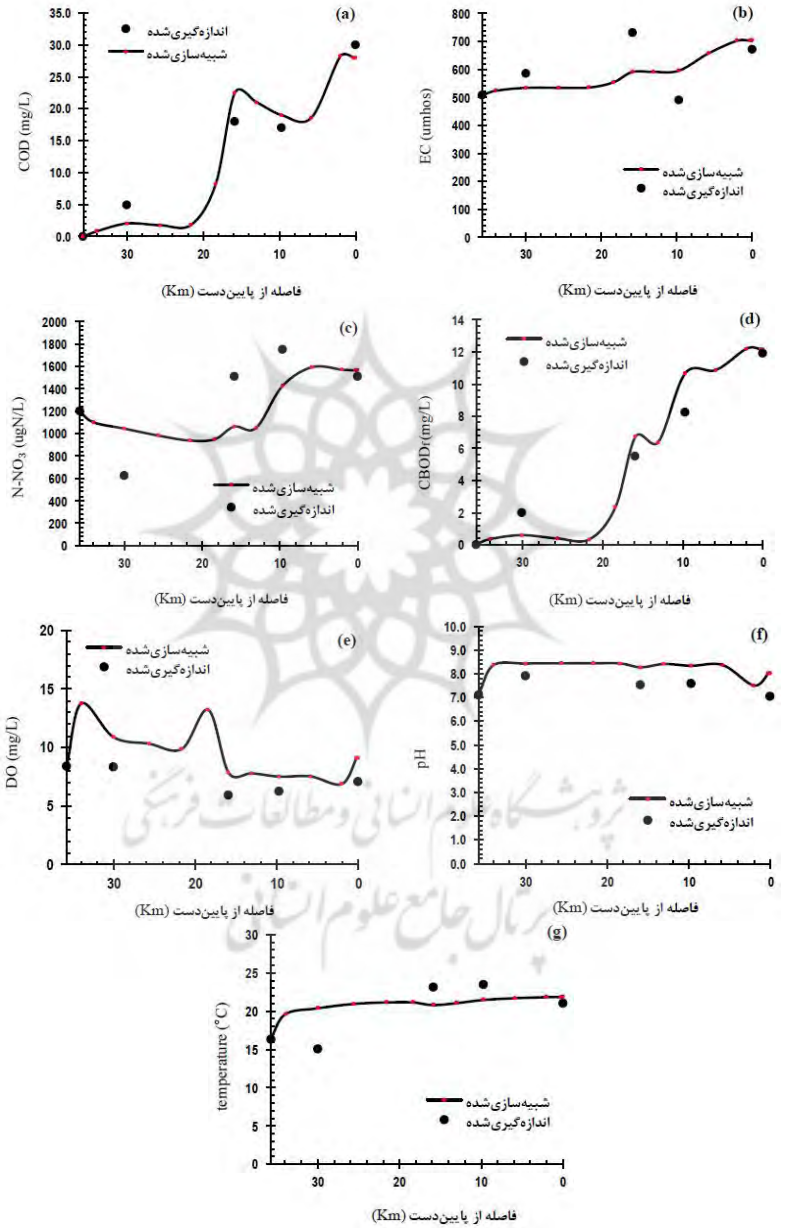


شکل (۴): تغییرات پارامترهای شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در مرحله‌ی واسنجی مدل

a) COD, b) EC, c) N-NO_3, d) $CBOD_f$, e) DO, f) pH, g) TMP

Fig (4): Changes in simulated and measured parameters in the model calibration stage

a) COD, b) EC, c) N-NO_3, d) $CBOD_f$, e) DO, f) pH, g) TMP



شکل (۵): تغییرات پارامترهای شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده در مرحله‌ی صحت‌سنجی مدل

a) COD, b) EC, c) N-NO_3, d) $CBOD_f$, e) DO, f) pH, g) TMP

Fig (5): Changes in simulated and measured parameters in the model validation stage

a) COD, b) EC, c) N-NO_3, d) $CBOD_f$, e) DO, f) pH, g) TMP

تحقیق حسینی و همکاران (۱۳۹۶) در رودخانه کارون نیز حاکی از عدم خودپالایی پارامتر اکسیژن‌خواهی زیست‌شیمیایی کربنی در محدوده شهر اهواز است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نیتروژن نیترات (برای هر دو ماه تیر و شهریور) و مقادیر واقعی این پارامتر روند مشابهی را نشان می‌دهد. در تیرماه این روند افزایشی است اما از ابتدای مسیر تا حدود کیلومتر ۱۵ (قبل از پیوستن شاخه فرعی به رودخانه) نیترات اندازه‌گیری‌شده افزایش چندانی را نشان نمی‌دهد، با پیوستن رودخانه‌ی کرگانه به خرم‌رود و در ادامه با تخلیه‌ی پساب حاصل از تصفیه‌خانه شهری به رودخانه، NO_3 بطور قابل توجهی افزایش می‌یابد. امامقلی و یاسی (۱۳۹۸) در تحقیقی که بر روی رودخانه قزل‌اوزن انجام دادند، افزایش غلظت نیترات را به دلیل ورود رودخانه چم زرد عنوان کرده است. در شهریورماه از بالادست تا کیلومتر ۵، میزان نیترات اندازه‌گیری‌شده کاهش نشان می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی خودپالایی رودخانه در این بازه می‌باشد. از کیلومتر ۵ تا حدود کیلومتر ۳۰ با تخلیه پساب حاصل از منابع آلاینده فوق به رودخانه این پارامتر روند افزایشی بخود می‌گیرد و مجددا از کیلومتر ۳۰ تا پایین‌دست روند نزولی پیدا می‌کند. اکسیژن محلول (DO) اندازه‌گیری‌شده در هر دو ماه از ابتدا تا کیلومتر ۱۵ از بالادست روند کاهشی دارد این در حالی است که مدل در این محدوده روند نوسانی دارد اما در ادامه تا انتهای مسیر رودخانه، روند تغییرات این پارامتر اندازه‌گیری‌شده در تیرماه تقریباً بدون روند و در شهریورماه یک مقدار افزایشی است. عوامل بسیاری باعث تغییر در مقدار اکسیژن محلول موجود در آب می‌شوند. منابع اصلی افزایش اکسیژن محلول در آب رودخانه عبارتند از: هوادهی از طریق اتمسفر، بهبود هوادهی به واسطه‌ی سرریز و سایر سازه‌ها، فتوسنتز، اکسیژن محلول ورودی از جریان‌های خارجی. اصلی‌ترین عوامل کاهش اکسیژن محلول آب رودخانه نیز عبارتند از: اکسیداسیون مواد آلی و سایر مواد موجود در ستون آب، از دست دادن اکسیژن در آبهای فوق اشباع، تنفس گیاهان آبزی و اکسیژن خواهی رسوبات بستر (ککس[1]، ۲۰۰۳: ۳۰۳). شبیه‌سازی دما در دو ماه تیر و شهریور نیز انجام شد نتایج بدست آمده در تیرماه تطابق بهتری با مدل نشان داد به‌طوری‌که در شهریورماه مدل‌سازی تغییرات خاصی را برای دما نشان نمی‌دهد این در حالی است که در ایستگاه‌های اندازه‌گیری‌شده (بویژه ایستگاه ۲ و ۳) نوسانات دما مشاهده می‌شود.

1. Cox

۳-۲-ارزیابی مدل QUAL2Kw

شاخص‌های آماری جهت ارزیابی نتایج مدل در دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی محاسبه شد (جدول ۲). بررسی مقادیر جدول نشان می‌دهد بهترین نتیجه‌ی شبیه‌سازی مربوط به پارامتر pH است به‌طوری‌که شاخص NRMSE در هر دو مرحله واسنجی و صحت‌سنجی مدل کمترین مقدار و به ترتیب برابر ۸/۸۳ و ۹/۲۲ درصد بدست آمد. همچنین شاخص RMSE و MAE برای این پارامتر در مرحله واسنجی به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۵۲ و در مرحله‌ی صحت‌سنجی به ترتیب ۰/۶۸ و ۰/۶ محاسبه شد. در تحقیقات حسینی و حسینی (۱۳۹۶)، هاشمی و همکاران (۱۳۹۷) و باباخانی و همکاران (۱۳۹۸) نیز بهترین شبیه‌سازی مدل برای پارامتر pH بدست آمد. آریایی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۸)، عنوان کردند که هرچه تغییرات یک پارامتر در طول رودخانه و در بازه‌های مختلف کمتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی آن پارامتر بیشتر خواهد بود. شاخص NRMSE در مرحله واسنجی مدل برای سایر پارامترهای کیفی کمتر از ۲۰ درصد تعیین شد که نشان دهنده دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی است. همچنین شاخص فوق برای پارامتر دما نیز ۹/۴۲ درصد بدست آمد که بیانگر توانایی مدل در شبیه‌سازی این پارامتر است. با این وجود ضعیف‌ترین شبیه‌سازی در این مرحله را می‌توان به پارامتر NO_3 نسبت داد. باباخانی و همکاران (۱۳۹۸)، ورود منابع غیرنقطه‌ای ناشناخته و نبود اطلاعات کافی از منابع نقطه‌ای ورودی و خروجی به رودخانه را از دلایل ضعف در شبیه‌سازی توسط مدل دانستند. نتایج حاصل از صحت‌سنجی مدل نیز حاکی از دقت مناسب مدل در شبیه‌سازی می‌باشد. در این مرحله نیز حدود شاخص‌های آماری در حد قابل قبولی قرار داشتند به‌طوری‌که شاخص NRMSE برای پارامترهای EC، دما، COD، NO_3، $CBOD_f$ و DO به ترتیب ۱۳/۸۶، ۱۴/۰۵، ۱۸/۳۵، ۲۳/۸۲، ۲۴/۱۲ و ۲۴/۶۵ درصد بدست آمد. شاخص میانگین خطای مطلق نیز برای پارامترهای فوق به ترتیب ۶۵/۷۷ میکروموس بر سانتی‌متر، ۲/۰۹ درجه سانتی‌گراد، ۲/۱۳ میلی‌گرم بر لیتر، ۲۵۱/۳۷ میلی‌گرم نیتروژن بر لیتر، ۱/۰۴ میلی‌گرم بر لیتر و ۱/۵۵ میلی‌گرم بر لیتر محاسبه شد. در نهایت با توجه به نتایج حاصل از واسنجی و صحت‌سنجی مدل می‌توان گفت که مدل با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای فوق است. شکری و همکاران (۱۳۹۴)؛ الام و همکاران[1] (۲۰۱۵) و سایر محققین نیز در تحقیقات خود کارایی مناسب مدل QUAL2Kw را گزارش کردند.

1- Allam et al.,

جدول (۲): مقادیر معیارهای آماری در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل QUAL2Kw

Table (2): Values of statistical criteria in calibration and validation stages of QUAL2Kw model

مرحله	شاخص	EC	COD	$CBOD_f$	NO_3	pH	DO	TEM
واسنجی	RMSE	۶۰/۹۸	۱/۲۸	۰/۵۳	۱۳۶/۱۳	۰/۶۷	۰/۹۱۷	۱/۹۲
	NRMSE	۱۱/۰۵	۱۳/۰۷	۱۴/۳۰	۱۶/۷۷	۸/۸۳	۱۲/۴۹	۹/۴۲
	MAE	۵۱/۹۸	۰/۹۷	۰/۴۲	۱۰۱/۵۰	۰/۵۲	۰/۷۲	۱/۵۷
صحت‌سنجی	RMSE	۸۲/۶۹	۲/۵۷	۱/۳۳	۳۱۳/۹۳	۰/۶۸	۱/۷۸	۲/۷۷
	NRMSE	۱۳/۸۶	۱۸/۳۵	۲۴/۱۲	۲۳/۸۲	۹/۲۲	۲۴/۶۵	۱۴/۰۵
	MAE	۶۵/۷۷	۲/۱۳	۱/۰۴	۲۵۱/۳۷	۰/۶	۱/۵۵	۲/۰۹

۴-نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل شبیه‌سازی کیفی رودخانه QUAL2Kw در طول یک بازه ۳۵ کیلومتری از رودخانه‌ی خرم‌آباد طی دو ماه کم‌آبی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی مدل منابع آلاینده شناسایی و ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طول رودخانه مشخص شد. برای شبیه‌سازی، محدوده‌ی مطالعاتی به ۱۱ بازه تقسیم و سپس با ورورد اطلاعات کمی و کیفی به واسنجی و صحت‌سنجی مدل پرداخته شد. در مرحله واسنجی ضرایب سینتیکی مدل برای سری اول داده‌ها (تیرماه) واسنجی گردید و با داده‌های شهریور ماه صحت‌سنجی مدل انجام شد. نتایج نشان داد که مقدار پارامترهای اکسیژن‌خواهی شیمیایی، اکسیژن خواهی زیست‌شیمیایی و نیترات بعد از پیوستن شاخه فرعی کرگانه به رودخانه و همچنین ورود پساب منابع آلاینده‌ای چون کشتارگاه‌ها، تصفیه‌خانه شهری، کارخانه شیر و واحد صنعتی الکل‌سازی به رودخانه، افزایش داشتند. اما پارامترهای pH (در هر دو ماه) و EC (در تیرماه) در طول مسیر رودخانه تغییر چندانی نشان ندادند به بیان دیگر رودخانه توان خودپالایی این پارامترها را دارد. با توجه به نتایج تحقیق و اینکه رودخانه‌ی خرم‌آباد برای اهداف کشاورزی و صنعت استفاده می‌شود و منبع تأمین آب شرب نمی‌باشد در حال حاضر عامل محدودکننده‌ای برای تأمین این هدف در مسیر مورد مطالعه وجود ندارد. شاخص آماری NRMSE در هر دو مرحله‌ی واسنجی و صحت‌سنجی مدل برای شبیه‌سازی اسیدیته در محدوده عالی و برای شبیه‌سازی هدایت هیدرولیکی در محدوده مناسب قرار گرفت. شاخص فوق برای سایر پارامترها نیز در مرحله‌ی واسنجی مدل بین ۱۰ تا ۲۰ درصد و در مرحله‌ی صحت‌سنجی بین ۱۴ تا ۲۵ درصد تعیین شد. نتایج بدست آمده از واسنجی و صحت‌سنجی مدل حاکی از کارایی مناسب مدل در شبیه‌سازی پارامترهای کیفی بوده است. در پایان پیشنهاد می‌شود علاوه بر فصل کم‌آبی در فصول پرآبی نیز مدل‌سازی انجام گردد همچنین از مدل‌های کیفیت دو بعدی برای شبیه‌سازی رودخانه‌ی خرم‌آباد استفاده شود و نتایج بدست آمده از آن با تحقیق حاضر مقایسه و کارایی مدل‌های یک بعدی و دو بعدی مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد.

۵-منابع

Afrous, A., & Zallaghi, M. (2020). Qualitative Simulation of Nitrate and Phosphate along the Dez River using QUAL2KW Model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, *50*(9), 2099-2111.

Allam, A., Fleifle, A., Tawfik, A., Yoshimura, C., & El-Saadi, A. (2015). A simulation-based suitability index of the quality and quantity of agricultural drainage water for reuse in irrigation. *Science of the Total Environment*, *536*, 79-90.

Areeyaenezhad, R., Sarai Tabrizi, M., & Babazadeh, H. (2019). Modeling Water Quality of Rivers Using QUAL2Kw Model (Case Study: Shahroud River). *Journal of Environmental Science and Technology*, *21*(7), 1-13.

Azimi, M.M. (2008). Investigation of uncertainty of river quality parameters, Case study: Jajroud River. Master Thesis, University of Water and Power Industry (Shahid Abbaspour), Faculty of Water, 105.

Babakhani, Z., Saraee Tabrizi, M., & Babazadeh, H. (2019). Determining the Self-Purification capacity of Diwandara River using model qual2kw. *Journal of Echo Hydrology*, 6(3), 673-684.

Banejad, H., Kamali, M., Amirmoradi, K., & Olyaie, E. (2013). Forecasting some of the qualitative parameters of rivers using wavelet artificial neural network hybrid (W-ANN) model (case of study: Jajroud river of Tehran and Gharaso river of Kermanshah). *Iranian Journal of Health and Environment*, *6*(3), 277-294.

Bayati khatibi, M., Shahbazi, M., & Heidari, M. A. (2015). Speculations and Analysis on the Changes in Water Quality of Ahar River and its Impacts on Human Health. *Hydrogeomorphology*, 1(1), 93-109.

Chang, H. (2008). Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea. *Water Research*, *42*(13), 3285-3304.

Cox, B. A. (2003). A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. *Science of the Total Environment*, *314*, 303-334.

Emamgholi, Z., & Yasi, M. (2020). Impacts of variation of river geometry on flowing water quality (Case Study: Ghezel Ozan River). *Journal of Hydraulics*, *14*(4), 1-17.

Ghafari, P., Tavakolizadeh, A.A., & Zarshenas, M. (2006). Investigation of mathematical models for networking in rivers and wetlands. Seventh International Seminar on River Engineering, Shahid Chamran University.

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

Hashemi, Z., Gholami Sefidkouhi, M. A., & Ahmadi, K. (2019). Evaluation and Simulation of Talar River Quality by using QUAL2KW Model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *12*(6), 1500-1510.

Hemond, H. F., & Fechner, E. J. (2014). *Chemical fate and transport in the environment*. Elsevier, 486.

Hoseini, P., & Hoseini, Y. (2017). Changes in Self-Purification Capacity of the Ahvaz Karun River in 2008 and 2014 using QUAL2K. *Amirkabir Journal. Civil Eng.* 49(1), 35-45.

Hossain, M. A., Sujaul, I. M., & Nasly, M. A. (2014). Application of QUAL2Kw for water quality modeling in the Tunggak River, Kuantan, Pahang, Malaysia. *Research Journal of Recent Sciences*, 3(6),6-14.

Kannel, P. R., Lee, S., Lee, Y. S., Kanel, S. R., & Pelletier, G. J. (2007). Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. *Ecological modelling*, *202*(3-4), 503-517.

Oliveira, B., Bola, J., Quinteiro, P., Nadais, H., & Arroja, L. (2012). Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management: Cértima River as a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184*(10), 6197-6210.

Pelletier, G.J., & Chapra, S.C. (2005). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1), a modeling framework for simulating river and stream water quality. *Washington: Department of Ecology*.

Sarda, P., & Sadgir, D. P. (2015). Water Quality Modeling and Management of Surface Water using Soft Tool. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, *4*(9), 2988-2992.

Shahidi, A., & Khadempour, F. (2020). Investigating the Qualitative Satus of Groundwater in the Plain of Khorasan Razavi Province Using GWQI and AWQI Indexes and Its Zoning with Geographic Information System (GIS). *Hydrogeomorphology*, 6(22), 1-20.

Sharma, D., Kansal, A., & Pelletier, G. (2017). Water quality modeling for urban reach of Yamuna River, India (1999–2009), using QUAL2Kw. *Applied Water Science*, *7*(3), 1535-1559.

Shokri, S., Hooshmand, A. R., & Moazed, H. (2016). Qualitative Simulation of Ammonium and Nitrate along the Gargar River Using the Qual2Kw Model. *Journal of Wetland Ecology*, *6*(23), 57-68.

Torabiyan, A., & Hashemi, H. (2002). Surface water quality modeling, Tehran: University of Tehran Press, 528.