

آنالیز حساسیت مدل Qual2kw در مدل‌سازی پارامترهای کیفی سفیدرود

مهدی محمدی قلعه‌نی^{۱*} و کیومرث ابراهیمی^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۴/۱۹

چکیده

رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین منابع آب در دسترس می‌باشند که با توجه به ورود انواع آلاینده‌ها، نگرانی‌های زیادی در مورد حفاظت کیفی آنها وجود دارد. مدل‌سازی و ارزیابی عوامل مؤثر از اولین گام‌های مدیریت کیفی آب رودخانه‌ها می‌باشد. هدف مقاله حاضر ارزیابی میزان تغییرات اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود در اثر تغییر پارامترهای مؤثر بر آن می‌باشد. برای دستیابی به هدف مذکور، پس از واسنجی و صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب سفیدرود با استفاده از مدل Qual2kw، آنالیز حساسیت این مدل با استفاده از نرم‌افزار YASAIw انجام شد. داده‌های مورد استفاده شامل داده‌های هیدرولیکی، عمق، سرعت، دبی و همچنین کیفیت و آلاینده‌های ورودی به رودخانه در بازه‌ای ۱۱۰ کیلومتری پایین‌دست سد سفیدرود تا دریا طی آذر ۱۳۸۶، تیر، مهر و آبان ۱۳۸۷، بهمن ۱۳۸۹، فروردین، خرداد و مرداد ۱۳۹۰ در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که 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 می‌باشد. همچنین نتایج آنالیز حساسیت مدل نشان داد که اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به ضریب هوادهی، عمق جریان و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی دارد.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حساسیت، صحت‌سنجی، ضریب هوادهی، واسنجی، Qual2Kw

مقدمه

برتر برای بیان پدیده‌های بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی استفاده شود. در سال ۲۰۰۸ پس از تشخیص محدودیت‌های مدل‌های Qual2E و Qual2EU، مدل Qual2Kw توسعه داده شد. از مزیت‌های این نسخه از مدل، واسنجی خودکار آن به کمک الگوریتم ژنتیک می‌باشد. این الگوریتم ضرایب و نرخ‌های سینتیک و بیولوژیک را بر اساس حداقل خطای بین مقادیر شبیه‌سازی و مشاهده‌ای بهینه می‌کند (Pelletier and Chapra., 2008). در بررسی پیشینه تحقیقات مرتبط با مدل‌های سری Qual2Kw می‌توان به موارد زیر اشاره کرد.

بوستانی و گوهرگانی (۱۳۹۳) کیفیت آب رود بشار در محدوده‌ی شهر یاسوج را با استفاده از مدل QUAL2K شبیه‌سازی کردند. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده اکسیژن محلول حاکی از میزان بالای آن و مناسب بودن ظرفیت خودپالایی رودخانه بوده است. عاشق‌معلا و همکاران (۱۳۹۳) نقش توان خودپالایی رودخانه‌ها را در تعیین حدود مجاز پارامترهای کیفی پساب‌ها با استفاده از مدل QUAL2Kw بررسی کردند. ایشان با اعمال دو سناریو شامل کاهش اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی به ترتیب برابر ۲ و ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر و بررسی توان خودپالایی رودخانه و منابع آلاینده با حفظ اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی به ترتیب حداقل برابر ۵ و ۵۰ میلی‌گرم بر لیتر، آلاینده‌های قابل تخلیه به رودخانه قشلاق

طی سالیان اخیر حفاظت از رودخانه‌ها و پاک‌سازی آنها مورد توجه سازمان‌های ملی و بین‌المللی مسئول کنترل کیفیت و حفاظت منابع آب قرار گرفته است. این موضوع در مناطقی که شهرها و صنایع بزرگ در حاشیه رودخانه‌ها قرار دارند و رودخانه‌ها تامین‌کننده اصلی نیازهای آبی می‌باشند، به منظور حفظ سلامت عمومی اهمیت بیشتری دارد (Tayfur and Singh., 2005). به همین دلیل توانایی تخمین و شبیه‌سازی جریان، انتقال آلودگی و رسوب در رودخانه‌ها اهمیت زیادی دارد. روند رو به رشد آلودگی آبهای سطحی در سراسر جهان استفاده از فرآیندهای اختلاط و رقیق‌سازی را الزامی نموده است. هم‌اکنون استفاده از فرآیند پخشیدگی و تقویت خودپالایی رودخانه‌ها یکی از مهم‌ترین روش‌های مدیریت زیست محیطی رودخانه‌ها محسوب می‌شود (پورآبادی، ۱۳۸۶).

برای ارتقاء روش‌های مدل‌سازی کیفیت آب، سعی شده است که از مدل‌ها و روش‌های عددی بهتر و همچنین شبیه‌سازی با روش‌های

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه اراک

۲- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(* - نویسنده مسئول: Email: M-MohammadiGhalenei@Araku.ac.ir)

یامونا در هند را با استفاده از مدل Qual2kw برای ۱۰ سال آمار (سالهای ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۹) مدل سازی کردند. آنها از داده های ۴۵ ماه (اکتبر ۱۹۹۹ تا ژوئن ۲۰۰۴) برای واسنجی و از داده های ۴۵ ماه دیگر (اکتبر ۲۰۰۵ تا ژوئن ۲۰۰۹) برای اعتبارسنجی مدل استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که ضریب همبستگی برای اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی و نیتروژن کل به ترتیب دارای حدود $0.75 - 0.53$ و $0.83 - 0.68$ می باشد (Sharma et al., 2017).

مؤلفین مقاله حاضر طی تحقیق گسترده ای، اثرات ضرایب پخش طولی، زوال و هوادهی بر غلظت اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود را با استفاده از مدل Qual2Kw 6 و آنالیز حساسیت آن نسبت به ضرایب مذکور را بررسی کردند. به این منظور از نسخه مدل QUAL2Kw 6 برای مدل سازی کیفیت آب رودخانه سفیدرود استفاده شد. مرحله واسنجی خودکار مدل با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام و در ادامه صحت سنجی مدل بررسی شد. یکی از نوآوری های مهم در این مقاله، استفاده از مدل QUAL2Kw 6 در آنالیز حساسیت ضرایب پخش طولی، هوادهی و زوال و استفاده از شبیه سازی مونت کارلو با استفاده از نرم افزار YASAIw می باشد. همچنین حساسیت تغییرات غلظت اکسیژن محلول نسبت به دبی، سرعت جریان، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی و ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی ارزیابی و گزارش شده است.

مواد و روش ها

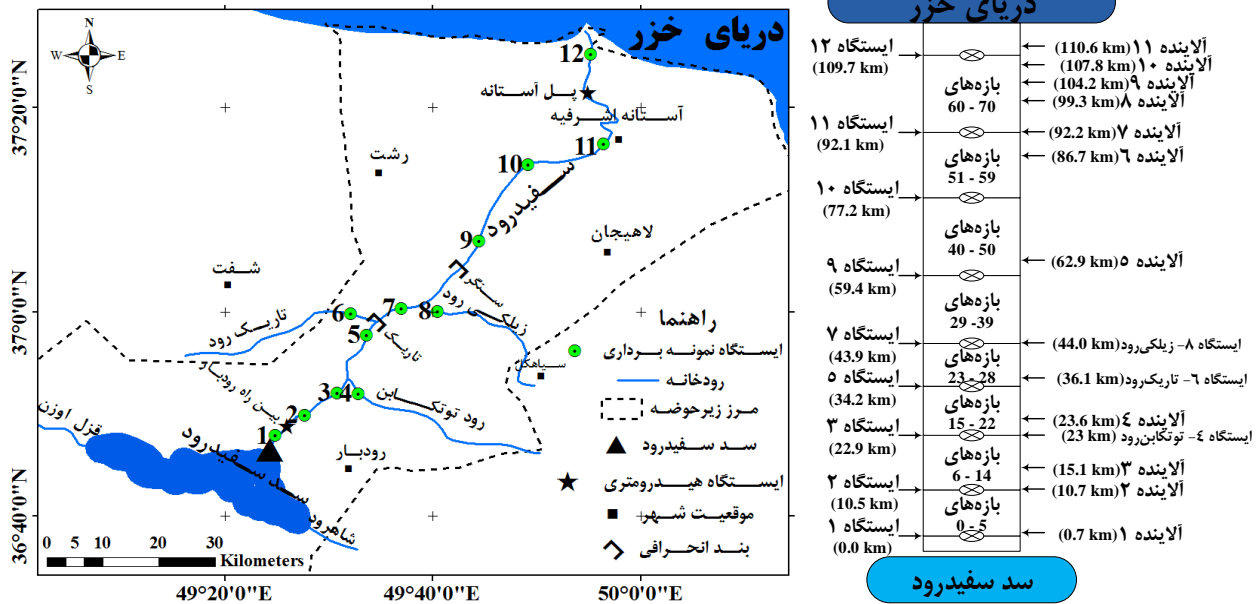
منطقه مورد مطالعه

بازهی مورد مطالعه در این مقاله طول ۱۱۰ کیلومتری از رودخانه سفیدرود می باشد که از پایین دست سد سفیدرود شروع و تا دریای خزر ادامه دارد. ایستگاه های نمونه برداری در این طول رودخانه شامل ۹ ایستگاه سفیدرود و ۳ ایستگاه بر روی شاخه های فرعی ورودی به سفیدرود شامل، زیلکی رود، تاریک رود و رود توتکابن می باشد. شکل ۱ موقعیت سد سفیدرود، ایستگاه های هیدرومتری و نمونه برداری و موقعیت نقاط ورودی آلاینده ها و همچنین بازه بندی رودخانه را نشان می دهد.

بازه بندی رودخانه سفیدرود بر اساس ایستگاه های نمونه برداری و نقاط ورود آلاینده ها به این رودخانه انجام شده است. طول برابر ۱۱۰ کیلومتری مورد بررسی در رودخانه سفیدرود به ۷۰ بازه مطابق مشخصات ارائه شده در جدول ۱ تقسیم شده است.

کردستان را بررسی کردند. نتایج مقایسه اقتصادی این دو سناریو حاکی از برتری سناریوی دوم با اختلاف هزینه اقتصادی ده میلیارد ریالی بود. خدام محمدی و بوستانی (۱۳۹۵) توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول را در کیفیت آب رودخانه کر با استفاده از نرم افزار Qual2k در بازه پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک- بختگان مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بیشترین کمترین اکسیژن محلول شبیه سازی شده در ماه اسفند به ترتیب برابر $5/59$ و $8/25$ میلی گرم در لیتر در پل خان و پل شهیدغنی زاده بوده است. خوب و همکاران (۱۳۹۶) به تعیین سهم رودخانه های ورودی بر افزایش شوری رودخانه قزل اوزن در محدوده استان زنجان با استفاده از مدل Qual2k پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که شاخه گورانی با $28/6$ درصد و سرشاخه چسب با $0/3$ درصد به ترتیب بیشترین و کمترین سهم بار آلودگی را در میان سرشاخه های فرعی رودخانه قزل اوزن دارا می باشند. حسینی و حسینی (۱۳۹۶) به بررسی تغییرات توان خودپالایی بازه ای ۴۲ کیلومتری از رودخانه کارون طی سال های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ با استفاده از مدل Qual2kw پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بهترین شبیه سازی مدل به ترتیب برای پارامترهای pH، BOD و EC بوده است. مقیمی نژاد و همکاران (۱۳۹۶) به ارزیابی تغییرات فصلی توان خودپالایی در بازه ای ۱۱۳ کیلومتری رودخانه کارون با استفاده از مدل Qual2kw پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که کاهش ۳۰ درصدی جریان ورودی آلاینده ها به رودخانه کارون شامل پاتوژن ها باعث بهبود کیفیت آب این رودخانه می شود. نوروزی و همکاران (۱۳۹۷) با شبیه سازی بازه ای از رودخانه دز با استفاده از مدل Qual2k، به بهینه سازی جریان زیست محیطی خروجی از سد دز پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که جریان رهاسازی بهینه از سد تحت سه سناریوی وزن های نسبی برای اهداف مهم کمی و کیفی به ترتیب برابر ۶۶، ۵۷ و ۷۴ مترمکعب در ثانیه و متوسط غلظت برای این سناریوها به ترتیب برابر $2/9$ ، $3/2$ و $2/7$ میلی گرم در لیتر می باشد.

سانتوز و همکاران (۲۰۱۳) از مدل Qual2Kw برای پیش بینی اثرات شرایط جریان، دبی و شاخه های ورودی روی کیفیت آب رودخانه مینهو در اسپانیا استفاده کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که از مدل Qual2Kw می توان برای مدیریت و برنامه ریزی در حوضه رودخانه مینهو استفاده کرد (Santos et al., 2013). ویرا و همکاران (۲۰۱۳) کیفیت آب رودخانه لیس را در پرتغال با استفاده از مدل Qual2Kw مدل سازی کردند. نتایج مدل سازی ایشان طی سناریوهای مختلف حاکی از تأثیر شاخه های ورودی روی کیفیت آب رودخانه بود. به طوری که با حذف شاخه های ورودی مقادیر اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، آمونیم و کلیفرم ۴۵، ۱۳ و ۴۴ درصد در زمستان و ۲۳، ۳۳ و ۳۶ درصد در تابستان افزایش یافت (Vieira et al., 2013). شارما و همکاران (۲۰۱۷) بازه ای شهری از رودخانه



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌ها و مشخصات بازه‌بندی رودخانه سفیدرود

جدول ۱- مشخصات بازه‌های در نظر گرفته شده در رودخانه سفیدرود

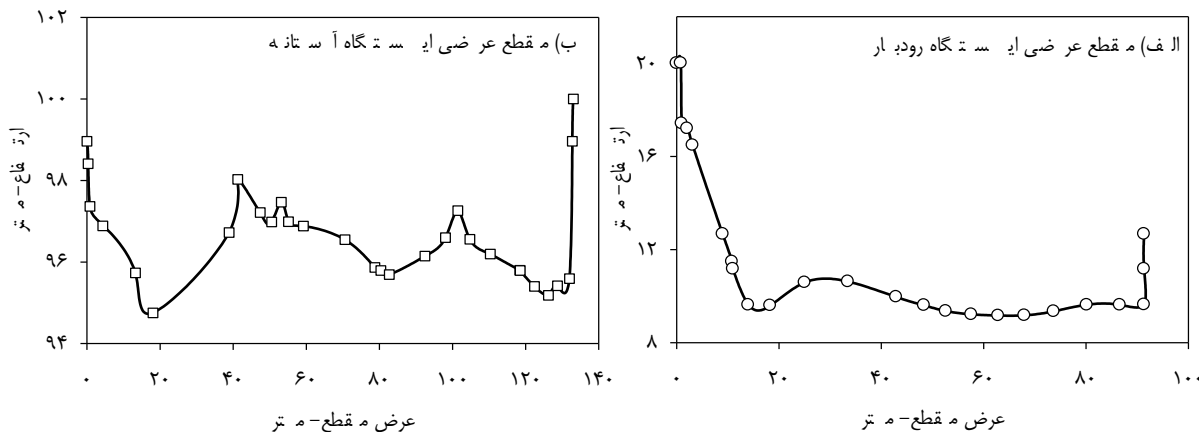
| شماره ایستگاه | رودخانه | فاصله از پایین دست (کیلومتر) | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | ارتفاع (متر) | شماره بازه‌ها | طول متوسط بازه (کیلومتر) |
|---------------|-----------|------------------------------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------------------|
| ۱ | سفیدرود | ۱۰۹/۶۷ | ۳۶,۷۷ | ۴۹,۳۹ | ۲۰۵ | ۰ | - |
| ۲ | سفیدرود | ۹۹,۱۸ | ۳۶,۸۳ | ۴۹,۴۴ | ۱۸۰ | ۵-۰ | ۱,۷۵ |
| ۳ | سفیدرود | ۸۶,۷۳ | ۳۶,۸۹ | ۴۹,۵۱ | ۱۴۶ | ۱۴-۶ | ۱,۳۸ |
| ۴ | توتکابن | ۸۶,۷۱ | ۳۶,۸۹ | ۴۹,۵۲ | ۱۵۲ | - | - |
| ۵ | سفیدرود | ۷۵,۵۱ | ۳۶,۹۸ | ۴۹,۵۵ | ۱۱۸ | ۲۲-۱۵ | ۱,۴۰ |
| ۶ | تاریک رود | ۷۳,۶۱ | ۳۶,۹۹ | ۴۹,۵۶ | ۱۱۰ | - | - |
| ۷ | سفیدرود | ۶۵,۷۴ | ۳۷,۰۲ | ۴۹,۶۳ | ۹۶ | ۲۸-۲۳ | ۱,۶۳ |
| ۸ | زیلکی رود | ۶۵,۷۱ | ۳۷,۰۲ | ۴۹,۶۴ | ۹۱ | - | - |
| ۹ | سفیدرود | ۵۰,۲۴ | ۳۷,۱۲ | ۴۹,۷۴ | ۵۳ | ۳۹-۲۹ | ۱,۴۱ |
| ۱۰ | سفیدرود | ۳۲,۴۹ | ۳۷,۲۵ | ۴۹,۸۱ | ۹ | ۵۰-۴۰ | ۱,۶۱ |
| ۱۱ | سفیدرود | ۱۷,۵۹ | ۳۷,۲۸ | ۴۹,۹۳ | ۱۰- | ۵۹-۵۱ | ۱,۶۶ |
| ۱۲ | سفیدرود | ۰,۰۰ | ۳۷,۴۲ | ۴۹,۹۱ | ۲۰- | ۷۰-۶۰ | ۱,۷۶ |

سال آبی ۹۲-۱۳۹۱ ارائه شده است.

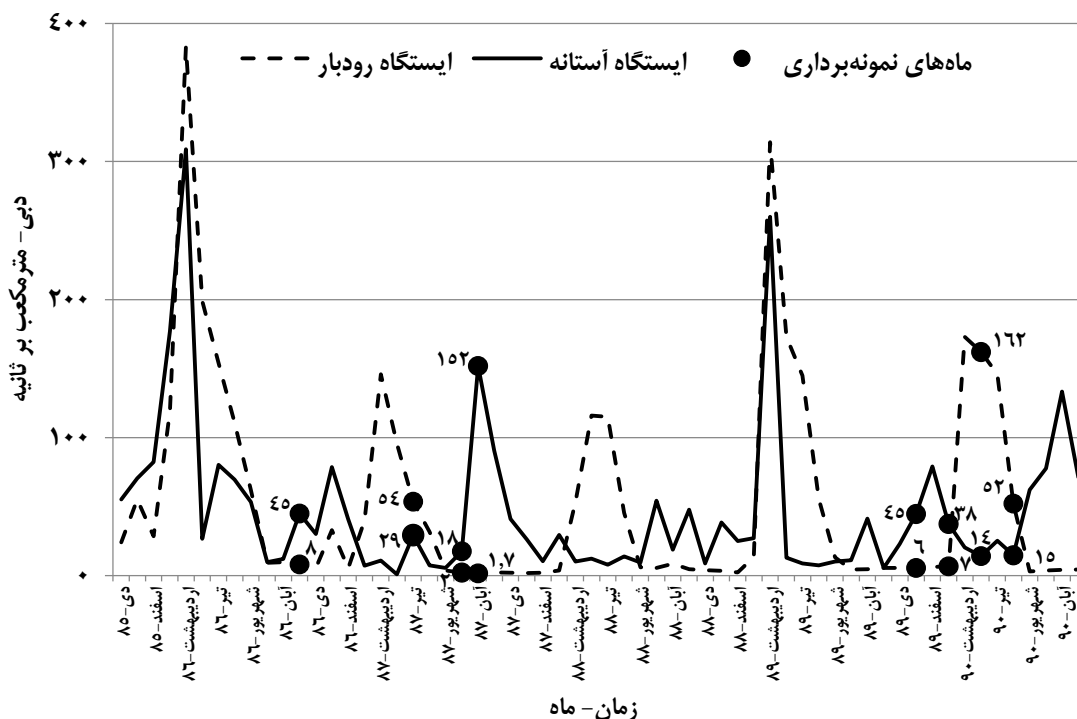
همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد رودخانه سفیدرود دارای عرضی برابر ۹۰ و ۱۳۰ متر به ترتیب در محل ایستگاه‌های رودبار و آستانه می‌باشد. مقادیر میانگین دبی ماهانه در رودخانه سفیدرود در طی ماه‌های نمونه‌برداری در دو ایستگاه هیدرومتری رودبار و آستانه در شکل ۳ ارائه شده است.

مشخصات هیدرولیکی رودخانه

توسعه مدل هیدرودینامیکی رودخانه سفیدرود به منظور برآورد سرعت، عمق و عرض جریان رودخانه با توجه به دبی رودخانه انجام شد. در این راستا داده‌های دبی روزانه در دو ایستگاه هیدرومتری منجیل و آستانه، سرعت و عمق جریان و مقاطع عرضی رودخانه در ۹ ایستگاه نمونه‌برداری برای مدل هیدرودینامیکی استفاده شد. در شکل ۲ مقاطع عرضی رودخانه سفیدرود در دو ایستگاه رودبار و آستانه در



شکل ۲- مقاطع عرضی رودخانه سفیدرود در دو ایستگاه هیدرومتری رودبار و آستانه (شرکت آب منطقه‌ای گیلان، ۹۲-۱۳۹۱)



شکل ۳- دبی ماهانه رودخانه سفیدرود در ایستگاه‌های رودبار و آستانه طی ماه‌های نمونه‌برداری

$$H = cQ^d \quad (2)$$

$$B = eQ^f \quad (3)$$

در روابط فوق Q دبی جریان بر حسب مترمکعب در ثانیه، U سرعت متوسط بر حسب متر در ثانیه، H عمق متوسط بر حسب متر، B عرض بالایی جریان بر حسب متر و a, b, c, d, e و f ضرایب تجربی هستند که بر اساس داده‌های هیدرومتری جریان رودخانه تعیین می‌شوند. با محاسبه ضرایب تجربی a, b, c, d, e و f در دو ایستگاه هیدرومتری رودبار، پل آستانه و ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری رودخانه، عمق متوسط روزانه و میانگین سرعت روزانه جریان در

همانطور که شکل ۳ نشان می‌دهد در آبان ۱۳۸۷ در ایستگاه رودبار دبی حداقل برابر ۱/۷ مترمکعب در ثانیه و در همین ماه دبی حداکثر در ایستگاه آستانه برابر ۱۵۲ مترمکعب در ثانیه ثبت شده است. همچنین در خرداد ۱۳۹۰ دبی در ایستگاه رودبار حداکثر و در ایستگاه آستانه حداقل و به ترتیب برابر ۱۶۲ و ۱۴ مترمکعب در ثانیه اندازه‌گیری و ثبت شده است. به منظور توسعه مدل هیدرودینامیکی روابط توانی مطابق معادلات (۱) تا (۳) استفاده شد (Leopold and Maddock., 1953).

$$U = aQ^b \quad (1)$$

رودخانه سفیدرود برآورد شد. جدول ۲ مقادیر بدست آمده ضرایب a, c, d, e, f را طی تحقیق حاضر و در بازه‌های مختلف رودخانه سفیدرود نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر برآورد شده ضرایب تجربی مدل هیدرولیکی در بازه‌های رودخانه سفیدرود

| شماره بازه‌ها | a | b | c | d | e | f |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ۵ - ۰ | +۰/۹۳ | +۰/۰۸ | +۰/۹۹ | +۰/۲۱ | ۱/۰۹ | +۰/۷۱ |
| ۱۴ - ۶ | -۰/۲۳ | -۰/۳۰ | -۰/۹۸ | -۰/۲۰ | ۴/۴۴ | -۰/۵۰ |
| ۲۲ - ۱۵ | -۰/۲۸ | -۰/۲۷ | -۰/۲۶ | -۰/۳۱ | ۱۳/۷۸ | -۰/۴۲ |
| ۲۸ - ۲۳ | -۰/۴۸ | -۰/۱۸ | -۰/۱۲ | -۰/۴۵ | ۱۷/۴۹ | -۰/۳۷ |
| ۳۹ - ۲۹ | -۰/۲۱ | -۰/۳۰ | ۱/۱۹ | -۰/۰۵ | ۴/۰۷ | -۰/۶۵ |
| ۵۰ - ۴۰ | -۰/۹۸ | -۰/۰۶ | -۰/۰۸ | -۰/۵۲ | ۱۲/۰۰ | -۰/۴۲ |
| ۵۹ - ۵۱ | -۰/۸۸ | -۰/۰۴ | ۲/۱۹ | -۰/۰۲ | -۰/۵۲ | -۰/۹۴ |
| ۷۰ - ۶۰ | -۰/۹۱ | -۰/۰۲ | -۰/۹۸ | -۰/۱۱ | ۱/۱۲ | -۰/۸۷ |

داده‌های کیفی

در مقاله حاضر از داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای کیفی شامل؛ دما، اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، قلیائیت، هدایت الکتریکی، نیتروژن کل و فسفر کل در هشت نوبت نمونه‌برداری شامل آذر ۱۳۸۶، تیر، مهر و آبان ۱۳۸۷، بهمن ۱۳۸۹، فروردین، خرداد و مرداد ۱۳۹۰ در ۱۲ ایستگاه نمونه‌برداری استفاده شده است. همچنین این پارامترها در ۱۱ محل ورودی آلاینده‌های نقطه‌ای به رودخانه سفیدرود شامل مرغداری منجیل، فاضلاب رودبار، کارخانه روغن کشتی گنجه رودبار، فاضلاب رستم آباد، مرغداری سیاهکل، مرغداری کیسم، فاضلاب شهر آستانه، کارخانه لبنیات گلزار، کارخانه لبنیات سعدآباد، کارخانه کیان و مرغداری گیلان در یک ماه اندازه‌گیری و مورد استفاده قرار گرفته است. جدول ۳ مشخصات آماری داده‌های کیفی مورد استفاده در مقاله حاضر را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳، حداقل و حداکثر مقدار اکسیژن محلول برابر با ۳/۴ و ۱۲/۷ میلی‌گرم بر لیتر به ترتیب در مهرماه ۱۳۸۷ و خردادماه ۱۳۹۰ در ایستگاه‌های شماره‌ی ۱۲ و ۴ اندازه‌گیری شده است. همچنین حداقل اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی^۱ برابر با ۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر در فروردین‌ماه ۱۳۹۰ در ایستگاه ۱ و حداکثر آن در مهرماه ۱۳۸۷ و برابر با ۹۸ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه ۱۱ اندازه‌گیری شده است.

مدل Qual2Kw 6

مدل Qual2Kw 6 مدلی یک بعدی و با فرض جریان دائمی^۲ می‌باشد. رودخانه می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای از بازه‌ها (با طول‌های

مساوی یا نامساوی) و شاخه‌های ورودی به عنوان منابع نقطه‌ای شبیه‌سازی شود. داده‌های ورودی موردنیاز این مدل شامل مشخصات هندسی مقاطع^۳ رودخانه، مشخصات هیدرولیکی جریان، پارامترهای کیفی مورد بررسی و داده‌های هواشناسی می‌باشد (Pelletier and Chapra., 2008). واسنجی مدل Qual2Kw 6 با استفاده از الگوریتم ژنتیک موجود در مدل برای ماه‌های مهر ۱۳۸۷ و خرداد ۱۳۹۰ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین میانگین دبی و دو ماه آذر ۱۳۸۶ و تیر ۱۳۸۷ با توجه به کامل‌تر بودن داده‌ها انجام شد. مدل برای ۴ ماه دیگر شامل آبان ۱۳۸۷، بهمن ۱۳۸۹، فروردین و مرداد ۱۳۹۰ صحت‌سنجی شد. به عبارتی صحت‌سنجی مدل برای ماه‌های تمام فصول شامل بهار (فروردین ۱۳۹۰)، تابستان (مرداد ۱۳۹۰)، پاییز (آبان ۱۳۸۷) و زمستان (بهمن ۱۳۸۹) انجام شد تا شبیه‌سازی مدل در فصول مختلف سال بررسی شود. پس از انجام مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، نتایج اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده توسط مدل Qual2Kw 6 مورد آنالیز حساسیت قرار گرفت. به منظور آنالیز حساسیت مدل Qual2Kw 6 از نرم‌افزار YASAIw^۴ که به صورت زیربرنامه‌ای به این مدل اضافه می‌شود، استفاده شد.

نتایج و بحث

با توجه به اهمیت چهار پارامتر اکسیژن محلول، اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی، نیتروژن کل و فسفر کل نسبت به سایر پارامترهای کیفیت آب مقادیر اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده این پارامترها در بخش نتایج این مقاله بررسی شد. شکل ۴، نتایج شبیه‌سازی پارامترهای نیتروژن کل و فسفر کل را در مرحله صحت‌سنجی نشان می‌دهد.

3- hydraulic geometry

4- Yet Another Simulation Add-In

1- Biochemical oxygen Demand (BOD)

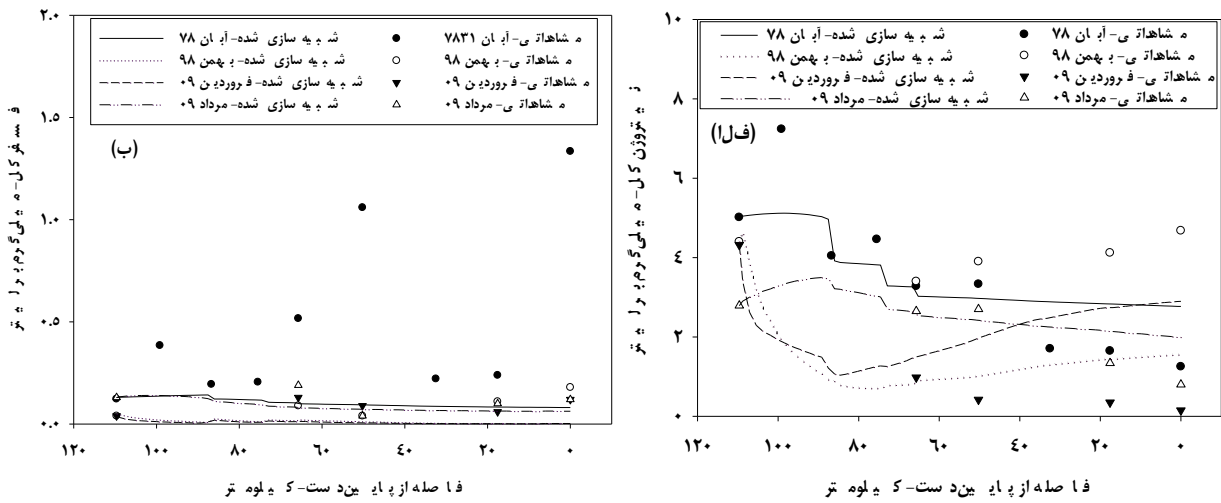
2- Steady state flow

جدول ۳- مشخصات آماری داده‌های کیفی رودخانه سفیدرود (سازمان حفاظت محیط زیست، ۱۳۸۹ و میرمشتاقی و همکاران، ۱۳۹۰)

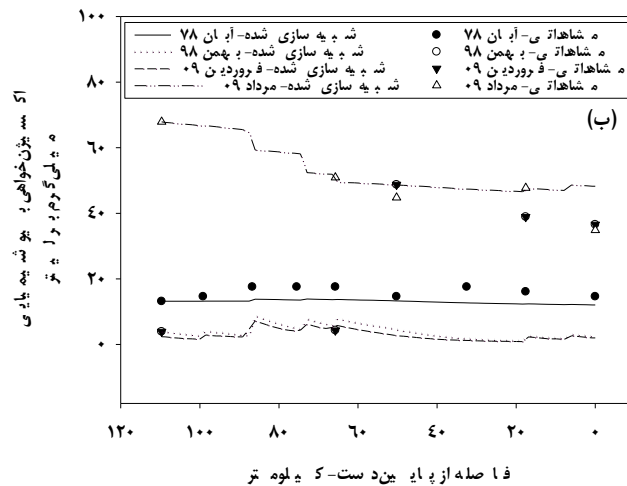
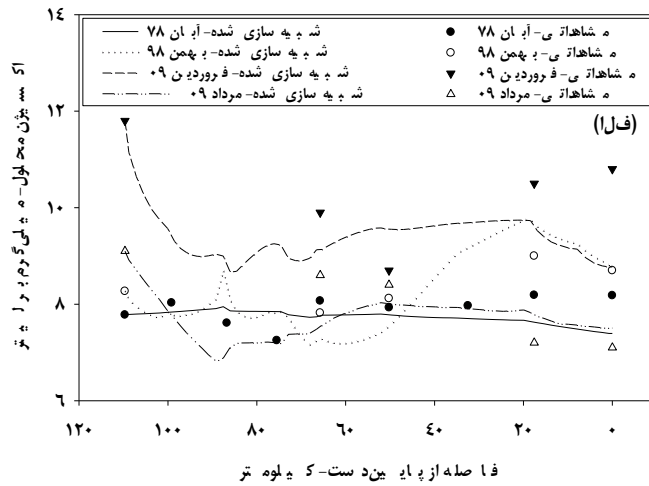
| تاریخ | آماره | Q (m ³ /s) | T (°C) | DO (mg/l) | BOD (mg/l) | pH | EC (mmho/cm) | TS (mg/l) | TP (mg/l) | TN (mg/l) |
|--------------|--------------|-----------------------|--------|-----------|------------|-----|--------------|-----------|-----------|-----------|
| آذر ۱۳۸۶ | مینیمم | ۸ | ۱۰/۰ | ۷/۶ | ۹/۰ | ۸/۲ | ۱/۹۶ | ۳۷۲ | ۰/۰۳ | ۰/۲ |
| | ماکزیمم | ۴۵ | ۱۲/۰ | ۹/۲ | ۱۶/۰ | ۸/۵ | ۵/۱۴ | ۲۹۱۹ | ۰/۰۵ | ۲/۳ |
| | میانگین | ۲۷ | ۱۰/۸ | ۸/۳ | ۱۳/۳ | ۸/۴ | ۳/۰۵ | ۹۴۷ | ۰/۰۴ | ۱/۲ |
| | انحراف معیار | ۲۶ | ۰/۶ | ۰/۵ | ۲/۲ | ۰/۱ | ۱/۳۷ | ۸۳۶ | ۰/۰۱ | ۰/۶ |
| تیر ۱۳۸۷ | مینیمم | ۲۹ | ۲۶/۰ | ۸/۳ | ۱۰/۰ | ۸/۲ | ۰/۲۸ | ۱۵۷۷ | ۰/۰۴ | ۱/۰ |
| | ماکزیمم | ۵۴ | ۲۳/۰ | ۹/۶ | ۱۴/۰ | ۸/۵ | ۳/۰۱ | ۳۳۶۶ | ۰/۰۷ | ۵/۵ |
| | میانگین | ۴۲ | ۲۹/۶ | ۸/۹ | ۱۱/۴ | ۸/۳ | ۰/۶۴ | ۲۱۷۹ | ۰/۰۶ | ۲/۶ |
| | انحراف معیار | ۱۸ | ۲/۱ | ۰/۴ | ۱/۳ | ۰/۱ | ۰/۸۹ | ۵۰۰ | ۰/۰۱ | ۱/۴ |
| مهر ۱۳۸۷ | مینیمم | ۲ | ۱۷/۰ | ۳/۴ | ۳۴/۰ | ۷/۶ | ۱/۴۷ | ۲۵ | ۰/۰۲ | ۰/۵ |
| | ماکزیمم | ۱۸ | ۲۱/۰ | ۵/۱ | ۹۸/۰ | ۸/۵ | ۴/۲۰ | ۱۶۰ | ۰/۰۵ | ۱/۸ |
| | میانگین | ۱۰ | ۱۸/۵ | ۴/۱ | ۵۴/۰ | ۸/۳ | ۲/۷۱ | ۵۷ | ۰/۰۴ | ۱/۱ |
| | انحراف معیار | ۱۱ | ۱/۳ | ۰/۵ | ۱۸/۴ | ۰/۳ | ۱/۰۴ | ۴۷ | ۰/۰۱ | ۰/۵ |
| آبان ۱۳۸۷ | مینیمم | ۲ | ۳۲/۰ | ۷/۳ | ۹/۰ | ۷/۱ | ۱/۱۰ | ۸۲۹ | ۰/۱۲ | ۰/۵ |
| | ماکزیمم | ۱۵۲ | ۲۹/۰ | ۸/۲ | ۱۲/۰ | ۸/۲ | ۳/۰۰ | ۲۵۱۷ | ۱/۳۴ | ۷/۲ |
| | میانگین | ۷۷ | ۲۵/۰ | ۷/۹ | ۱۰/۹ | ۷/۷ | ۱/۵۰ | ۱۱۱۸ | ۰/۴۸ | ۳/۵ |
| | انحراف معیار | ۱۰۶ | ۲/۲ | ۰/۳ | ۱/۲ | ۰/۳ | ۰/۵۸ | ۵۳۰ | ۰/۴۳ | ۲/۰ |
| بهمن ۱۳۸۹ | مینیمم | ۶ | ۶/۱ | ۷/۸ | ۲/۷ | ۷/۸ | ۰/۴۲ | ۲۶۹ | ۰/۰۴ | ۳/۴ |
| | ماکزیمم | ۴۵ | ۹/۱ | ۹/۰ | ۳۳/۳ | ۸/۹ | ۱/۲۷ | ۸۱۲ | ۰/۱۸ | ۴/۷ |
| | میانگین | ۲۶ | ۷/۹ | ۸/۴ | ۱۸/۱ | ۸/۳ | ۰/۷۹ | ۵۰۶ | ۰/۰۹ | ۴/۱ |
| | انحراف معیار | ۲۸ | ۱/۰ | ۰/۵ | ۱۴/۳ | ۰/۴ | ۰/۴۱ | ۲۶۵ | ۰/۰۶ | ۰/۵ |
| فروردین ۱۳۹۰ | مینیمم | ۷ | ۱۲/۹ | ۸/۷ | ۱/۶ | ۷/۵ | ۰/۷۶ | ۴۹۰ | ۰/۰۴ | ۰/۲ |
| | ماکزیمم | ۳۸ | ۱۸/۰ | ۱۱/۸ | ۲۰/۹ | ۸/۴ | ۱/۷۵ | ۱۱۲۳ | ۰/۱۳ | ۴/۳ |
| | میانگین | ۲۳ | ۱۶/۳ | ۱۰/۳ | ۱۱/۶ | ۸/۲ | ۱/۱۴ | ۷۲۹ | ۰/۰۹ | ۱/۲ |
| | انحراف معیار | ۲۲ | ۲/۱ | ۱/۱ | ۹/۰ | ۰/۴ | ۰/۴۷ | ۳۰۲ | ۰/۰۴ | ۱/۷ |
| خرداد ۱۳۹۰ | مینیمم | ۱۴ | ۲۱/۹ | ۸/۶ | ۷/۴ | ۸/۰ | ۱/۴۹ | ۹۵۱ | ۰/۰۴ | ۰/۳ |
| | ماکزیمم | ۱۶۲ | ۳۰/۰ | ۱۲/۷ | ۵۴/۱ | ۸/۳ | ۱/۵۶ | ۹۹۷ | ۰/۱۱ | ۴/۷ |
| | میانگین | ۸۸ | ۲۴/۷ | ۱۰/۲ | ۲۷/۸ | ۸/۲ | ۱/۵۴ | ۹۸۳ | ۰/۰۷ | ۲/۱ |
| | انحراف معیار | ۱۰۵ | ۳/۳ | ۱/۶ | ۲۰/۳ | ۰/۱ | ۰/۰۳ | ۱۹ | ۰/۰۳ | ۱/۷ |
| مرداد ۱۳۹۰ | مینیمم | ۱۵ | ۲۴/۰ | ۷/۱ | ۲۳/۸ | ۷/۸ | ۱/۵۵ | ۹۹۵ | ۰/۰۴ | ۰/۸ |
| | ماکزیمم | ۵۲ | ۲۷/۰ | ۹/۱ | ۴۶/۴ | ۸/۲ | ۲/۰۳ | ۱۲۹۹ | ۰/۱۹ | ۲/۸ |
| | میانگین | ۳۴ | ۲۵/۴ | ۸/۱ | ۳۳/۶ | ۸/۰ | ۱/۷۱ | ۱۰۹۳ | ۰/۱۲ | ۲/۱ |
| | انحراف معیار | ۲۶ | ۱/۱ | ۰/۹ | ۸/۲ | ۰/۲ | ۰/۱۹ | ۱۲۲ | ۰/۰۵ | ۰/۹ |

۱۳۹۰ کمتر از ۰/۲۰ میلی گرم بر لیتر اندازه‌گیری شده است. شکل ۵، مقادیر اکسیژن محلول و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی^۱ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله صحت‌سنجی مدل را نشان می‌دهد.

شکل ۴ نشان می‌دهد که نیتروژن کل مشاهداتی در ماه‌های مورد بررسی در طول رودخانه سفیدرود روندی کاهشی داشته‌اند. مخصوصاً در فروردین‌ماه سال ۱۳۹۰ که مقدار نیتروژن کل از ۴/۳۲ میلی‌گرم بر لیتر در بالادست رودخانه به ۰/۱۵ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافته است. بیشترین مقادیر نیتروژن کل اندازه‌گیری شده در رودخانه سفیدرود مربوط به ماه‌های آبان ۱۳۸۷ و بهمن ۱۳۹۰ و به ترتیب برابر ۷/۲۴ و ۴/۶۸ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد. بیشترین مقادیر فسفر کل در رودخانه سفیدرود در آبان ۱۳۸۷ اندازه‌گیری شده است. همچنین مقادیر فسفر کل در سه ماه بهمن ۱۳۸۹ و فروردین و مرداد



شکل ۴- نیتروژن کل (الف) و فسفر کل (ب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سفیدرود در مرحله صحت‌سنجی مدل



شکل ۵- اکسیژن محلول (الف) و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (ب) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده سفیدرود در مرحله صحت‌سنجی مدل

شبهه سازی اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود این می باشد که دقت مناسب شبهه سازی مدل برای پارامتر اکسیژن محلول می باشد. در جدول ۴، مقادیر پارامترهای آماری شامل میانگین، انحراف معیار، ضریب همبستگی (R) و مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (nRMSE) برای پارامترهای شبهه سازی شده در دو مرحله واسنجی و صحت سنجی ارائه شده است.

داده های اندازه گیری شده از اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی در طول رودخانه سفیدرود روندی صعودی را از خود نشان می دهند که حاکی از نامطلوبتر شدن وضعیت کیفیت آب رودخانه سفیدرود از بالادست به سمت پایین دست رودخانه دارد. البته در مرداد ۱۳۹۰ غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی از بالادست به پایین دست رودخانه کاهش داشته است (به شکل ۵ نگاه شود). نکته قابل توجه در

جدول ۴- نتایج آماری مراحل واسنجی و صحت سنجی مدل Qual2Kw

| پارامترهای مدل سازی شده | | | | | | | | | | مرحله مدل سازی | آماره |
|-------------------------|-------------------|------|------|---------|------|-------|--------|------|------|-------------------|-------|
| DO | CBOD _u | TP | TN | EC | pH | T | Q | H | U | | |
| ۷/۸۵ | ۳۸/۹۸ | ۰/۱۲ | ۱/۷۴ | ۱۹۸۵/۲۰ | ۸/۳۰ | ۲۰/۰۳ | ۲۳۹/۱۴ | ۲/۰۰ | ۱/۱۸ | میانگین | |
| ۰/۷۳ | ۱۵/۴۸ | ۰/۰۹ | ۱/۰۴ | ۸۳۱/۳۸ | ۰/۱۶ | ۱/۷۷ | ۷۶/۶۴ | ۰/۷۴ | ۰/۲۰ | انحراف معیار | |
| ۰/۱۵ | ۰/۵۰ | ۱/۰۸ | ۰/۸۱ | ۰/۵۱ | ۰/۰۶ | ۰/۱۲ | ۰/۳۲ | ۰/۲۵ | ۰/۱۸ | nRMSE | |
| ۰/۲۹ | ۰/۴۶ | ۰/۳۸ | ۰/۳۵ | ۰/۵۲ | ۰/۵۸ | ۰/۴۹ | ۰/۵۷ | ۰/۱۷ | ۰/۵۷ | ضریب همبستگی | |
| ۸/۶۷ | ۲۹/۵۴ | ۰/۱۹ | ۲/۷۴ | ۱۲۸۳/۹۰ | ۸/۰۴ | ۱۷/۸۰ | ۷۱/۹۷ | ۱/۱۶ | ۰/۹۹ | میانگین | |
| ۰/۷۰ | ۱۳/۹۱ | ۰/۱۴ | ۱/۲۷ | ۴۱۵/۳۲ | ۰/۳۴ | ۱/۳۵ | ۱۲/۹۷ | ۰/۳۷ | ۰/۲۱ | انحراف معیار | |
| ۰/۰۶ | ۰/۴۵ | ۰/۹۶ | ۰/۴۷ | ۰/۴۷ | ۰/۰۴ | ۰/۱۳ | ۰/۳۷ | ۰/۳۷ | ۰/۲۶ | nRMSE | |
| ۰/۷۲ | ۰/۵۹ | ۰/۴۷ | ۰/۱۱ | ۰/۷۵ | ۰/۵۴ | ۰/۳۸ | ۰/۶۸ | ۰/۳۶ | ۰/۴۷ | ضریب همبستگی | |

بالاتری نسبت به پارامترهایی مانند فسفر کل، نیتروژن کل و شوری برخوردار می باشد. جدول ۵، نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر تغییرات اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود را برای سه ماه آذر ۱۳۸۶، مهر ۱۳۸۷ و فروردین ۱۳۹۰ نشان می دهد.

مطابق با جدول ۴، کمترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده در مراحل واسنجی و صحت سنجی 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 می باشد، این نشان می دهد که مدل در شبهه سازی پارامترهایی مانند کلیتیت، دما و اکسیژن محلول از دقت

جدول ۵- نتایج آنالیز حساسیت ضرایب و پارامترهای مؤثر بر اکسیژن محلول سفیدرود

| تغییرات اکسیژن محلول (درصد) | | | | | | | | | | | | زمان نمونه برداری |
|-----------------------------|-------|--------|----------|--------|--------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|---|
| فروردین ۱۳۹۰ | | | مهر ۱۳۸۷ | | | آذر ۱۳۸۶ | | | | | | |
| +۵۰٪ | +۲۵٪ | -۲۵٪ | -۵۰٪ | +۵۰٪ | +۲۵٪ | -۲۵٪ | -۵۰٪ | +۵۰٪ | +۲۵٪ | -۲۵٪ | -۵۰٪ | تغییرات پارامتر (درصد) |
| ۱۲/۴۲ | ۷/۲۵ | -۱۰/۶۸ | -۲۷/۵۱ | ۲۱/۱۳ | ۱۱/۴۵ | -۱۳/۳۴ | -۲۸/۲۰ | ۸/۳۴ | ۴/۶۶ | -۵/۹۹ | -۱۳/۸ | ضریب هوادهی (K _a) |
| ۰/۹۵ | ۰/۴۹ | -۰/۵۰ | -۱/۰۶ | ۷/۵۶ | ۳/۶۸ | -۳/۶۷ | -۷/۰۵ | ۱/۵۸ | ۰/۸۰ | -۰/۷۸ | -۱/۵۳ | ضریب توان سرعت (B) |
| -۳/۶۶ | -۱/۸۵ | ۱/۷۴ | ۳/۴۱ | -۲۴/۳۳ | -۱۳/۴۸ | ۱۵/۸۸ | ۳۳/۳۰ | -۵/۶۵ | -۲/۹۲ | ۳/۱۷ | ۶/۵۵ | ضریب توان عمق (C) |
| -۲/۳۰ | -۱/۳۵ | ۲/۳۷ | ۶/۷۲ | -۱۷/۱۶ | -۹/۷۱ | ۱۱/۵۴ | ۲۵/۰۰ | -۰/۴۴ | -۰/۰۵ | ۰/۲۳ | ۰/۴۵ | ضریب زوال اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (K _c) |
| -۰/۸۲ | -۰/۴۷ | ۰/۷۶ | ۱/۶۱ | ۱/۹۴ | ۱/۱۵ | -۱/۵۳ | -۳/۶۷ | -۳/۱۸ | -۱/۷۹ | ۲/۳۱ | ۵/۴۱ | دبی بالادست (Q) |
| -۰/۳۸ | -۰/۱۷ | ۰/۳۴ | ۰/۴۶ | -۱/۷۹ | -۰/۸۸ | ۱/۰۰ | ۱/۹۱ | -۵/۲۷ | -۲/۶۳ | ۲/۵۵ | ۵/۱۱ | اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD) |

بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب هوادهی (K_a) دارد. به عنوان مثال با ۵۰ درصد کاهش ضریب هوادهی در مهر ۱۳۸۷، مقدار اکسیژن محلول رودخانه ۲۸/۲۰ درصد کاهش داشته است. همچنین اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود نسبت به کاهش ضریب هوادهی در مقایسه با افزایش آن حساسیت بیشتری از خود نشان داده است. به

نکته قابل توجه در مورد نتایج جدول ۵ این می باشد که، مقادیر درصد تغییرات پارامترها در جدول ۵، در نوبت زمانی مشخص شده و برای طول کل بازه مورد مطالعه در رودخانه محاسبه شده است. همانطور که جدول ۵ نشان می دهد از بین ۶ پارامتر در نظر گرفته شده برای آنالیز حساسیت، اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود

سفیدرود را در مهر ۱۳۸۷ که دارای شرایط بحرانی می‌باشد در اثر تغییرات پارامترهای مؤثر بر آن شامل ضریب هوادهی و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی نشان می‌دهد.

شکل ۶ (الف) نشان می‌دهد که در اثر کاهش ۵۰ و ۲۵ درصدی مقدار ضریب هوادهی، مقدار اکسیژن محلول در مهر ۱۳۸۷، از حدود ۸۰ کیلومتری نسبت به پایین دست رودخانه سفیدرود روند نزولی داشته و در ایستگاه پایین دست به ترتیب به حدود ۱ و ۲ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است. همچنین این شکل نشان می‌دهد که در صورت افزایش ۲۵ درصدی در مقدار ضریب هوادهی مقدار اکسیژن محلول در تمام طول رودخانه سفیدرود به جز ایستگاه آخر از مقدار ۴ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر می‌شود و در صورت افزایش ۵۰ درصدی ضریب هوادهی، مقدار اکسیژن محلول به جز در دو ایستگاه اول و ایستگاه آخر، در سایر ایستگاه‌های میانی رودخانه سفیدرود از ۵ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر می‌شود. همچنین شکل ۶ (ب) نشان می‌دهد که با کاهش ۵۰ درصدی ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی مقادیر اکسیژن محلول در تمام ایستگاه‌های پایین دست رودخانه به جز دو ایستگاه اول از مقدار ۵ میلی‌گرم بر لیتر فراتر می‌رود. همچنین افزایش ۵۰ درصدی مقدار ضریب زوال باعث می‌شود که مقدار اکسیژن محلول روندی نزولی پیدا کرده و در ایستگاه آخر رودخانه مقدار آن از ۲ میلی‌گرم بر لیتر هم کمتر شود. شکل ۷ تغییرات اکسیژن محلول را نسبت به تغییرات دبی در بالادست و مقدار اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی رودخانه سفیدرود نشان می‌دهد.

شکل ۷ (الف) می‌دهد که کاهش یا افزایش دبی اثری عکس در ۴ ایستگاه بالادست رودخانه نسبت به ۵ ایستگاه پایین دست رودخانه سفیدرود داشته است. به عبارتی در ۴ ایستگاه ابتدای رودخانه نمودار با کاهش ۵۰ درصدی دبی دارای بیشترین اکسیژن محلول می‌باشد در حالی که در ۵ ایستگاه پایین دست رودخانه بیشترین اکسیژن محلول مربوط به نمودار با افزایش ۵۰ درصدی دبی می‌باشد. به بیان دیگر تغییرات دبی در ۴ ایستگاه ابتدایی رودخانه اثری معکوس و در ۵ ایستگاه انتهایی اثری مستقیم روی اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود داشته است.

علت این تغییرات عریض تر شدن رودخانه سفیدرود در جهت حرکت جریان از بالادست به سمت پایین دست می‌باشد. هر چه رودخانه عریض تر شود با افزایش دبی عمق آب نسبت به حالت رودخانه با عرض کم، افزایش کمتری پیدا می‌کند. به عبارتی در ۴ ایستگاه اول چون عرض رودخانه کم می‌باشد با افزایش دبی، عمق جریان به سرعت زیاد شده و اکسیژن محلول در این ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین در ۵ ایستگاه انتهایی رودخانه سفیدرود به علت عرض بیشتر رودخانه نسبت به بالادست، با افزایش دبی عمق جریان افزایش چندانی پیدا نمی‌کند و در عوض با افزایش سرعت جریان، اکسیژن محلول رودخانه افزایش می‌یابد.

طوری که در فروردین ۱۳۹۰، اکسیژن محلول با ۵۰ درصد کاهش ضریب هوادهی ۲۷/۵۱ درصد کاهش داشته است در حالی که با ۵۰ درصد افزایش ضریب هوادهی کمتر از نصف این مقدار و برابر ۱۲/۴۲ درصد افزایش نشان داده است. پس از ضریب هوادهی، اکسیژن محلول نسبت به ضریب توان عمق (C) در رابطه هوادهی حساسیت بیشتری از خود نشان داده است. به طوری که بیشترین درصد تغییرات در مقدار اکسیژن محلول رودخانه در جدول ۵، از کاهش ۵۰ درصدی ضریب توان عمق جریان در رابطه هوادهی و برابر ۳۳/۳۰ درصد افزایش بدست آمده است.

اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود نسبت به ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (K_c) نیز حساسیت زیادی از خود نشان داده به طوری که، اکسیژن محلول مهر ۱۳۸۷ با کاهش ۵۰ درصدی ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، ۲۵/۰۰ درصد افزایش، و با افزایش ۵۰ درصدی این ضریب ۱۷/۷۶ درصد کاهش داشته است.

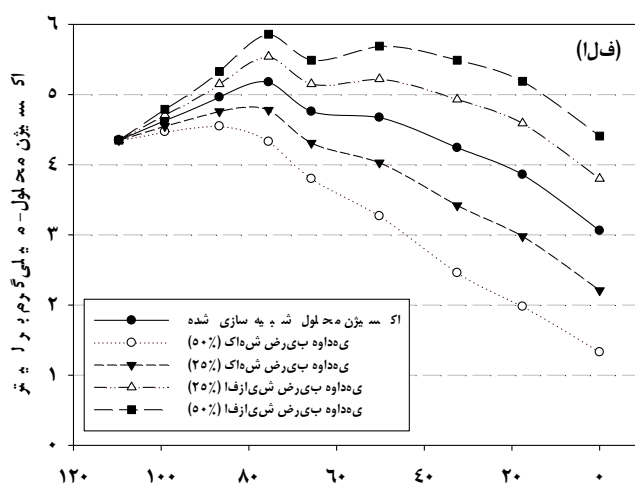
نکته مهمی که در آنالیز حساسیت اکسیژن محلول نسبت به تغییرات دبی وجود دارد، آن است که همواره اکسیژن محلول رابطه‌ای مشخص با تغییرات دبی بالادست نداشته و ممکن است با افزایش دبی، اکسیژن محلول کاهش یا افزایش پیدا کند. جدول ۵ نشان می‌دهد که ۵۰ درصد افزایش دبی بالادست رودخانه سفیدرود در دو ماه آذر ۱۳۸۶ و فروردین ۱۳۹۰ باعث کاهش اکسیژن محلول به مقدار ۳/۱۸ و ۰/۸۲ درصد و در مهر ۱۳۸۷ افزایش دبی بالادست، باعث افزایش ۱/۹۴ درصدی اکسیژن محلول شده است.

دلیل این موضوع آن است که دو عامل، یکی مقدار تغییر در غلظت آلاینده در اثر تغییر دبی جریان و دومی مقدار تغییرات پارامترهای هیدرولیکی جریان (سرعت و عمق جریان) در اثر تغییرات دبی جریان اثر مستقیم یا معکوس مقدار جریان بر اکسیژن محلول مؤثر است. اگر تغییرات غلظت آلاینده در اثر تغییرات دبی زیاد باشد مانند مهر ۱۳۸۷ که هم مقدار جریان زیاد (۲۰۸/۳۰ متر مکعب بر ثانیه) و هم غلظت آلاینده زیاد (غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی برابر ۶۲/۹ میلی‌گرم در لیتر) داشته است، تغییرات دبی اثر مستقیمی بر اکسیژن محلول داشته است. اما در صورتی که تغییرات غلظت آلاینده در اثر تغییرات دبی زیاد نباشد (مانند دو ماه آذر ۱۳۸۶ و فروردین ۱۳۹۰ که مقدار جریان و غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی در این ماه‌ها به ترتیب برابر ۱۰۶/۱ و ۶/۷۵ مترمکعب بر ثانیه و ۱۹ و ۳/۹۱ میلی‌گرم در لیتر بوده است) اثر معکوس یا مستقیم مقدار جریان به مقدار تغییرات دبی روی عمق و سرعت جریان در رودخانه باز می‌گردد. با توجه به رابطه عکس و حساسیت زیاد اکسیژن محلول با عمق جریان رودخانه، اگر افزایش دبی باعث افزایش زیاد عمق جریان رودخانه شود، اکسیژن محلول در رودخانه مانند دو ماه آذر ۱۳۸۶ و فروردین ۱۳۹۰ با افزایش دبی کاهش خواهد یافت. شکل ۶ تغییرات اکسیژن محلول رودخانه

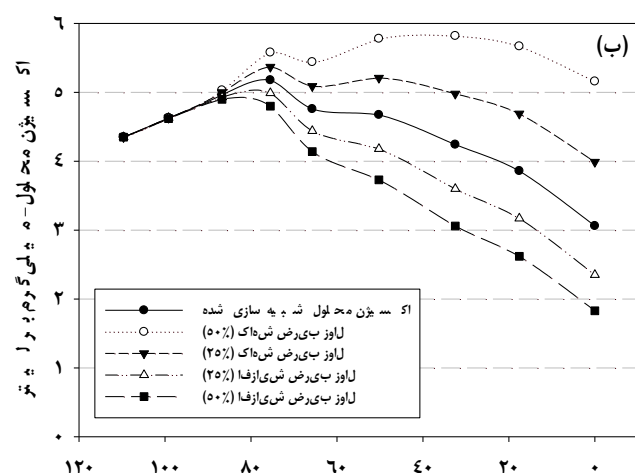
نتیجه گیری

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که نیتروژن کل مشاهداتی در ماه‌های مورد بررسی در طول رودخانه سفیدرود روندی کاهشی داشته‌اند. مخصوصاً در فروردین ۱۳۹۰ که مقدار نیتروژن کل از ۴/۳۲ میلی‌گرم در لیتر در بالادست رودخانه به ۰/۱۵ میلی‌گرم در لیتر رسیده است. بیشترین مقادیر نیتروژن کل اندازه‌گیری شده در سفیدرود مربوط به ماه‌های آبان ۱۳۸۷ و بهمن ۱۳۹۰ بوده است. بیشترین مقادیر فسفر کل در رودخانه سفیدرود در آبان ۱۳۸۷ اندازه‌گیری شده است. داده‌های اندازه‌گیری شده از اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی کربنی در طول رودخانه سفیدرود روندی صعودی را از خود نشان داد که حاکی از نزول وضعیت کیفی آب رودخانه سفیدرود از بالادست به سمت پایین دست رودخانه دارد. کمترین مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل

برای پارامتر pH و بیشترین آن برای پارامتر فسفر کل می‌باشد که نشان می‌دهد مدل در شبیه‌سازی پارامترهایی مانند قلیائیت، دما و اکسیژن محلول از دقت بالاتری نسبت به پارامترهایی مانند فسفر کل، نیتروژن کل و شوری برخوردار می‌باشد. اکسیژن محلول در رودخانه سفیدرود بیشترین حساسیت را نسبت به ضریب هوادهی (K_a) از خود نشان داده است به طوری که، با ۵۰ درصد کاهش ضریب هوادهی در مهر ۱۳۸۷، مقدار اکسیژن محلول رودخانه ۲۸/۲۰ درصد کاهش داشته است. همچنین اکسیژن محلول رودخانه سفیدرود نسبت به ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (K_c) نیز حساسیت زیادی از خود نشان داده به طوری که، اکسیژن محلول مهر ۱۳۸۷ با کاهش ۵۰ درصدی ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی، ۲۵/۰۰ درصد افزایش، و با افزایش ۵۰ درصدی این ضریب ۱۷/۷۶ درصد کاهش داشته است.

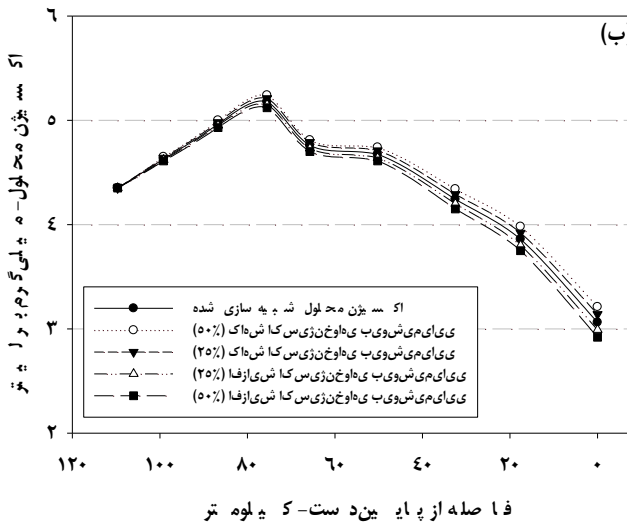
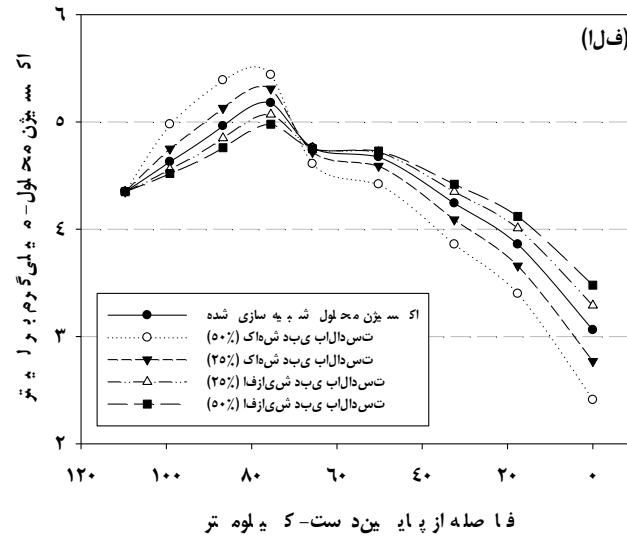


فا صله از پای بند ست- ۵ یلوم تر



فا صله از پای بند ست- ۵ یلوم تر

شکل ۶- تغییرات اکسیژن محلول سفیدرود در اثر تغییرات ضریب هوادهی (الف) و ضریب زوال اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (ب)- مهر ۱۳۸۷



شکل ۷- تغییرات اکسیژن محلول سفیدرود در اثر تغییرات دبی بالادست (الف) و اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (ب) - مهر ۱۳۸۷

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از دانشگاه تهران و سازمان حفاظت محیط زیست کشور به خاطر تأمین امکانات لازم، اطلاعات و داده های این تحقیق، تشکر و قدردانی می شود.

منابع

مجله مهندسی منابع آب. سال هفتم. زمستان ۱۳۹۳. صفحات ۸۵-۹۸.

پورآبادی، م. ۱۳۸۶. بررسی تأثیر زبری موضعی بر ضریب اختلاط عرضی آلودگی در یک کانال مستطیلی. پایان نامه کارشناسی ارشد. سازه های آبی. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی. دانشگاه تهران.

حسینی، پ.، حسینی، ی. ۱۳۹۶. بررسی تغییرات توان خودپالایی رودخانه کارون در سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ با استفاده از مدل QUAL2KW در محدوده شهر اهواز. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر. دوره ۴۹. شماره ۱. ۳۵-۴۵.

خدام محمدی، م.، بوستانی، ف. ۱۳۹۵. ارزیابی توان خودپالایی و نقش اکسیژن محلول در کیفیت آب رودخانه کر (مطالعه موردی:

انصاری پور، ا. ح.، ابراهیمی، ک.، امید، م. ح. ۱۳۹۲. بررسی خودپالایی جریان های رودخانه ای با توسعه و کاربرد مدل های ریاضی مطالعه موردی: رودخانه پسیخان-گیلان. مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی. ۱۴. ۲۱: ۳۱-۴۲.

بوستانی، ف.، گوهرگانی، ا. ۱۳۹۳. شبیه سازی کیفیت آب رود بشار در محدوده ی شهر یاسوج با استفاده از شبیه سازی QUAL2K.

- modeling frame- work for simulating river and stream water quality (beta version): documentation and users manual. Civil and Environmental Engineering Department. Medford: Tufts University.
- Leopold, L.B. and Maddock, T.J. 1953. The hydraulic geometry channels and some physiographic implications. Geological survey professionals. paper 252, United States Government Printing Office, Washington, 57p.
- Pelletier, G.J. and Chapra, S.C. 2008. QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1), a modeling framework for simulating river and stream water quality. Washington: Department of ecology.
- Santos, S., Vilar, V. J., Alves, P., Boaventura, R. A. and Botelho, C. 2013. Water quality in Minho/Miño River (Portugal/Spain). Environmental monitoring and assessment, 185.4: 3269-3281.
- Sharma, D., Kansal, A. and Pelletier, G. 2017. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. Applied Water Science. 7:1535–1559.
- Tayfur, G. and Singh, V. 2005. Predicting longitudinal dispersion coefficient in natural streams by artificial neural network. Journal of Hydraulic Engineering, 131. 11: 991-1000.
- Vieira, J., Fonseca, A., Vilar, V.J., Boaventura, R.A. and Botelho, C.M. 2013. Water quality modelling of Lis River, Portugal. Environmental Science and Pollution Research. 20.1: 508-524.
- پایین دست سد درودزن تا دریاچه طشک- بختگان. مجله مهندسی منابع آب. سال نهم. شماره ۳۰. ۱۰۲-۸۷.
- خوب، ن، امین نژاد، ب، امید، ا. ۱۳۹۶. پایش کیفی و تعیین سهم رودخانه‌های واریزی بر افزایش شوری رودخانه قزل اوزن در محدوده استان زنجان با استفاده از نرم افزار عددی Qual2k. مجله مهندسی منابع آب. سال دهم. شماره ۳۲. ۴۴-۳۳.
- عاشق معلا، م، محمدی فاضل، ا، حمامی، م. ۱۳۹۳. نقش توان خودپالایی رودخانه‌ها در تعیین حدود مجاز پارامترهای کیفی پساب‌ها. مجله علوم و مهندسی محیط زیست. سال اول. شماره ۴. ۴۹-۳۷.
- مقیم نژاد، س، ابراهیمی، ک، کراچیان، ر. ۱۳۹۶. مطالعه تغییرات فصلی خودپالایی رودخانه کارون. نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۴۹، شماره ۴. ۶۳۴-۶۲۱.
- میرمشتاقی، س. م، امیرنژاد، ر، خالدیان، م. ر. ۱۳۹۰. بررسی کیفیت آب رودخانه سفیدرود و پهنه‌بندی آن با استفاده از شاخص‌های کیفی NSFQI و OWQI. فصلنامه علمی- پژوهشی تالاب. سال سوم. شماره ۹. ۳۴-۲۳.
- نوروزی، ح، رادمنش، ف، پورحقی، ا، سلگی، ا. ۱۳۹۷. بهینه‌سازی چندهدفه در تعیین جریان‌های زیست‌محیطی رودخانه. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. سال نهم. شماره ۱۷. ۲۵-۱۴.
- Chapra, S.C. and Pelletier, G.J. 2003. QUAL2 K: a

Sensitivity Analysis of Qual2kw Model in the Modeling of Water Quality Parameters of Sefidrud

M. M. Ghaleni^{*1} and K. Ebrahimi²

Received: Apr.14, 2019

Accepted: Jul.10, 2019

Abstract

Rivers are always one of the most important sources of water. In recent years, due to droughts and the entry of various pollutants, there have been many concerns about river quality conservation. Evaluation of the effective factors on the quality of river water quality management component is the first step of the rivers modeling. The aim of this paper is to evaluate the amount of Dissolved oxygen changes in the Sefidrud River by changing the parameters affecting it. To achieve this goal, after calibration and verification the results of simulation of water quality parameters using the Qual2kw model, the sensitivity analysis of this model was performed using YASAIw software. The data used in the present paper consists of the hydraulic data (depth, Velocity, Discharge), quality and pollutants input to a range of 110 kilometers in Sefidrud River during December 2007, July, October and November 2008 and February, April, June and August 2011 at 12 sampling stations. The results showed that the minimum and maximum of normalized root mean square error (nRMSE) for calibration and validation phases for the pH parameter was 0.06 and 0.04 respectively, and for the total phosphorus parameter was 1.08 and 0.96, respectively. Also, the results of the sensitivity analysis of the model showed that the Dissolved oxygen in the Sefidrud River showed the highest sensitivity to the reaeration coefficient, the flow depth power and the decay rate of biochemical oxygen demand, respectively.

Keywords: Calibration, Qual2Kw Model, Reaeration Coefficient, Sensitivity Analysis, Validation

1- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Arak University

2- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran, Karaj, Iran

(*- Corresponding Author Email: M-MohammadiGhalenei@Araku.ac.ir)