

## مقدمه

مطالعه کمی و کیفی رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین عواملی است که بایستی بررسی شود چرا که رودخانه‌ها در دسترس‌ترین منبع تامین آب مورد نیاز جهت مصارف بخش‌های مختلف می‌باشند [۲۱]. لذا این دست مطالعات نقش مهمی در مدیریت پایدار اکوسیستم‌های رودخانه‌ای دارد و منجر به شناسایی منشاء منابع آلاینده و ارائه راهکار جهت کاهش اثرات منفی آن و در نهایت بهبود وضعیت کیفیت منابع آب می‌شود [۲۵].

در این راستا محمدی قلعه‌نی و همکاران [۱۳ و ۱۴]، توان خودپالایی رودخانه‌ها را با توجه به میزان تأثیرپذیری اکسیژن محلول و سه ضریب هوادهی، پخش طولی و زوال مورد بررسی قرار دادند. ایشان در تحقیق مذکور از داده‌های رودخانه سفیدرود و یک کانال بتنی با طول مناسب (که به عنوان مدل فیزیکی بکار رفت) استفاده نمودند. هم‌چنین از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی برخی از پارامترهای کیفیت آب رودخانه مورد نظر استفاده و با ارزیابی شاخص‌های خطا، دقت استفاده از معادله "پارخوراست و پومروی" را بالا و توان خود پالایی رودخانه را در مهر ماه به دلیل ورود آلاینده‌ها پایین ارزیابی نمودند.

حسینی و همکاران [۸] نیز برخی از پارامترهای آب رودخانه قره‌سو اردبیل را با استفاده از مدل QUAL2Kw شبیه‌سازی کردند. در این تحقیق پارامترهای BOD، DO، pH، NO<sub>3</sub>، و درجه حرارت با استفاده از داده‌های چهار ایستگاه شبیه‌سازی شد و بر اساس نتایج مقدار خطای استاندارد برای DO برابر ۱/۵۷، برای BOD، ۵/۷۸ و برای pH برابر ۰/۹۵ محاسبه نمود.

مهراسی و همکاران [۱۱] شبیه‌سازی چند رودخانه‌ی کوچک را با مدل QUAL2K انجام دادند. ایشان پارامترهای کیفی آب رودخانه‌ای در زنجان شامل DO، BOD، NO<sub>3</sub>، نیتروژن و فسفر کل را شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد که میزان فسفر و نیتروژن بیش از حد مجاز بوده و لازم است با راهبردهای مدیریتی بخصوص در موارد توزیع کود کنترل شود. در تحقیقی ستی‌وان<sup>۵</sup> و همکاران [۲۰]، میزان حداکثر توان خودپالایی رودخانه‌ای از اندونزی را با استفاده از مدل QUAL2Kw مورد ارزیابی قرار دادند. محققین با اندازه‌گیری مقادیر BOD و COD در هفت ایستگاه به این نتیجه رسیدند که میزان حداکثر ظرفیت حمل BOD برابر ۰/۲۴ تن در

## بررسی تغییرات فصلی ضریب زوال آلودگی رودخانه بابلرود

رستم صادقی تالارپشتی<sup>۱</sup>، کیومرث ابراهیمی<sup>۲</sup> و عبدالحسین هورفر<sup>۳</sup>  
تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۳

## چکیده

در مطالعه حاضر، توان خودپالایی و مقادیر ضریب زوال آلودگی رودخانه بابلرود بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای کیفیت آب شامل DO، BOD، pH، EC، نترات، فسفر و درجه حرارت در دو فصل پاییز و زمستان از سال ۱۳۹۷ به همراه شبیه‌سازی با کاربرد مدل QUAL2Kw مورد مطالعه قرار گرفته است (برای مشاهده نتایج بهار و تابستان به [۱۸ و ۱۹] مراجعه شود). بر اساس نتایج، میانگین اکسیژن محلول بابلرود در تمامی فصول بجز تابستان بین ۶/۵۵ تا ۷/۶۵ و در تابستان برابر با ۵/۹۳ میلی‌گرم در لیتر به ثبت رسید. هم‌چنین میزان متوسط BOD در فصل تابستان برابر با ۳/۱۷ و در سایر فصول بین ۲/۱۷ تا ۲/۹۳ میلی‌گرم در لیتر اندازه‌گیری شد. مقادیر ضریب زوال بابلرود نیز براساس داده‌های میدانی و کاربرد مدل QUAL2Kw در فصل تابستان ۵/۵ و در بقیه فصول نیز بین ۰/۵ تا ۴ در روز برآورد شد. با توجه به نمودار اکسیژن محلول در روش استریترفلپس<sup>۴</sup> افت اکسیژن محلول در فصل بهار و پاییز در این رودخانه مشاهده نشد، در زمستان افت اکسیژن محلول ناچیز و مقدار آن ۶/۵ میلی‌گرم در لیتر و در تابستان ۵/۷ میلی‌گرم در لیتر ثبت شد.

**کلیدواژه‌ها:** کلیدواژه‌ها : اکسیژن خواهی، بازهوادهی، ضریب زوال، کیفیت آب، خودپالایی، محیط زیست

۱- فارغ التحصیل دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

۲- نویسنده مسئول و استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران. پست الکترونیک: EbrahimiK@ut.ac.ir

۳- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران.

4. Streeter-Phelps

5. Setiawan

رودخانه در ۸ ایستگاه تعیین و میزان  $K_1$  ضریب زوال با استفاده از رابطه استریتر فلپس تعیین گردید، علاوه بر آن بر اساس معادله توازن جرمی نیز مقادیر ضریب زوال را محاسبه و نتیجه گرفت که هر دو روش با توجه به ارقام بدست آمده با داشتن اختلاف کم مورد قبول می‌باشد.

پارمر<sup>۸</sup> و همکاران [۱۷]، آلودگی رودخانه «یامونا» هند را با استفاده از مدل QUAL2E شبیه‌سازی کردند. آنان میزان BOD و DO را اندازه‌گیری و پس از واسنجی مقدار ضریب همبستگی بین ارقام مشاهده شده و محاسبه شده را تعیین نمودند، نتایج نشان داد که مدل روی ضریب بازه‌دهی و ضریب زوال حساسیت بالایی دارد.

کاکس<sup>۹</sup> [۵]، تکنیک‌های مدل‌سازی اکسیژن محلول را در پایین دست رودخانه‌ها مورد بررسی قرار داد، وی از معادله توازن جرمی، و مدل تحلیلی استریتر فلپس استفاده نمود و با توجه به ورودی داده‌ها نتایج مختلفی را از روابط فوق بدست آورد و نهایتاً روش توازن جرمی را دقیق‌تر دانست.

نینگ<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۶]، کیفیت رودخانه در تایوان را با استفاده از مدل QUAL2E مورد بررسی قرار دادند، آنان با استفاده از داده‌های آماری جمع‌آوری شده میزان غلظت BOD، DO، فسفر و آمونیاک نیتروژن (NH<sub>3</sub>-N) را با استفاده از مدل شبیه‌سازی نمودند و نتیجه مدل را خوب ارزیابی کردند و توانستند برای آلودگی پایین دست رودخانه پیش‌بینی‌های لازم را بعمل و راهکار ارائه دهند.

رایت<sup>۱۱</sup> و مک‌دونل [۹]، بر اساس داده‌های ۳۶ قطعه از رودخانه در آمریکا رابطه‌ای بین دبی و ضریب زوال ارائه نمودند [۲۴]. هیدروساینس<sup>۱۲</sup>، [۹] رابطه‌ای بین عمق آب در رودخانه و ضریب زوال ارائه شد.

با توجه به بررسی منابع صورت گرفته مشاهده می‌شود که بیشتر تمرکز تحقیقات پیشین بر شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب خصوصاً DO، BOD، COD، pH و با استفاده از نسخه‌های مختلف مدل QUAL2E بوده است. بنابراین هدف از مطالعه حاضر برآورد و ارزیابی خود پالایی و تغییرات فصلی مقادیر ضرایب زوال بابلرود بر مبنای داده‌برداری‌های انجام شده و با استفاده از نرم‌افزار QUAL2Kw می‌باشد. به بیان دیگر در راستای مطالعه و برآورد ضریب زوال رودخانه بابلرود محققین حاضر طی تحقیق دیگری با داده‌برداری میدانی در فصول بهار و تابستان مقادیر ضرایب زوال رودخانه بابلرود را فقط بر اساس روش استریتر فلپس برآورد و گزارش کردند [۱۸] و [۱۹]. در مقاله حاضر نیز بررسی تغییرات فصلی ضریب زوال رودخانه بابلرود بر اساس داده‌برداری میدانی در چهار فصل از سال ۱۳۹۷ انجام و شبیه‌سازی‌های مربوطه با رویکرد

ساعت و برای COD مساوی ۰/۹۶ تن در ساعت بوده که میزان آلاینده رودخانه کمتر از این مقدار می‌باشد. دیاز<sup>۱</sup> و همکاران [۶]، ضریب زوال و ضریب هوادهی رودخانه سینو در کلمبیا آمریکا را در ۱۰ ایستگاه با اندازه‌گیری پارامترهای DO، BOD، درجه حرارت و مشخصات هیدرولیکی رودخانه تعیین کردند. با استفاده از رابطه استریتر-فلپس مقدار ضریب زوال و هوادهی را بین ۰/۱ تا ۰/۳۸ در روز محاسبه شده است. زینک<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۶)، برخی از پارامترهای رودخانه‌ها را با استفاده از مدل QUAL2K شبیه‌سازی نمودند ایشان در سه ایستگاه از رودخانه مقادیر COD، NH<sub>3</sub>-N و TP را اندازه‌گیری و ضریب زوال را ضمن شبیه‌سازی با نرم‌افزار QUAL2K از رابطه غلظت نیز محاسبه و نتایج دو روش را مقایسه نمودند. مقادیر ضریب زوال سه پارامتر فوق از روش غلظت به ترتیب برابر ۰/۲۴۲۸، ۰/۱۰۱۹ و ۰/۲۵۵۴ و با استفاده از مدل QUAL2K نیز ۰/۳۶۳۱، ۰/۲۰۴۶ و ۰/۲۵۴۵ محاسبه نمودند [۲۶]. منز<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲]، کاهش اکسیژن محلول را در رودخانه ویبیرا برزیل مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه نمونه برداری برای دو سال و در ۱۱ ایستگاه انجام گرفت و با استفاده از مدل استریتر-فلپس ضریب زوال را تعیین نمودند بیشترین ضریب زوال در زمستان و مساوی ۰/۱۵ در روز تعیین شد. تجزیه و تحلیل غلظت‌های DO و BOD نشان دهنده کاهش کیفیت آب رودخانه بوده که ناشی از انتشار مواد آلی پساب‌های کشاورزی و فاضلاب شهری بوده است [۱۲].

شجین<sup>۴</sup> و همکاران [۴]، تحقیقی روی مقادیر اکسیژن محلول و ضرایب آن برای رودخانه «ایک پوبا» نیجریه انجام دادند. در این بررسی میزان ضریب زوال  $K_1$  بیشتر از  $K_a$  محاسبه شد، مقدار ضریب هوادهی و ضریب زوال ( $k_1$  و  $K_a$ ) با استفاده از معادله تجربی که عمق و سرعت آب رودخانه و درجه حرارت دخالت داشته محاسبه شده است. بابار<sup>۶</sup> [۳]، کیفیت آب دو رودخانه در هند را با استفاده از مدل QUAL2E مورد بررسی قرار داد، DO، BOD و غلظت آمونیاک پارامترهایی بودند که مورد بحث قرار داده و صحت و اعتبار سنجی مدل با استفاده از خطای RMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت طی نتایج بدست آمده وضعیت رودخانه را از نظر آلودگی بحرانی ارزیابی نموده و خود پالایی رودخانه حتی در زمستان نیز بدلیل جذب بالای آلودگی ضعیف قلمداد نمود. لمیدیا<sup>۷</sup> [۱]، با استفاده از میزان اکسیژن محلول و سایر پارامترها مقادیر ضریب زوال ( $K_1$ ) را برای رودخانه یوبوینا در برزیل تعیین کردند. در این تحقیق پارامترهای DO، BOD، شیب، عمق و سرعت آب

1. Diaz
2. Zhang
3. Menezes
4. Chiejine
5. Ikpoba river
6. Babbar
7. Almeida

8. Parmar
9. Cox
10. Ning
11. Wright
12. Hydroscience

آمار اخذ شده از سازمان آب منطقه ای استان مازندران (طول آماری ۴۵ سال) در ایستگاه بابل ۱۵/۳۶ متر مکعب در ثانیه می باشد.

### نمونه برداری از رودخانه

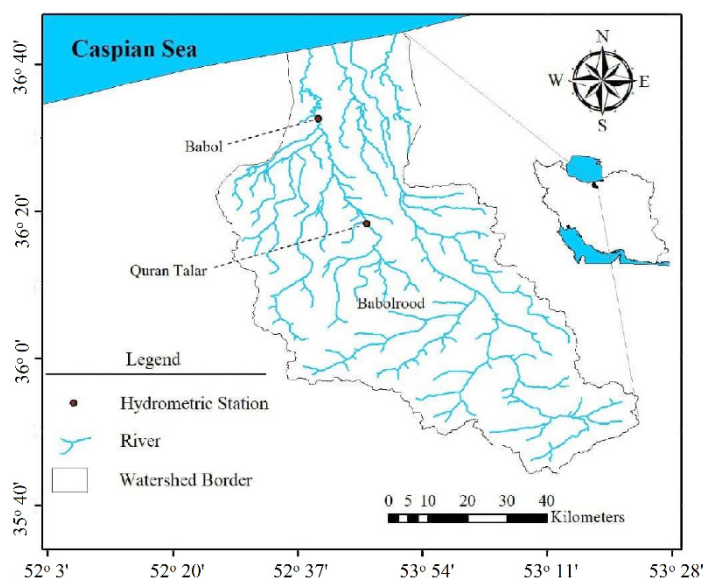
نمونه برداری کیفی از رودخانه برای تعیین پارامترهای DO، BOD، EC، pH، NO<sub>3</sub>، فسفر و درجه حرارت و محاسبه ضریب زوال در ۳ مقطع از رودخانه شامل ۲ بازه متوالی (فاصله مقطع اول و دوم به طول ۱۳۰۰ متر و مقطع دوم و سوم به طول ۱۵۰۰ متر) انجام شد. بازه های مذکور طوری انتخاب شدند که هیچگونه ورودی و خروجی جریان فرعی در این فاصله به رودخانه وجود نداشته باشد. طی بازدیدهای میدانی بعمل آمده، این محدوده در بالادست روستای قرآن-تالار واقع شده است. نمونه برداری از رودخانه در چهار نوبت و در اواسط هر فصل از سال ۱۳۹۷ انجام شد. اندازه گیری پارامترهای کیفیت آب از نمونه ها با وسایل و تجهیزات آزمایشگاه کیفیت آب دانشگاه تهران و آزمایشگاه اداره کل محیط زیست استان البرز، انجام گرفت. علاوه بر آن مشخصات هیدرولیکی رودخانه شامل عمق جریان، سرعت و دبی رودخانه در مقاطع مورد مورد بررسی، اندازه گیری و در شبیه سازی ها و محاسبات مورد استفاده قرار گرفت. نتایج مشخصات مربوط به نتایج آزمایشات فقط پاییز و زمستان به جهت حفظ اختصار برای رودخانه بابلرود در جدول (۱) و (۲) ارائه شده است (برای مشاهده نتایج بهار و تابستان به [۱۸ و ۱۹] مراجعه شود)

استریتر فلپس (برای فصول پاییز و زمستان) و به موازات آن کاربست نرم افزار QUAL2Kw برای هر چهار فصل از سال ۱۳۹۷ انجام و ارائه شده است.

## مواد و روش ها

### رودخانه بابلرود

حوزه آبخیز رودخانه بابلرود از حوزه های کوهستانی بوده و در شمال کشور واقع شده است و این رودخانه از بخش های شمالی رشته کوه های البرز سرچشمه می گیرد. بطور کلی این محدوده از نظر جغرافیایی در طول شرقی ۵۲ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۴ دقیقه و عرض شمالی ۳۶ درجه و صفر دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۳ دقیقه واقع شده است. منطقه مورد مطالعه جزو استان مازندران و شهرستان های بابل، بابلسر و سواد کوه می باشد. شاخه اصلی رودخانه از جنوب به شمال جاری بوده و در نهایت رواناب آن به دریای خزر می ریزد. نقشه موقعیت جغرافیایی رودخانه بابلرود در شکل (۱) ارائه شده است. حوزه آبخیز رودخانه بابلرود ۱۷۴۰ کیلومترمربع تا محل تخلیه به دریا مساحت دارد و طول آبراهه اصلی آن ۱۰۱/۵ کیلومتر می باشد. با توجه به موقعیت رودخانه بابلرود ریزش های جوی حوزه آن عمدتاً به صورت باران بوده و رواناب آن کمتر تحت تاثیر ذوب برف می باشد. بر روی این رودخانه دو ایستگاه هیدرومتری قرآن-تالار و بابل برای اندازه گیری دبی در نظر گرفته شده است. متوسط دبی رودخانه بابلرود با توجه به بررسی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی رودخانه بابلرود

Fig 1. Geographical position of Babolrood River

ارزیابی دقت مدل

برای ارزیابی دقت مدل QUAL2Kw به منظور تعیین خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی و صحت سنجی مدل، از شاخص‌های رایج شامل جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE)، میانگین خطای اریبی (MBE)، ضریب تغییرات میانگین مجذور خطاها (CVRMSE) و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) استفاده شد. میانگین مجذور خطاها (RMSE)، این کمیت طبق رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=0}^N (C_i - M_i)^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

که در آن: C<sub>i</sub> داده‌های مشاهداتی و M<sub>i</sub> نیز مقدار داده شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد. هر چه مقدار این پارامتر کمتر و به صفر نزدیک باشد به منزله اختلاف حداقل بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بوده و نشان از عملکرد بهتر مدل دارد. هم‌چنین میانگین خطای اریبی (MBE)، از رابطه ۲ محاسبه می‌شود.

$$MBE = \left\{ \frac{\sum_{i=0}^N (C_i - M_i)}{N} \right\} \quad (2)$$

که در آن: C<sub>i</sub> داده‌های مشاهداتی و M<sub>i</sub> نیز مقدار داده شبیه‌سازی شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد. هر چه قدر مطلق MBE کمتر باشد بیانگر بالا بودن دقت مدل می‌باشد. مقادیر مثبت MBE نشان دهنده آن است که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل بالاتر است و مقادیر منفی نیز بیانگر کم پیش‌بینی شده توسط مدل می‌باشد. کمیت ضریب تغییرات میانگین مجذور خطاها (CVMRSE%)، هر چقدر این مقدار کوچکتر باشد بیانگر دقت بیشتر مدل است و نشان می‌دهد که بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌های مدل اختلاف کمتری وجود دارد. مقداری در حدود ۴۰ درصد برای این پارامتر قابل قبول و بالاتر از ۷۰ درصد به معنای عدم دقت نتایج شبیه‌سازی‌های مدل است [۷]. این کمیت از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$CVMRSE\% = \left\{ \frac{RMSE}{average(observations)} \times 100 \right\} \quad (3)$$

که در آن RMSE میانگین مجذور مربعات خطاها و مخرج کسر میانگین داده‌های مشاهداتی است. کمیت ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده مدل و مقادیر واقعی را نشان می‌دهد و مقادیر آن بین ۰ و ۱ متغیر است. هر چه میزان همبستگی بین مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده‌ای بیشتر باشد مقدار آن به عدد ۱ نزدیک‌تر می‌شود.

نتایج

در مطالعه حاضر با تکمیل مطالعات میدانی و در ادامه مطالعات [۱۸ و ۱۹] برای هر چهار فصل ضریب زوال رودخانه بابلرود با رویکرد استریت‌ر فلیس و به موازات آن کاربرد نرم‌افزار QUAL2Kw تعیین و مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته است. در این راستا،

جدول ۱- مقادیر پارامترهای کیفیت آب رودخانه بابلرود در آزمایش پاییز مورخه ۹۷/۰۸/۱۰

Table 1. Water Quality Parameters of Babolrood River, Third Monitoring - Nov. 2018

Sec. 3	Sec. 2	Sec. 1	Parameter
7.92	7.63	7.41	DO(mg/l)
2.15	2.13	2.23	BOD5(mg/l)
345	342	337	EC(μs/cm)
7.80	7.61	7.53	pH
3.3	2.8	3.5	Nitrate (mg/l)
0.032	0.154	0.1	P(mg/l)
20	19	20	T°C(Water)
21.5	20	21.5	T°C(air)

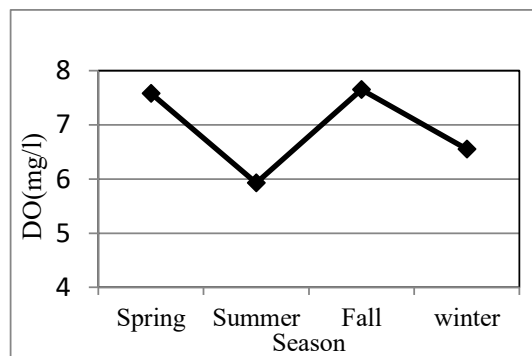
جدول ۲- مقادیر پارامترهای کیفیت آب رودخانه بابلرود در آزمایش زمستان مورخه ۹۷/۱۱/۲۵

Table 2. Water Quality Parameters of Babolrood River, Fourth Monitoring - Feb.2019

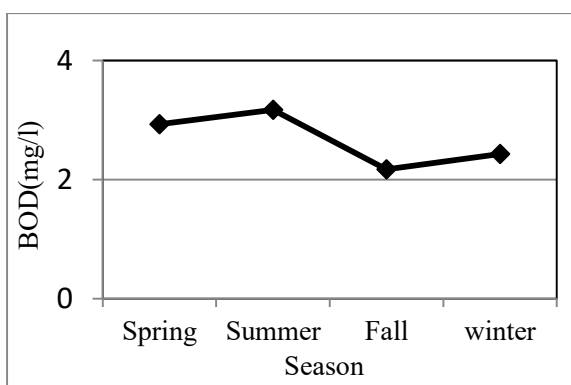
Sec. 3	Sec. 2	Sec. 1	Parameter
6.55	6.5	6.61	DO(mg/l)
2.2	2.4	2.7	BOD5(mg/l)
393	392	391	EC(μs/cm)
7.25	7.04	6.98	pH
9.5	10.4	6.3	Nitrate (mg/l)
0.167	0.224	0.207	P(mg/l)
12	12	11	T°C(Water)
15	14.5	15	T°C(air)

مدل QUAL2Kw

امروزه مدل QUAL2Kw به‌طور گسترده و با حداقل هزینه جهت شبیه‌سازی کیفیت آب و تعیین بار آلودگی رودخانه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل از بین سایر مدل‌ها به دلیل قابلیت دسترسی آسان، هزینه کم، گستردگی در مطالعات آلودگی، کاربرد بیشتری داشته و مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۲]. این مدل در محیط نرم‌افزار اکسل ویندوز اجرا می‌شود و می‌تواند رودخانه را به صورت مجموعه‌ای از آبراهه‌ها شبیه‌سازی نماید. مدل QUAL2Kw، رودخانه را به بازه‌های مختلفی تقسیم‌بندی می‌کند که هر یک از این بازه‌ها دارای شرایط هیدرولیکی یکسانی می‌باشد (مانند شیب طولی، عرض کف، شیب دیواره، دبی، سرعت) به‌طوری‌که بازه‌ها از بالادست به پایین دست شماره‌گذاری می‌شود و در آن، منابع آلودگی نقطه‌ای یا غیر نقطه‌ای می‌تواند در هر قسمت از رودخانه وارد و یا خارج شوند. این مدل برای هر یک از شاخه‌های فرعی همانند شاخه اصلی می‌تواند شبیه‌سازی انجام داده و برای هر یک نتایج جداگانه‌ای را به تفکیک هر بازه ارائه دهد [۲۱ و ۱۰].

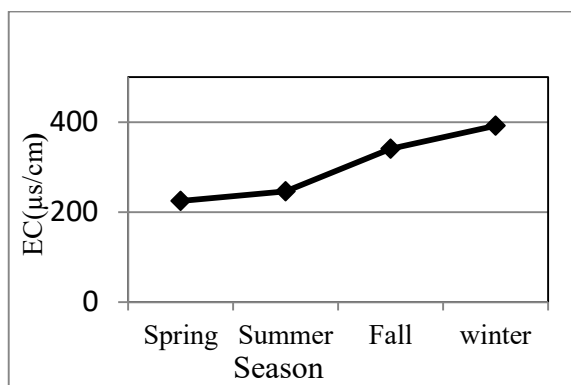


شکل ۴- تغییرات فصلی DO در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 4. DO seasonal variations in Babolrood River



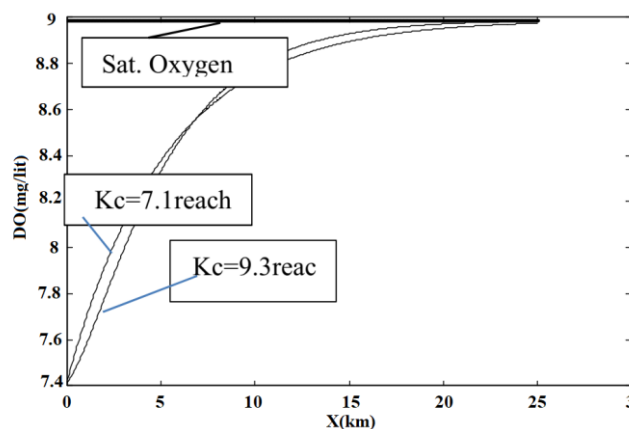
شکل ۵- تغییرات فصلی BOD در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 5. BOD seasonal variations in Babolrood River

میزان میانگین تغییرات EC در این رودخانه بین ۲۲۵ تا ۳۹۲ میکرو موس برسانی متر بوده است، که به طور متوسط بیشترین آن ۳۹۲ میکروموس بر سانتی متر مربوط به فصل زمستان می باشد. شکل (۶) تغییرات این پارامتر را در فصول مختلف نشان می دهد. میزان تغییرات pH در رودخانه بسیار کم بوده و میانگین این پارامتر در فصول مختلف بین ۷/۰۹ تا ۷/۸۲ می باشد. که بیشترین آن ۷/۸۲ و مربوط به فصل بهار می شود. نمودار مربوط به این پارامتر در شکل (۷) نشان داده شده است.



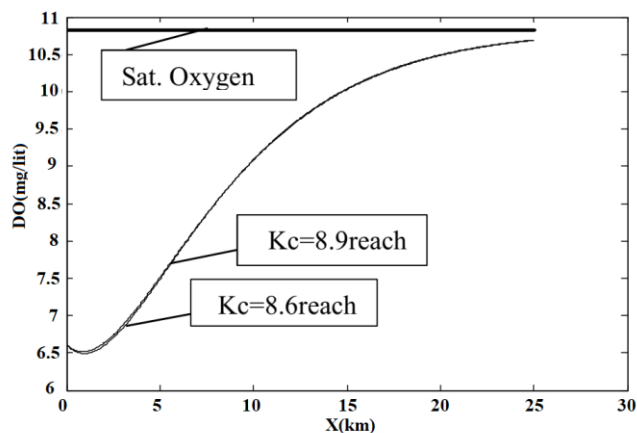
شکل ۶- تغییرات فصلی EC در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 6. EC seasonal variations in the Babolrood River

تغییرات اکسیژن محلول به همراه ضرایب زوال در هر بازه مطالعه شده و در شکل های (۲) و (۳) ارائه شده است. میزان میانگین تغییرات اکسیژن محلول در رودخانه بابلرود بجز فصل تابستان در بقیه فصول بین ۶/۵۵ تا ۷/۶۵ میلی گرم در لیتر اندازه گیری شد، در تابستان نیز بدلیل افزایش درجه حرارت متوسط آن به ۵/۹۳ میلی گرم در لیتر می رسد. نمودار مربوط به تغییرات فصلی اکسیژن محلول در شکل (۴) نشان داده شده است. میزان تغییرات فصلی BOD رودخانه بابلرود کم بوده و بیشترین مقدار آن در تابستان ۳/۱۷ میلی گرم در لیتر بوده است در بقیه فصول میزان این پارامتر بین ۲/۱۷ تا ۲/۹۳ می باشد. نمودار مربوط به این پارامتر اندازه گیری شده، در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییرات اکسیژن محلول رودخانه بابلرود و ضریب زوال در بازه ها، (پاییز ۹۷)

Fig 2. DO variations and the pollution decay coefficient in the Babolrood River, Nov. 2018



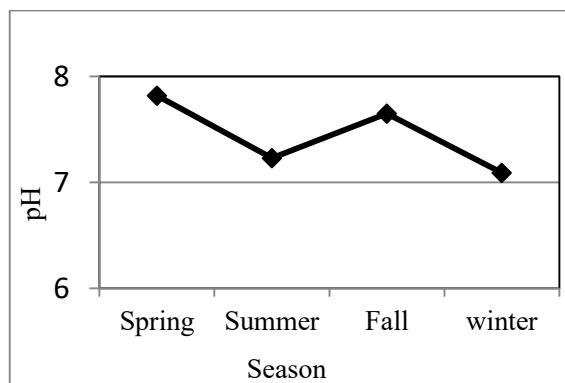
شکل ۳- تغییرات اکسیژن محلول رودخانه بابلرود و ضریب زوال در بازه ها، (زمستان ۹۷)

Fig 3. DO variations and the pollution decay coefficient in the Babolrood River, Feb. 2019

پاییز می‌باشد. نمودار مربوط به این پارامتر در شکل (۹) نشان داده شده است. دلیل افزایش نیترات و فسفر می‌تواند استفاده کشاورزان از کود اذته و فسفر برای آماده سازی اراضی در زمستان و بهار جهت کشت برنج و تخلیه زه آب به داخل رودخانه باشد.

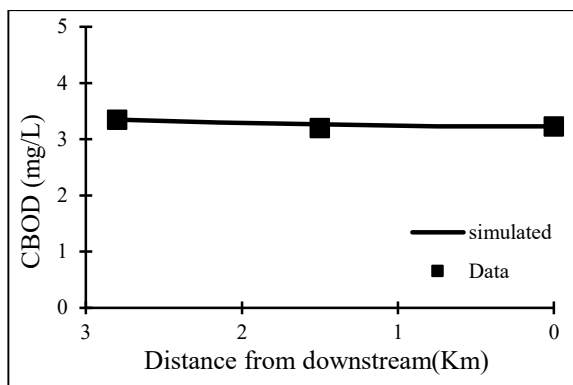
شبیه‌سازی، واسنجی، صحت‌سنجی و تحلیل حساسیت پارامترهای کیفی رودخانه با کاربرد مدل QUAL2Kw

پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده در رودخانه بابلرود را با استفاده از مدل QUAL2Kw شبیه‌سازی نموده و برای واسنجی مدل نیز از روش کالیبراسیون خودکار و دستی که با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل بوده استفاده گردیده است. با معلوم بودن عوامل و متغیرهای بیرونی مدل مانند دبی جریان، زمان حرکت، شرایط مرزی و شرایط زیست محیطی، تخمین اولیه‌ای از نرخ‌های مناسب در مدل بدست می‌آید. در صورتی که گستره این مقادیر مشخص باشد بهترین مقادیر را برای هر یک تخمین زده و مدل با آن اجرا می‌گردد و خروجی‌های مدل با داده‌ها مقایسه می‌شود. جهت دست یابی به تطابق کافی و منطقی خروجی‌های مدل و داده‌ها لازم است آزمون و خطاهای پی در پی انجام گیرد. پس از ورود داده‌های نمونه‌های انجام شده و همچنین ورود اطلاعات مشخصات هیدرولیکی، و واسنجی مدل نتایج حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای DO، BOD، EC و pH در شکل‌های (۱۰) الی (۱۷) نشان داده شده است.

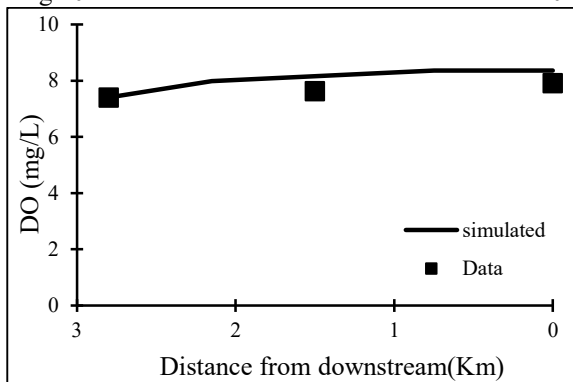


شکل ۷- تغییرات فصلی pH در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 7. pH seasonal variations in the Babolrood River

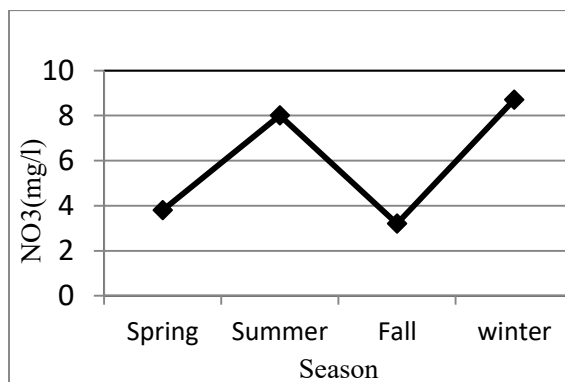
میزان نیترات در رودخانه بابلرود قابل ملاحظه می‌باشد بیشترین میانگین نیترات در رودخانه بابلرود مربوط به فصل تابستان و زمستان به ترتیب ۸ و ۸/۷ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. کمترین مقدار نیترات در فصل پاییز ۳/۲ میلی‌گرم در لیتر بوده است. نمودار مربوط به این پارامتر در شکل (۸) نشان داده شده است. میزان میانگین فسفر در رودخانه بابلرود در تمامی فصول کمتر از ۱ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. بیشترین مقدار فسفر در رودخانه بابلرود ۰/۸۹۵ میلی‌گرم در لیتر مربوط به فصل بهار و کمترین مقدار ۰/۰۹۵ مربوط به فصل



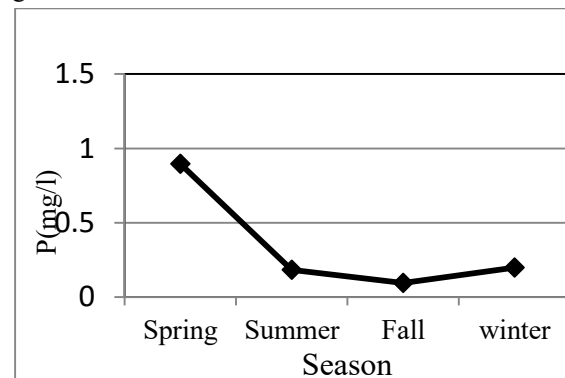
شکل ۱۰- شبیه سازی CBOD رودخانه بابلرود-آزمایش پاییز ۹۷  
Fig 10. Simulated CBOD Babolrood River Nov. 2018



شکل ۱۱- شبیه سازی DO رودخانه بابلرود-آزمایش پاییز ۹۷  
Fig 11. Simulated DO Babolrood River Nov. 2018

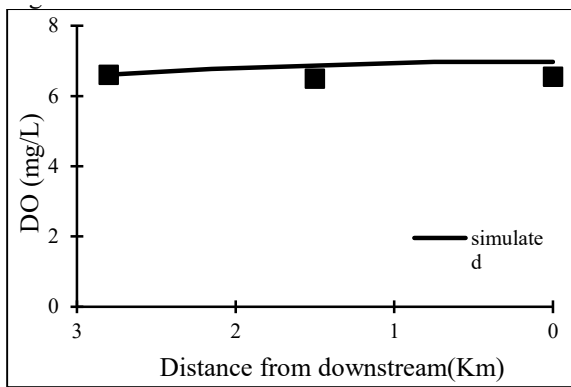


شکل ۸- تغییرات فصلی نیترات در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 8. NO3 seasonal variations in the Babolrood River

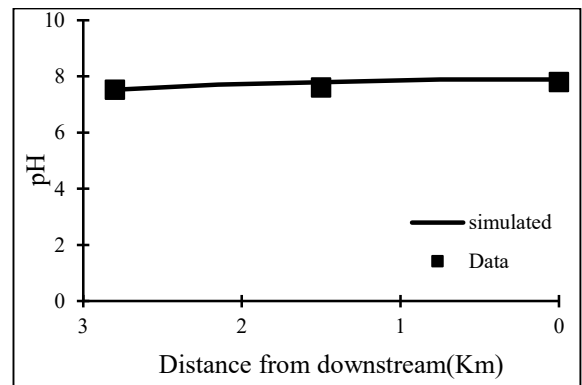


شکل ۹- تغییرات فصلی فسفر در رودخانه بابلرود (مشاهداتی)  
Fig 9. P seasonal variations in the Babolrood River

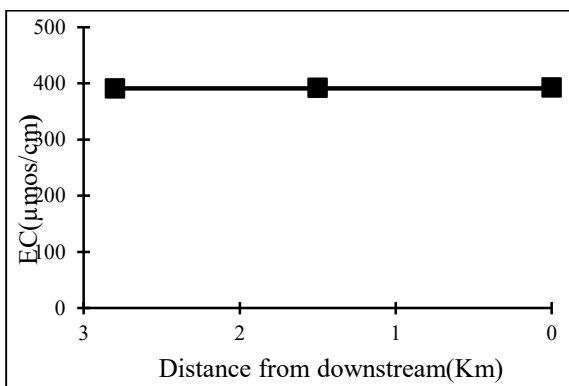




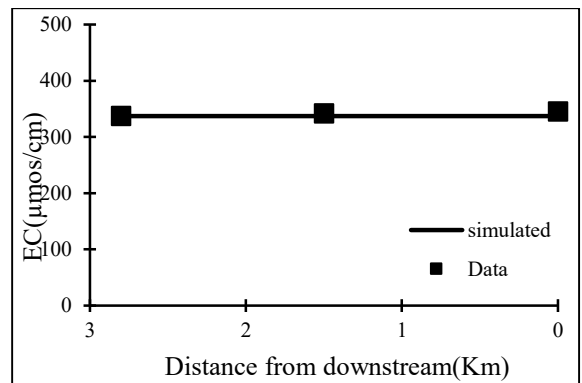
شکل ۱۵- شبیه سازی DO رودخانه بابلرود- آزمایش زمستان ۹۷  
Fig 15. Simulated DO Babolrood River Feb. 2019



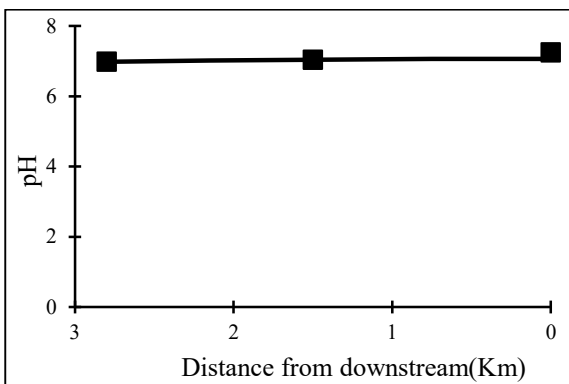
شکل ۱۲- شبیه سازی pH رودخانه بابلرود- آزمایش پاییز ۹۷  
Fig 12. Simulated pH Babolrood River Nov. 2018



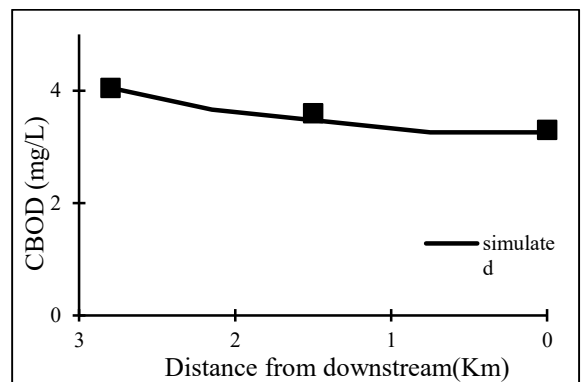
شکل ۱۶- شبیه سازی EC رودخانه بابلرود-آزمایش زمستان ۹۷  
Fig 16. Simulated EC Babolrood River Feb. 2019



شکل ۱۳- شبیه سازی EC رودخانه بابلرود-آزمایش پاییز ۹۷  
Fig 13. Simulated EC Babolrood River Nov. 2018



شکل ۱۷- شبیه سازی pH رودخانه بابلرود- آزمایش زمستان ۹۷  
Fig 17. Simulated pH Babolrood River Feb. 2019



شکل ۱۴- شبیه سازی CBOD رودخانه بابلرود-آزمایش زمستان ۹۷  
Fig 14. Simulated CBOD Babolrood River Feb. 2019

تعیین و نتایج حاصله در جداول (۳) و (۴) نشان داده شده است [۱۵].

با توجه به توضیحات فوق جهت ارزیابی دقت خروجی های مدل، میزان خطاهای داده های مشاهداتی [۱۵] و مدل برای پارامترهای DO, BOD, EC, pH و درجه حرارت بر اساس رابطه (۱) الی (۴)

جدول ۳- ارزیابی خروجی مدل، رودخانه بابلرود در آزمایش پاییز ۹۷

Table 3. Evaluation of the model predictions, Babolrood River, Nov. 2018

R <sup>2</sup>	CVRMSE%	MBE	RMSE	Parameter
83.90	5.255	0.33	0.402	DO(mg/l)
82.40	1.063	0.02	0.035	BOD(mg/l)
98.00	1.596	-4.33	5.447	EC(μmos/cm)
76.00	1.587	0.09	0.121	pH
4.90	2.557	0.20	0.503	T(°C)

جدول ۴- ارزیابی خروجی مدل، رودخانه بابلرود در آزمایش زمستان ۹۷

Table 4. Evaluation of the model predictions, Babolrood River, Feb. 2019

R <sup>2</sup>	CVRMSE%	MBE	RMSE	Parameter
54.2	4.931	0.263	0.023	DO(mg/l)
97.4	2.303	-0.060	0.084	BOD(mg/l)
99.9	0.329	-1.000	1.291	EC(μmos/cm)
66.2	1.468	-0.057	0.104	pH
95.1	5.393	-0.513	0.629	T(°C)

جدول ۵. مقادیر ضریب زوال رودخانه بابلرود با استفاده از مدل استریتر فلپس و QUAL2Kw (یک در روز)

Table 5. Pollutant Decay coefficient of Babolrood River using QUAL2Kw model, Streeter Phelps

Winter	Fall	Summer	Spring	Test 2018
4.0	0.5	5.5	2.9	Babolrood(QUAL2Kw)
8.8	8.2	8.3	1.2	Babolrood(QUAL2Kw)

رسید. قابل ذکر است که رودخانه بابلرود بدلیل بستر سنگلاخی و وجود جهش‌های آبی بازه‌ادهی رودخانه افزایش یافته که این عامل باعث افزایش توان خودپالایی این رودخانه شده است. در فصل تابستان به دلیل افزایش درجه حرارت و در حضور مقدار بیشتر BOD بالاترین ضرایب زوال بدست آمد. به طوری که در روش QUAL2Kw مقدار ۵/۵ در روز، و در بهار و پاییز کمترین مقدار ۲/۹ و ۰/۵ در روز محاسبه شد. در فصل زمستان مقدار ضریب زوال برابر ۴ در روز تعیین شد. مقادیر ضرایب زوال بدست آمده از روش استریتر فلپس مطابق با [۱۷] برابر ۱/۲، ۸/۳، ۸/۲ و ۸/۸ در روز بدست آمد که در مقایسه با روش QUAL2Kw برابر ۲/۹، ۵/۵، ۰/۵ و ۴ در روز متفاوت می‌باشد که با نتایج، کاکس [۵] و سنی وان [۲۰] مطابقت دارد. اکسیژن محلول نیز در فصول پاییز و زمستان ارقام نزدیک به هم هستند ولی در تابستان افت کاهش اکسیژن محلول بیشتر از دو فصل پاییز و زمستان می‌باشد. پارمر، [۱۷]. که یکی از دلایل آن می‌تواند افزایش درجه حرارت باشد. مقادیر ضریب زوال برای هر رودخانه با توجه به پارامترهای DO، BOD، ضریب بازه‌ادهی و هم‌چنین مشخصات هیدرولیکی رودخانه شامل سرعت و عمق متفاوت می‌باشد. معادله استریتر فلپس در یک سیستم یک بعدی و بصورت یک معادله دیفرانسیل خطی با فرض جریان دائمی می‌باشد، که تغییر در کمبود اکسیژن محلول را برابر اختلاف در دو

با توجه به شبیه‌سازی پارامترهای کیفی اندازه‌گیری شده از مدل QUAL2Kw، و واسنجی مشخص شد، ضریب زوال رودخانه حساسیت بیشتری به ضریب بازه‌ادهی، مشخصات هیدرولیکی، اکسیژن محلول و BOD دارد، مقدار نهایی ضریب زوال بدست آمده از مدل QUAL2Kw در هر آزمایش بشرح جدول (۵) ارائه شده است. در رودخانه بابلرود مقدار RMSE بین مقادیر شبیه‌سازی و بر مبنای داده‌های مشاهداتی بین ۰/۲۳ تا ۸/۱۶۵ و CVRMSE هم بین ۰/۲۲۹ تا ۵/۳۹۳ درصد متغیر می‌باشد، که بیانگر دقت ارزیابی در مدل است.

### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که مقادیر اکسیژن محلول رودخانه بابلرود در بازه‌های مطالعه شده و در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان نسبتاً بالا بوده و میانگین آن در سه فصل مذکور بین ۶/۵۵ تا ۷/۶۵ میلی گرم در لیتر تغییر می‌کند. در فصل تابستان با توجه به افزایش درجه حرارت، میزان اکسیژن محلول افت کرده و به ۵/۹۳ میلی گرم در لیتر کاهش یافته است. مقدار میانگین BOD در بازه‌های مورد آزمایش نیز دارای تغییرات زیادی نبوده است. بطوری که در فصل تابستان مقدار میانگین این پارامتر برابر ۳/۱۷ میلی گرم در لیتر و در سایر فصول نیز تغییرات آن بین ۲/۱۷ تا ۲/۹۳ میلی گرم در لیتر به ثبت



and Supervision. (In Persian)

11. Mehrasbi, M. R., & Kia, Z. F. 2015. Water Quality Modeling and Evaluation of Nutrient Control Strategies Using QUAL2K in the Small Rivers. *J. Hum. Environ. Health Promot*, 1(1), 1-11.

12. Menezes, J. P. C. D., Bittencourt, R. P., Farias, M. D. S., Bello, I. P., Oliveira, L. F. C. D., & Fia, R. 2015. Deoxygenation rate, reaeration and potential for self-purification of a small tropical urban stream. *Revista Ambiente & Água*, 10(4), 748-757.

13. Mohammadi Ghaleni M., Ebrahimi K. Omid M. 2015. Assessment Rate of the coefficient of reaeration in the Sefidroud Rivers, Iranian Watershed Management Science and Engineering, Ninth Year, No. 31, winter 2015, Page 98-89. (In Persian)

14. Mohammadi Ghaleni M., Ebrahimi K. Omid M. 2015. Estimation of reaeration rate coefficient on Dinachal river using empirical equations and numerical methods, in water quality management, Water and Irrigation Management, University of Tehran, Volume 5, Number 1, Spring and Summer 2015, Page 69-79. (In Persian)

15. Moog, D.B. and Jirka, G.H., 1998. Analysis of reaeration equations using mean multiplicative error. *Journal of Environmental Engineering*, 124(2), pp.104-110.

16. Ning, S. K., Chang, N. B., Yang, L., Chen, H. W., & Hsu, H. Y. 2001. Assessing pollution prevention program by QUAL2E simulation analysis for the Kao-Ping River Basin, Taiwan. *Journal of Environmental Management*, 61(1), 61-76.

17. Parmar, D. L., & Keshari, A. K. 2012. Sensitivity analysis of water quality for Delhi stretch of the River Yamuna, India. *Environmental monitoring and assessment*, 184(3), 1487-1508.

18. Sadeghi-Talarposhti, R., Ebrahimi K., Hourfar A. H., and Hoseini-Ghafari S. H. 2019. "Determination of rate of pollution decay coefficient in Talar river, IRAN", The 11th World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019), Madrid, Spain, 25-29 June 2019.

19. Sadeghi-Talarposhti R., Ebrahimi K., Hoorfar A. H., "Determination of Decay Rate of Pollution in Talar and Babolrood Rivers" *Journal of Irrigation and Water Engineering*, Iran. (In Persian and in Press).

20. Setiawan, A. D., Widyastuti, M., & Hadi, M. P. 2018.

نرخ از اکسیژن زدایی و بازهوادی در نظر گرفته و از مزایای اصلی آن مشخص کردن نقاط بحرانی کمبود اکسیژن محلول می‌باشد، در صورتی که مدل QUAL2Kw بر اساس رابطه عمومی موازنه جرم محاسبات را انجام می‌دهد و پارامترهای بیش‌تری را در محاسبات در نظر می‌گیرد، لذا پیشنهاد می‌شود از ارقام این روش در محاسبات استفاده شود.

## تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی دانشگاه تهران جهت انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

## منابع

1. Almeida, J. S. M., Junior, M. R. F. 2013. Dissolved oxygen measurements on Uberabinha River for determining the oxygenation constant. *Águas Subterrâneas*.

2. Ashgh, M. 2016. River water quality simulation.

3. Babbar, R. 2014. Pollution risk assessment based on QUAL2E-UNCAS simulations of a tropical river in Northern India. *Environmental monitoring and assessment*, 186(10), 6771-6787.

4. Chiejine, C. M., Igboanugo, A. C., & Ezemonye, L. I. N. 2015. Modelling Effluent Assimilative Capacity of Ikpoba River, Benin City, Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 34(1), 133-141.

5. Cox B.A., 2003, A review of dissolved oxygen modeling techniques for lowland rivers, *The Science of the Total Environment*, Science Direct, ELSEVIER, 303-334.

6. Ferial Díaz, J. J., Náder Salgado, D., Meza Pérez, S. J. 2017. Deoxygenation and re-aeration rates of the Sinu river. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 8-17.

7. Hengl, T., Heuvelink, G. B. & Stein, A. 2004. A generic framework for spatial prediction of soil variables based on regression-kriging. *Geoderma*, 120(1), 75-93.

8. Hoseini, Y., & Hoseini, P. 2018. Study the assimilation capacity of Gharehsou River using Qual2kw model. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 22(3), 324-328.

9. Hydrosience Inc, 1971. Simplified Mathematical Modeling of Water Quality Prepared for the Mitre Corporation and the USEPA, Water Programs, Washington D C, Mar 1971, 127 pp, 4 Appendixes. 5 Monographs.

10. Standard No. 481 of 2009 Rivers Self-Purpose Capacity Studies Guide, Vice President of Strategic Planning

24. Wright R.M. & McDonnell A.J. 1979, In stream deoxygenation rated prediction, Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 105, 323 – 335.

25. Zare, M. Azizian, S. and Vakilifard N. 2012. Study on Variations of Different Elements Concentration in Rivers and Their Effective Factors. National Conference on Water Flow and Pollution University of Tehran, 23 ~ 24 May 2012. (In Persian)

26. Zhang, Y., Yang, H., Wang, Z. 2016. Simulating water quality of Wei River with QUAL2K model, a case study of Hai River Basin in China. In MATEC Web of Conferences (Vol. 68, p. 14005). EDP Sciences

Water Quality Modeling for Pollutant Carrying Capacity Assessment Using Qual2Kw in Bedog River. The Indonesian Journal of Geography, 50(1), 49-56.

21. Sharifnejad A. Tabe Birdbar A., and Beytolahpour, I. 2012. Qualitative Monitoring of the River and effect of its Pollution Control (Case Study: Koshksaray River, Marand/Tabriz/IRAN River. First National Conference on Flow and Pollution, Tehran University, Spring, 2012. (In Persian)

22. Streeter, H.W. and Phelps, E.B. 1925. A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River. U.S. Public Health Service, Bulletin No.146,96 pp.

23. USEPA. 1997. Technical Guidance Manual for Developing Total Maximum Daily Loads, Book 2: Streams and Rivers.

## Assessment of Seasonal Variations of Pollutant Decay Coefficient of Babolrood River

R. Sadeghi Talarposhti<sup>1</sup>, K. Ebrahimi<sup>2</sup> and A. H. Hoorfar<sup>3</sup>

Received: 23-11-2019

Accepted: 24-12-2019

### Abstract

Simulation of self-purification and investigation the pollutant decay coefficient of rivers is one of the most important requirements of surface water resources pollution monitoring and treatment. In this paper, self-purification capacity and the pollutant decay coefficient values of Babolrood River, IRAN, was investigated based on field measurements of qualitative parameters including; DO, BOD, pH, EC, nitrate, phosphate and temperature in four seasons, 2018. To achieve this aim, QUAL2Kw software used. In this paper not only the modelling results and analyzes are presented but the measured data of the studied river are also presented, which can be used in the future researches. Based on the results, the average amount of dissolved oxygen of Babolrood River in all seasons except summer are varied between 6.55 and 7.65 mg/l, while the average of that is equal to 5.93 mg/l in summer. Also, the average value of BOD in summer, due to increase in temperature, is recorded equal to 3.17 mg/l and in other seasons were recorded between 2.17 to 2.93 mg/l. The decay coefficient of the Babolrood River was estimated equal to 5.5(1/day) in summer and in other seasons it varied between 0.5 and 4(1/day), involving QUAL2Kkw simulations. According to the dissolved oxygen diagram and involving the Streeter-Phelps method, no reduction in dissolved oxygen during spring and fall, in this river, was recorded. However, in winter and summer the dissolved oxygen was reduced to 6.5 and 5.7 mg/l, respectively.

**Keywords:** *Deoxygenation rate, Atmospheric reaeration, Decay coefficient, Water quality, Self-purification, Environment.*

1. Graduated Ph.D Student, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran.

2. Corresponding Author and Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran.

Email: EbrahimiK@ut.ac.ir

3. Professor, Department of Irrigation & Reclamation Engineering, University of Tehran.