

وجود منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای در مسیر رودخانه، عامل محدودکننده در تأمین آب شرب و کشاورزی در پایین دست وجود ندارد. در کل مسیر رودخانه، کیفیت آب مناسب برای کشاورزی می‌باشد. تنها ایستگاه کردخیل به دلیل قرارگرفتن در پایین دست رودخانه در طبقه خوب و بقیه ایستگاه‌ها در طبقه عالی قرار دارند که قابل استفاده برای کشاورزی می‌باشد. برای مصارف شرب پس از بررسی غلظت یون‌های موجود در بیشتر نمونه‌های انتخابی در حد مطلوب بوده و در طبقه خوب و قابل قبول قرار گرفته‌اند. حداکثر توان خودپالایی مربوط به حد فاصل پل تجن و کردخیل به میزان $7485/346$ تن در روز و حداقل آن مربوط به حد فاصل بین ریگ چشمه و پل تجن به میزان $102/6805$ تن در روز می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خودپالایی، منابع آلاینده، آلودگی آب، شبیه‌سازی، نیترات.

مقدمه

رودخانه‌ها از مهمترین منابع آب هستند که نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند [۹، ۲۱، ۲۳، ۲۹ و ۳۹]. بسیاری از برنامه‌ریزی‌های منابع آب در کشورها بر اساس پتانسیل بالقوه منابع آب سطحی می‌باشد و شناخت شرایط هر رودخانه در برنامه‌ریزی منابع آب و تأمین مصارف بخش‌های مختلف دارای اهمیت زیادی است [۷، ۸ و ۲۵]. رودخانه‌ها به علت تخلیه انواع مختلف آلاینده‌های موجود در پساب‌های کشاورزی، صنعتی و شهری به‌عنوان یکی از کانون‌های بحرانی از نظر آلودگی مطرح می‌باشند. آلودگی آب از نمونه‌های بارز تخریب منابع زیستی است. بسیاری از کشورهای جهان خسارات جبران‌ناپذیری در نتیجه بهره‌برداری بی‌رویه و تخلیه آب‌های آلوده ناشی از فعالیت‌های صنعتی و شهری دارند [۴، ۷، ۱۱ و ۱۴]. بهره‌برداری غیر اصولی از رودخانه‌ها منجر به زنگ خطر قابل توجهی برای سلامت رودخانه‌ها شده است. آلودگی آب رودخانه‌ها پدیده‌ای است که در آن کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی آب به واسطه تخلیه مواد زاید مانند فاضلاب‌های بهداشتی، رواناب‌های شهری، پساب‌های صنعتی، کشاورزی و دامپروری تغییر می‌کند [۱۰ و ۳۹]. این آلاینده‌ها آثار منفی زیادی بر محیط زیست و سلامت آبزیان، اکوسیستم و زندگی انسان برجای گذاشته و احیای مجدد محیط‌های

ارزیابی تغییرات فصلی کیفیت آب رودخانه تجن با استفاده از مدل شبیه‌سازی Qual2kw

مجتبی ولی زاده پیرکلمی^۱، مجتبی خوش روش^۲

و محمدعلی غلامی سفیدکوهی^۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۲۱

چکیده

دسترسی به آب شیرین و با کیفیت یکی از مهم‌ترین موضوعات مطرح برای انسان امروز است. داشتن منابع آب سالم پیش‌نیازی ضروری برای حفظ کیفیت محیط‌زیست و رشد و توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی است. آب‌های سطحی جاری یا رودخانه‌ها از مهم‌ترین منابع آب هستند که نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز فعالیت‌های مختلف مانند کشاورزی، صنعت، شرب و تولید برق دارند. در این پژوهش به ارزیابی کیفی رودخانه تجن در استان مازندران که به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منبع تأمین‌کننده آب در بخش‌های مختلف استان محسوب می‌شود، پرداخته شد و با استفاده از مدل شبیه‌سازی عددی کیفی (Qual2kw)، بررسی روند تغییر پارامترهای کیفی آب نظیر اکسیژن محلول (DO)، اکسیژن‌خواهی بیولوژیکی (BOD)، اسیدیته (pH)، هدایت الکتریکی (EC)، نیترات (NO_3^-) و فسفات (PO_4^{3-}) بررسی شد. بدین منظور میانگین داده‌های موجود ماهانه از سال ۱۳۸۵-۱۳۹۵ در سه ایستگاه آب منطقه‌ای و محیط‌زیست در طول رودخانه به مدل وارد شد. واسنجی مدل بر اساس داده‌های فصل کم آب (شهریور) و صحت‌سنجی مدل بر اساس داده‌های فصل پر آب (آذر و بهمن) انجام شد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی رودخانه تجن نشان داد که مدل کیفی Qual2kw برآورد مناسبی از شرایط کیفی رودخانه ارائه می‌دهد و این مدل توانست با دقت مناسب پارامترهای موردنظر را شبیه‌سازی کند. یافته‌ها نشان داد، علی‌رغم

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران و نویسنده مسئول: Email: khoshrovesh_m24@yahoo.com
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

آبی نیز نیازمند صرف وقت، هزینه و تلاش فراوانی است [۴ و ۲۲]. سازمان‌های بین‌المللی همواره به حفاظت رودخانه‌ها و پاک‌سازی آب آن‌ها، توجه ویژه‌ای دارند [۱۹ و ۲۹].

به‌طور کلی گسترش شهرها و احداث واحدهای صنعتی و کشاورزی، وابسته به وجود منابع آب کافی به ویژه رودخانه‌ها بوده است [۲۰ و ۳۵]. در این مناطق رودخانه‌ها نه تنها تأمین‌کننده مصارف مختلف آب هستند، بلکه به‌عنوان مجاری طبیعی در انتقال پساب‌ها و فاضلاب‌های تولید شده عمل می‌نمایند [۳۲]. حفظ کیفیت منابع آب به‌منظور تأمین آب آشامیدنی، ارتقاء فعالیت‌ها و کاربری‌های تفریحی و ایجاد یک اکوسیستم مناسب برای ماهیان و حیات وحش، مستلزم کیفیت بالای منابع آب رودخانه می‌باشد. به این دلیل، آگاهی از روند تغییرات کیفی آب رودخانه‌ها همراه با شناسایی ۲۴ و ۲۶ عوامل اصلی آلودگی آن از اهمیت بسیاری برخوردار می‌باشد [۶]. با توجه به توضیحات بیان شده و با وجود بحران آب، خشکسالی و عدم مدیریت راهبردی در استفاده از منابع آبی در کشور، اهمیت حفاظت و بهره‌برداری مناسب از آب‌های سطحی باید بیش از پیش مورد توجه قرار گیرد. در این راستا علاوه بر بررسی کمی، بررسی کیفی رودخانه که از مهم‌ترین منابع تأمین‌کننده آب سطحی است، حائز اهمیت می‌باشد. از آن‌جا که پایش کیفی آب رودخانه‌ها مستلزم صرف وقت و هزینه زیاد می‌باشد، مدل‌های شبیه‌سازی عددی کیفی آب به ابزار مناسب و کارآمد در تعیین و ارزیابی اثرات پارامترهای مختلف در مدیریت کیفی پیکره‌های آبی تبدیل شده است.

شناخت آب از نظر کیفیت، کمیت و چگونگی حصول آن قدمی اساسی در جهت بهینه‌سازی مصرف است. عمده فعالیت‌های آب‌شناسی در جهت تأمین آب برای مصارف کشاورزی و یا شرب و صنعت می‌باشد که هرکدام به لحاظ کیفی می‌بایست دارای ویژگی‌های کیفی و معیارهای مشخص باشند. بحث کیفیت آب برای اولین بار توسط هیلگارد^۱ مطرح شد، وی طبقه‌بندی آب براساس میزان مواد تشکیل‌دهنده آن را در سال ۱۹۰۶ پیشنهاد داد که بعدها این نظریه توسط کلی و براون^۲ در سال ۱۹۳۹ دنبال شد و سرانجام تایلر^۳ در سال ۱۹۵۰ معادله‌ای برای طبقه‌بندی آب براساس کیفیت آب پیشنهاد کرد [۳۰]. در این زمینه تحقیقات زیادی در کشورهای مختلف جهان صورت گرفته است. خوب و همکاران [۱۷] در مورد کیفیت آب ورودی سرشاخه‌های فرعی رودخانه قزل‌اوزن تصمیم به بررسی گرفتند. براساس نتایج شبیه‌سازی، چهار بازه از مسیر رودخانه قزل‌اوزن در محدوده‌ی طرح در استان زنجان سبب افزایش چشمگیر شوری گردیده‌اند. خدام‌محمدی و بوستانی [۱۶]، به‌منظور آگاهی از روند تغییرها و پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه کر از مدل QUAL2K استفاده کردند. کمینه و بیشینه اکسیژن محلول شبیه‌سازی شد که دلیل کاهش آن در ایستگاه پل‌خان، ورود فاضلاب‌های مجتمع پتروشیمی شیراز و شهر مرودشت می‌باشد. از علت افزایش

- 1- Hilgard
- 2- Kely & Brown
- 3- Tacler

آن می‌توان به کم شدن اثر پساب خروجی از تصفیه‌خانه مرودشت و مجتمع پتروشیمی شیراز اشاره کرد. هاشمی و همکاران [۲۲] به‌منظور ارزیابی و تأثیرپذیری رودخانه تالار از ورود پساب‌های ناشی از فعالیت انسانی با استفاده از مدل Qual2kw به بررسی روند تغییرات پارامترهای مهم در بخش کشاورزی پرداختند و نشان دادند که برای هدایت الکتریکی مدل به جز ابتدای مسیر، روند مناسبی را در طول مسیر شبیه‌سازی می‌کند. عبدالخانی و همکاران [۲] به بررسی کیفی رودخانه کرخه پرداختند و با استفاده از مدل Qual-2k توان خود پالایی این رودخانه را ارزیابی نمودند. نتایج تحقیق نشان از کاهش چشمگیر کیفیت آب در طول مسیر داشت. البته حذف آلاینده‌ها به رودخانه به خوبی می‌تواند روند بهبود کیفیت آب در طول مسیر را بهبود بخشد.

حسینی و همکاران [۱۳] کارایی مدل Qual2kw را در خودپالایی رودخانه کارون در بازه زرگان تا کوت‌امیر مطالعه کردند. بر اساس نتایج خروجی مدل به‌طور کلی حکایت از عدم خودپالایی در پارامترهای pH و BOD₅ در هر دو ماه، NO₃ در ماه مرداد و TSS در ماه دی و خودپالایی کم در دیگر پارامترها با توجه به بارآلودگی ورودی در این بازه رودخانه کارون داشت. به‌طور کلی مدل Qual2kw دارای کارایی خوبی برای بررسی خودپالایی رودخانه کارون داشت. عاشق‌معلای و همکاران [۵] طی پژوهشی برای نشان دادن اهمیت توجه به تفاوت‌های رودخانه‌ها و توان خودپالایی هر یک از آن‌ها در تدوین استاندارد تخلیه پساب، دو رودخانه سبزکوه در چهارمحال و بختیاری و رودخانه قشلاق در کردستان را به‌عنوان نمونه انتخاب کردند. بنابراین استاندارد غلظت BOD حداقل باید به نصف استاندارد فعلی کاهش پیدا کند. در تدوین استانداردهای دقیق و کارآمد باید به توان خودپالایی رودخانه، تعداد منابع آلاینده حاشیه رودخانه و میزان بارگذاری مواد زاید و دیگر شرایط متفاوت رودخانه‌ها نیز توجه نمود.

رحمانی و همکاران [۲۸] به بررسی کیفیت آب سیمینه‌رود برای آبیاری بر مبنای دیاگرام ویلکوکس پرداختند که طی تیر ماه ۱۳۸۵ تا خرداد ۱۳۸۶ به اجرا درآمده است. آن‌ها بیان کردند که با توجه به پراکنش نقاط روی دیاگرام ویلکوکس، می‌توان قضاوت نمود که در شرایط فعلی، کیفیت آب رودخانه‌های مورد بررسی برای آبیاری در کلاس خوب و متوسط (C₁S₁ تا C₃S₁) قرار دارد. ونی و همکاران [۳۶] پژوهشی را برای تعیین وضعیت کیفیت آب رودخانه تانگوبهادر^۴ در نزدیکی تالک در کارناتاکا هند با استفاده از مدل Qual2kw انجام دادند. نتایج نشان داد که مقادیر پیش‌بینی شده تقریباً در مقیاس با مقادیر مشاهده شده می‌باشد. شارما و همکاران [۳۳] با استفاده از مدل Qual2kw، پارامترهای DO، BOD، کلی‌فرم‌ها، و نیتروژن را در چهار ایستگاه رودخانه یامونا در دهلی هند به مدت ۱۰ سال (۲۰۰۹-۱۹۹۹) شبیه‌سازی کردند. داده‌های ماهانه از اکتبر ۱۹۹۹ تا ژوئن ۲۰۰۴ برای واسنجی مدل و داده‌های ماهانه از اکتبر ۲۰۰۵

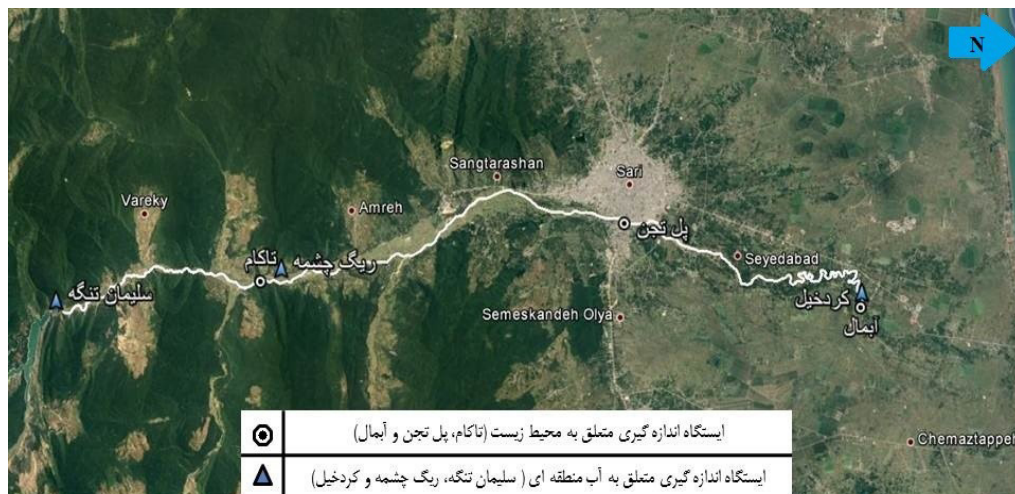
مواد و روش‌ها منطقه مورد مطالعه

رودخانه تجن به طول ۱۴۰ کیلومتر از کوه‌های علی خانی، داراب کوه و سرکوه در دامنه‌های شمالی رشته کوه البرز سرچشمه می‌گیرد و با گذشتن از شرق شهرستان ساری، نزدیک شهر فرح آباد به دریای خزر می‌ریزد. رژیم این رودخانه تحت تاثیر ریزش توام با برف نواحی کوهستانی و باران مناطق کم ارتفاع قرار دارد و از توزیع فصلی یکنواخت‌تری برخوردارند (شکل ۱). سپس تعداد ایستگاه‌های موجود بر روی رودخانه تجن که فعال می‌باشد (متعلق به شرکت آب منطقه‌ای مازندران و سازمان محیط‌زیست استان) تعیین شد و موقعیت مکانی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

داده‌های مورد نیاز

در گام اول ایستگاه‌های کیفیت سنجی و آب شناسی فعال موجود بر روی رودخانه تجن (آب منطقه‌ای و محیط‌زیست) شناسایی شد. برای اجرای مدل Qaul2kw به پارامترهایی مانند میزان ابرناکی، سطح سایه انداز، دمای آب و هوا، نقطه شبنم و سرعت باد نیاز می‌باشد. بدین منظور از میانگین حسابی داده‌های ۲۰ ساله سازمان هواشناسی در ماه‌های مختلف سال استفاده شد. نزدیک‌ترین ایستگاه‌های هواشناسی به ایستگاه‌های هیدرومتری و اندازه‌گیری محدوده پژوهش انتخاب و داده‌های مورد نیاز وارد مدل شد. داده‌های کیفی و هیدرومتری اطلاعات ایستگاه ریگ چشمه به‌عنوان مرز بالادست ($L=0$) به مدل وارد شد. اطلاعات ایستگاه کردخیل به‌عنوان پایاب در نظر گرفته شد. غلظت داده‌های کیفی پارامترهای DO, BOD, NO_3^- , PO_4^{3-} و غیره که در ایستگاه‌های هیدرومتری و کیفی موجود بود به مدل وارد شد. اطلاعات این ایستگاه‌ها و مرز بالادست (تاکام) در جدول (۱) آمده است. اطلاعات مقاطع رودخانه در بخش هیدرولیکی مدل مورد نیاز می‌باشد. محدوده‌ی مورد بررسی برابر ۵۳ کیلومتر می‌باشد. براساس جدول (۲) اطلاعات مقاطع در ایستگاه‌ها براساس اطلاعات موجود در شرکت آب منطقه‌ای به مدل وارد شد.

تا ژوئن ۲۰۰۹ برای اعتبارسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت نتایج نشان داد که عملکرد مدل Qual2kw برای BOD, DO, TN, TC و برای تمام ایستگاه‌های پایش رضایت‌بخش است. ژانگ و همکاران [۳۸] به‌وسیله مدل QUAL2K پارامترهایی مثل آمونیاک در دریاچه تایهو در چین که مهم‌ترین رودخانه‌ای که به آن می‌ریزد هونگکی است را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی در ارتباط با داده‌های اندازه‌گیری شده خوب برآورد شد. هم‌چنین پیشنهاد دادند تا ابزارهای لازم برای کنترل آلودگی در دراز مدت روی رودخانه نصب شود. کوری و همکاران [۱۸] برای بررسی تاثیر دفع پساب‌ها بر روی رودخانه کارانجا از مدل یک بعدی کیفیت آب رودخانه Qual2kw استفاده نمودند. نمونه‌های آب از این رودخانه به‌صورت ساعتی به مدت دو فصل در نقاط مختلف رودخانه جمع‌آوری شده و کیفیت آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، این مدل توانست روش‌های مختلفی را برای تصفیه آب رودخانه ارائه دهد. پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی توان خودپالایی رودخانه تجن و تعیین میزان غلظت آلاینده‌های آب رودخانه انجام شد. کاهش آلودگی رودخانه، افزایش آلودگی‌ها، افزایش استفاده از سموم کشاورزی در حاشیه رودخانه به‌خصوص در کشت دوم، وضعیت کیفی و زیستی رودخانه را به مخاطره افکنده است که در چند سال اخیر این مشکلات به‌وفور به چشم می‌خورد. لذا با توجه به نقش بسیار مهم رودخانه تجن در آبیاری کشاورزی و زیستگاه ماهیان مانند کپور و غیره، دانستن وضع کیفی آب این رودخانه امری ضروری است تا بتوان با تصمیم درست از این مشکلات جلوگیری به عمل آورد. این رودخانه به‌دلیل اهمیت بالای آن در تامین آب شرب و کشاورزی شهر ساری و در عین حال کمبود آب این رودخانه با وجود گسترش منابع آلاینده از جمله استفاده بی‌رویه کشاورزان از سموم و کودهای زراعی و باغی، ورود پساب‌های صنعتی و شهری به‌عنوان موضوع پژوهش انتخاب شد.



شکل ۱: موقعیت ایستگاه‌های اندازه‌گیری مستقر در طول رودخانه تجن

جدول ۱: غلظت پارامترهای کیفی در ایستگاه‌های اندازه‌گیری

نام ایستگاه	L (km)	pH	EC (µmhos/cm)	NO ₃ ⁻ (mgN/l)	PO ₄ ³⁻ (mgP/l)	CBOD ₅ (mg/l)	DO (mg/l)
ریگ چشمه (تاکام)	۰	۷/۸۲	۵۹۲	۵۹۵	۱۴۰/۵	۶۷/۵	۲۰/۲
پل تجن	۲۶	۸/۱۰	۵۹۵	۲۱۷	۹۱	۵۵/۵	۶/۸
کردخیل (آبمال)	۵۳	۷/۸۹	۷۲۲	۲۷۱	۴۵/۶	۶۱/۵	۹/۳

جدول ۲: اطلاعات مقاطع رودخانه تجن در ایستگاه‌های اندازه‌گیری

نام ایستگاه	مساحت (m ²)	محیط ترشده (m)	ضریب زبری	سرعت (m/s)	دبی (m ³ /s)
ریگ چشمه (تاکام)	۵/۳	۲۸/۴۸	۰/۰۴۵	۰/۶۹	۳/۲۲
پل تجن	۴/۶۵	۱۰/۵۱	۰/۰۵	۰/۹	۴/۵۶
کردخیل (آبمال)	۳۷/۷۷	۷۲/۰۷	۰/۰۵۵	۰/۱۸	۵/۹۸

جدول ۳: مقادیر غلظت منابع آلاینده

نوع فعالیت واحد	COD (mg/l)	میانگین پارامترهای شاخص آلودگی
		فیزیکی میکروبی
سلولزی	۱۱۲	T.COLIFORM=۱۰۰/۵۵۲ml Color=۱۳۷NTU
شیمیایی	۷۵۹	T.COLIFORM=۱۰۰/۱۲۴۷ml Color=۲۶۸NTU
معدنی (شن و ماسه)	-	TURBIDITY= ۴۰۰۰pcu TSS=۴۱۲۶mg/l
کشتارگاه دام	۳۳	T.COLIFORM=۱۰۰/۳۵۰ml Color=۱۶۳ NTU
کشتارگاه طیور	۲۵	T.COLIFORM=۱۰۰/۹۳ml Color=۱۱۷ NTU
شهرک صنعتی	۲۶۷	T.COLIFORM=۱۰۰/۲۴۰۰ml Color=۳۳۳NTU
لبنی	۲۷	T.COLIFORM=۱۰۰/۶۴ml PH=۸/۶۳

منابع آلاینده ورودی

کاربری غالب حوضه تجن، عرصه‌های جنگلی است ولی زمین‌های حاشیه رودخانه تجن در محدوده مورد مطالعه به‌طور عمده به شالیکاری اختصاص دارد. این مزارع به‌خصوص در دو طرف رودخانه، تمام کاربری را به خود اختصاص می‌دهد. به‌دلیل این‌که برنج یک گیاه غرقاب بوده و شالیزارها در طول فصل کشت همیشه دارای حجم مناسبی از آب است، دو عامل رواناب و زه‌آب مزارع نقش اصلی را در آلودگی رودخانه تجن دارد. ورودی‌هایی که به‌صورت نقطه‌ای هستند از جمله پساب‌های کارخانه‌ها، فاضلاب صنعتی و شهری در جدول (۳) به‌صورت اختصار آورده شده است.

معرفی مدل Qual2kw

اولین نسخه از سری مدل‌های QUAL با نام QUAL-1 در اواخر سال ۱۹۶۰ توسط سازمان تحقیقات آب تگزاس ارائه شد. پس از آن سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا مدل را اصلاح و با نام QUAL

2 ارائه کرد. مدل QUAL2E در سال ۱۹۸۷ توسط براون و برنل ارائه گردید. این مدل یک مدل جامع کیفیت آب برای رودخانه‌ها می‌باشد که توانایی شبیه‌سازی ۱۵ پارامتر کیفی در رودخانه‌ها را داراست. نسخه بعدی این مدل UNCAS-QUAL2E می‌باشد که اجازه استفاده از سه نوع آنالیز عدم اطمینان را می‌دهد. مدل کیفی QUAL2K در حقیقت نسخه پیشرفته مدل QUAL2E می‌باشد که در سال ۲۰۰۰ توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا تهیه شده است. این نرم‌افزار در محیط نرم‌افزار Excel به‌عنوان رابط گرافیکی برای وارد کردن داده‌ها و مشاهده خروجی برنامه استفاده شده است. مدل Qual2kw نسخه توسعه یافته از مدل QUAL2K است این مدل کیفیت آب‌های سطحی که توسط پلتر و چپرا در سال ۲۰۰۶ توسعه یافته است، رودخانه را به‌صورت یک بعدی همراه با جریان دائمی غیریکنواخت، شبیه‌سازی می‌کند و می‌تواند اثر بارگذاری را هم به‌صورت نقطه‌ای و هم به‌صورت غیرنقطه‌ای در نظر بگیرد. این

(ایستگاه‌ها) و RMSE(CV) ضریب تغییرات مجذور میانگین مربعات خطا می‌باشد [۳].

واسنجی مدل Qual2kw

مدل Qual2kw این قابلیت را دارد تا به صورت خودکار پارامترهای سینتیکی انتخاب شده را واسنجی کند. در واسنجی خودکار، یک تابع آماری برای متغیر حالت به صورت عددی با میانگین وزنی نرمال RMSE ارزیابی می‌کند.

$$f(x) = [\sum_{i=1}^q w_i] [\sum_{i=1}^q \frac{1}{w_i} \left[\frac{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m o_{i,j}}{[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (p_{i,j} - o_{i,j})^2]^{\frac{1}{2}}} \right]^2] \quad (5)$$

که $O_{i,j}$ = مقدار مشاهده شده، $P_{i,j}$ = مقدار پیش‌بینی شده، m تعداد مقادیر پیش‌بینی شده و مشاهده شده، W_i = فاکتور وزن، و q = تعداد متغیرهای حالت مختلف در یک فضای n بعدی محدود هستند. این ابزار اجازه می‌دهد تا ضریب تغییرات RMSE برای هر جزء (نتایج مدل در مقابل داده‌های مشاهده شده)، فاکتورهای وزنی فردی، در یک مقدار واحد خلاصه شود که الگوریتم ژنتیک به دنبال حدکثرسازی با تنظیم کردن همه پارامترهای مورد نظر است [۱۲ و ۱۸]. مدل Qual2kw که علاوه بر امکان‌سنجی دستی قابلیت مهم واسنجی خودکار را هم دارا می‌باشد، به‌عنوان نرم‌افزار شبیه‌ساز انتخاب و داده‌های موردنیاز مدل از سازمان‌های ذیربط دریافت و وارد مدل شد. سپس واسنجی مدل طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۴ و صحت‌سنجی مدل برای ماه‌های شهریور و آذر و بهمن سال ۱۳۹۵ صورت گرفت. در نهایت خروجی مدل شبیه‌سازی کیفی آب به صورت فصل پرآب و کم‌آب مورد بحث و تجزیه تحلیل قرار گرفت.

نتایج و بحث

مسیر رودخانه‌ی تجن به دو بازه تقسیم شد و براساس داده‌ها و اطلاعات موجود، مدل Qual2kw اجرا شد. این مدل جریان را به‌صورت یک بعدی و در طول جریان رودخانه شبیه‌سازی می‌کند. در هر بازه فرض بر آن است که شرایط جریان، مقطع و هواشناسی از ابتدا تا انتهای بازه ثابت بماند. در صورتی که در شرایط واقعی، این مقادیر کاملاً متغیر بوده و تغییرات ناگهانی در مقطع و شیب کف در طول مسیر رودخانه متصور می‌باشد. هم‌چنین ورود منابع غیرنقطه‌ای ناشناخته از یک سو و نبود اطلاعات کافی از منابع نقطه‌ای ورودی و خروجی به رودخانه از سوی دیگر، از دلایل ایجاد اختلاف بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده توسط مدل می‌باشد. نتایج حاصله از شبیه‌سازی کیفی رودخانه تجن در سال آبی ۱۳۹۵، برای سه ماه شهریور، آذر و بهمن (صحت‌سنجی) انجام شد. قبل از ارائه نتایج و تحلیل آن، باید درک درستی از حد مجاز آلاینده‌ها و کیفیت آب رودخانه‌ها و جئد داشته باشد.

از روش‌های سنجش درجه آلودگی آب، شاخص‌های کیفیت

مدل قادر است تا ۱۹ متغیر کیفی آب را شبیه‌سازی کند و به‌منظور تعیین غلظت پارامترهای کیفی، به‌حل عددی معادله جابه‌جایی-پخش در رودخانه می‌پردازد. ویرایش 5.1 این مدل برای واسنجی خودکار، از یک الگوریتم ژنتیک ویژه استفاده می‌کند. این الگوریتم ژنتیک که PIKAY نام دارد، ترکیبی بهینه از ضرایب و نرخ‌های سینتیک و بیولوژیک را به‌گونه‌ای می‌یابد که مقادیر شبیه‌سازی، بیشترین نزدیکی را با مقادیر مشاهده‌ای داشته باشند. سابقاً واسنجی در مدل QUAL2E و QUAL2K به‌طور دستی انجام می‌گرفت که وقت‌گیر بود [۱۲].

روابط موجود در مدل Qual2kw

به‌منظور شبیه‌سازی کیفی رودخانه از این مدل استفاده شد. به‌طورکلی این مدل، رودخانه را به‌عنوان مجموعه‌ای از نواحی با خصوصیات جغرافیایی و هیدرولیکی یکسان در نظر می‌گیرد [۵]. در طول رودخانه، با فرض اختلاط کامل برای هر المان، موازنه‌ی جریان رودخانه در حالت جریان پایدار طبق رابطه زیر صورت می‌پذیرد.

$$Q_i = Q_{i-1} + Q_{in,i} - Q_{out,i} \quad (1)$$

که در آن: Q_{i-1} = میزان جریان خروجی از بازه‌ی $(i-1)$ ، $Q_{in,i}$ = جریان ورودی از تمامی منابع نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای به بازه‌ی i ، Q_i = میزان جریان خروجی از بازه‌ی i ، $Q_{out,i}$ = جریان خروجی از تمامی منابع به بازه‌ی i می‌باشند. معادله یک بعدی انتقال جرم، جابه‌جایی-انتشار به‌عنوان معادله اساسی و حاکم بر مدل Qual2kw می‌باشد. برای هر پارامتر کیفی (C) این معادله به‌صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i} C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i} C_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i} C_i + \frac{E_{i-1}}{V_i} (C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i} (C_i - C_{i+1}) \quad (2)$$

$$(C_{i-1} - C_i) + \frac{E_i}{V_i} (C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i$$

که در آن: C_i = غلظت پارامتر کیفی در المان i (g/m^3)، V_i = حجم المان i (m^3)، t = زمان (d)، E_i = ضریب انتشار بین المان i و $i-1$ (m^3/d)، Q_i = دبی جریان المان i (m^3/d)، W_i = بارگذاری خارجی پارامتر کیفی به المان i (g/d)، S_i = تولید و مصرف پارامتر کیفی در اثر واکنش‌ها و مکانیسم انتقال جرم در المان i ($g/m^3/d$) می‌باشند (۳). برای ارزیابی شبیه‌سازی مدل از شاخص‌های $RMSE$ و $RMSE(CV)^2$ استفاده شد.

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum(O_i - P_i)^2}}{N} \quad (3)$$

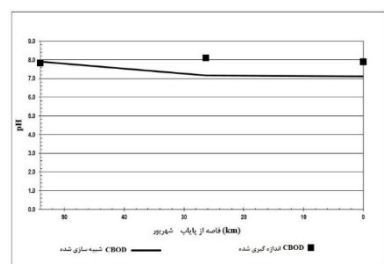
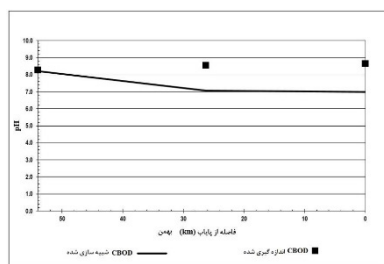
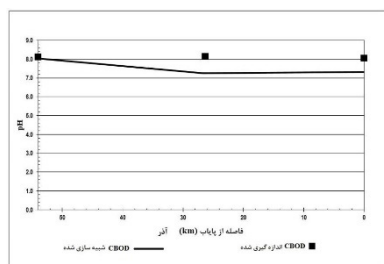
$$RMSE(CV) = \frac{RMSE}{\sum(O_i)/N} \quad (4)$$

که در آن: RMSE مجذور میانگین مربعات خطا، O_i داده‌های واقعی، P_i داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل، N تعداد مشاهدات

1- Root-Mean-Square error

2- Coefficient of variation RMSE

اساس استاندارد محیط‌زیست مقدار مجاز pH برای رودخانه‌ها برابر ۸/۵-۶/۵ می‌باشد. این فاکتور تحت تاثیر عوامل مختلفی نظیر میزان مواد معلق، مواد کلوئیدی، مواد آلی، وجود آنیون‌های هالوژنه و راهیابی رواناب‌های کشاورزی و غیره در آب قرار می‌گیرد. نتایج نشان می‌دهد روند تغییرات غلظت pH در ابتدای مسیر ثابت می‌باشد و این مولفه در ادامه مسیر، روند افزایشی را طی می‌کند. با ورود رودخانه از قسمت کوهستانی به قسمت هموار و دشت، که بیشترین سطح زیر کشت را در مسیر خود دارا می‌باشد، میزان pH رودخانه تجمعات حالت قلیایی دارد به طوری که میزان آن بین ۷/۸۲ تا ۸/۶۵ در نوسان است. بیشترین میزان pH از ایستگاه ریگ‌چشمه (تاکام) در بالادست در ماه بهمن و کمترین مقدار آن از ایستگاه کردخیل (آبمال) در شهریور اندازه‌گیری شد این نشان می‌دهد کارگاه‌های صنعتی که در حاشیه رودخانه وجود دارد پساب‌های صنعتی اسیدی به رودخانه رها می‌کنند اما این مقدار اندک می‌باشد. این نتایج با سایر مطالعات توسط محققان از جمله حسینی و همکاران [۱۳] و هاشمی و همکاران [۱۲] مطابقت دارد.



شکل ۲: روند تغییرات pH در سه ماه شهریور بهمن و آذر

شبه‌سازی نیترات

نمودارهای مربوط به شبه‌سازی پارامتر نیترات در شکل (۳) ارائه شد. جهت بررسی منابع آلوده‌کننده با منشا مواد آلی که غالباً در فاضلاب‌های شهری دیده می‌شود، از سنجش میزان نیترات، نیتريت

آب می‌باشد. در این شاخص‌ها، داده‌های چندین پارامتر کیفی در یک فرمول ریاضی که با یک عدد میزان سلامتی آب را نشان می‌دهد، شرکت داده می‌شوند. در حال حاضر در کشور ایران فقط استاندارد تخلیه فاضلاب وجود دارد و در موارد دیگر از توصیه‌های سازمان‌های معتبری چون سازمان بهداشت جهانی (WHO¹) و سازمان محیط زیست آمریکا (EPA²) استفاده می‌گردد. در جدول (۴) غلظت‌های پیشنهادی متغیرهای کیفی مختلف آب رودخانه‌ها در چهار گروه مختلف آورده شده است. در این دسته‌بندی، گروه ۱ نشانگر کیفیت مناسب آبی است که برای کلیه کاربردهای عمومی مناسب می‌باشد و گروه ۴ بدترین کیفیت آب را نشان می‌دهد. با توجه به شرایط اقلیمی و اقتصادی ایران، می‌توان کیفیت آب گروه ۲ را برای اغلب رودخانه‌ها پیشنهاد کرد [۱۵].

جدول ۴: نمونه‌ای از توصیه موجود برای کیفیت آب رودخانه‌ها

گروه‌های مختلف				واحد سنجش	
۱A	۱B	۲	۳	۴	
≤۲۰	۲۲-۲۰	۲۲-۲۵	۳۰-۲۵	>۳۰	درجه حرارت C
۸,۵-۶,۵	۸,۵-۶,۵	۸,۵-۶,۵	۹,۵-۵,۵	<۵,۵	mg/l PH
>۷	۷-۵	۵-۳		>۹,۵	mg/l DO
≤۳	۵-۳	۱۰-۵	۲۵-۱۰	<۳	mg/l BOD _u
≤۲۰	۲۵-۲۰	۴۰-۲۴	۸۰-۴۰	<۲۵	mg/l COD
	<۲۵۰			>۸۰	mg/l SO ₄ ²⁻
≤۰,۱	۰,۵-۰,۱	۲-۰,۵	۸-۲	>۲۵۰	mg/l NH ₄ ⁺
	≤۴۴		۱۰۰-۴۴	>۱۰۰	mg/l NO ₃ ⁻
≤۰,۰۱		-۰,۰۵	۰,۵-۰,۰۵	>۰,۵	mg/l فنل
≤۰,۴	۰,۷-۰,۴		>۰,۷		mg/l ارتوفسفات
≤۰,۲		۰,۵-۰,۲		>۰,۵	mg/l دترجنت
	≤۰,۰۵			>۰,۵	mg/l CN
	≤۰,۰۵			>۰,۰۵	mg/l Cr
≤۰,۷	۱,۷-۰,۷			>۰,۰۵	mg/l F
	≤۰,۰۵			>۱,۷	mg/l Pb
	≤۰,۰۱			>۰,۰۱	mg/l Se
≤۰,۰۵		۱-۰,۰۵		>۱	mg/l Cu
≤۳	۵-۳			>۵	mg/l Zn
≤۰,۰۵		۰,۱-۰,۰۵		>۰,۱	mg/l As
≤۰,۵	۱-۰,۵	۱,۵-۱		>۱,۵	mg/l Fe
≤۰,۲۵	۰,۲۵-۰,۱	۰,۵-۰,۲۵		>۰,۵	mg/l Mn
	≤۰,۰۰۵			>۰,۰۰۵	mg/l Cd
≤۰,۴	۰,۷۵-۰,۴	۱,۵-۰,۷۵	۳-۱,۵	>۳	msi/cm EC
≤۱۰۰	۲۰۰-۱۰۰	۴۰۰-۲۰۰	۱۰۰۰-۴۰۰	>۱۰۰۰	mg/l Cl ⁻

شبه‌سازی pH

شکل (۲) به ترتیب روند تغییرات مقدار pH را در طول مسیر مورد مطالعه طی ماه‌های شهریور، آذر و بهمن نشان می‌دهد. بر

1- World Health Organization

2- Environmental Protection Agency

رودخانه می‌باشد، بیشتر است. در ایستگاه انتهایی، افزایش مقدار EC اندازه‌گیری شده به سبب تاثیر نزدیکی مناطق کشاورزی و شست‌وشوی زمین‌های آن در این منطقه می‌باشد. نوشادی و حاتمی‌زاده [۲۷] در شبیه‌سازی رودخانه کر در ماه‌های دی و مرداد و حسینی و همکاران [۱۳] در ماه دی نیز به نتایج مشابهی دست یافتند و بیان نمودند که آلودگی‌های ناشی از رواناب به‌عنوان یک منبع غیر متمرکز آلودگی هستند و مدل‌ها به سختی می‌توانند آن را پیش‌بینی کنند.

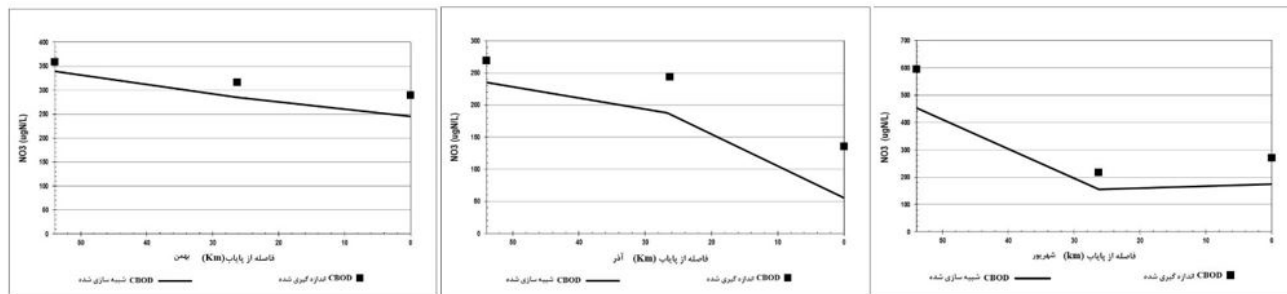
شبیه‌سازی اکسیژن محلول

شکل (۵) تغییرات اکسیژن محلول آب رودخانه تجن را در بازه مطالعاتی در ماه‌های شهریور، آذر و بهمن نشان می‌دهد. میزان اکسیژن محلول آب رودخانه در تمامی ایستگاه‌ها و تمامی ماه‌های سال در حد استاندارد (بالتر از ۵ میلی‌گرم بر لیتر) می‌باشد که کمترین و بیشترین مقدار به ترتیب ۶/۵ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه ریگ‌چشمه (تاکام) در ماه بهمن و ۲۰/۲ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه کردخیل در شهریور ماه اندازه‌گیری شد. مقایسه اندازه‌گیری‌های انجام شده با داده‌های شبیه‌سازی شده، نشان از پیش‌بینی قابل قبول روند تغییرات غلظت DO در طول رودخانه از بالادست به پایین‌دست دارد. در ماه شهریور روند تغییرات اکسیژن محلول آب از بالادست به سمت پایین‌دست افزایش داشته که ناشی از افزایش جریان آب در پایان فصل کشاورزی و برداشت کمتر آب در طول رودخانه در این ماه می‌باشد. می‌توان گفت از لحاظ کمی، غلظت DO در ماه‌های شهریور، آذر و بهمن تفاوت چندانی ندارد. دبی و سرعت جریان آب و باد در شهریور ماه از یک سو و بارش زیاد در

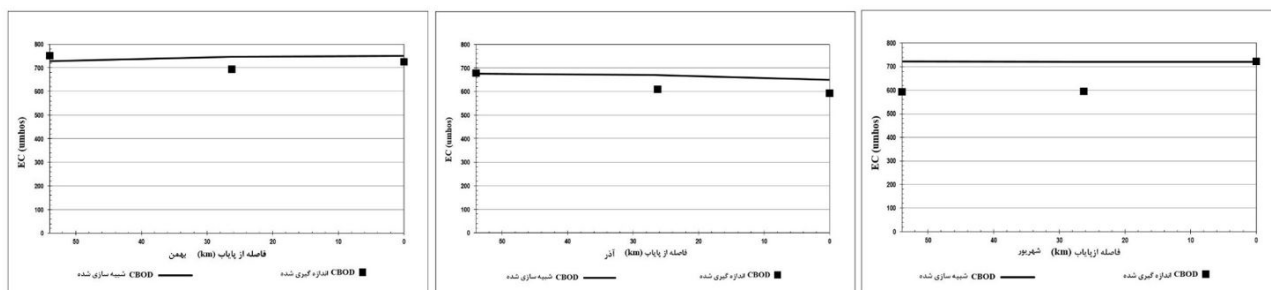
و آمونیاک موجود در نمونه‌های آب کمک گرفته می‌شود. وجود نیترات در آب نشان می‌دهد که مدت زمان زیادی از بروز آلودگی آب گذشته است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود روند تغییرات غلظت NO_3^- در طول رودخانه از بالادست به پایین‌دست افزایش می‌یابد. در ماه آذر داده‌های اندازه‌گیری شده بیشتر از میزان شبیه‌سازی شده می‌باشد که می‌تواند ناشی از ورود منابع آلاینده غیرنقطه‌ای مانند پساب‌های کشاورزی به رودخانه باشد. بیشترین مقدار اندازه‌گیری شده نیترات ۱۳/۱ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه کردخیل در ماه شهریور و کمترین مقدار آن ۰/۶ میلی‌گرم بر لیتر برحسب نیتروژن در ایستگاه ریگ‌چشمه در آذر ماه می‌باشد. مقایسه نتایج اندازه‌گیری شده با استانداردهای نیترات در رودخانه تجن نشان داد که تنها در ایستگاه پل تجن در ماه شهریور و ایستگاه ریگ‌چشمه در ماه آذر در حد مطلوب استاندارد خود قرار دارد. روند افزایشی نمودارهای شبیه‌سازی شده می‌تواند به علت تاثیرپذیری غلظت نیترات رودخانه از ورود پساب‌های صنعتی از جمله کارگاه کشتارگاه دام و طیور، کارگاه‌های بلوک زنی و شرکت صنایع چوب و کاغذ و شهری در خروجی شهرستان ساری باشد. هم‌چنین با نگاه به شکل (۳) در ماه‌های شهریور و آذر و بهمن نیترات از ایستگاه بالا به سمت ایستگاه پایین‌دست روند افزایشی دارد که با نتایج پژوهش سلونگ و هلفریک [۳۱] و شکری و همکاران [۳۴] تطابق دارد.

شبیه‌سازی هدایت الکتریکی

شکل (۴) به ترتیب روند تغییرات مقدار EC در طول مسیر در ماه‌های شهریور، آذر و بهمن را نشان می‌دهد. در ماه‌های سرد سال اگرچه میزان تبخیر و اثر کاهش حجم دبی کمتر است اما اثر منابع غیرنقطه‌ای که حاصل شست‌وشوی زمین‌های اطراف



شکل ۳: روند تغییرات غلظت نیترات NO_3^- در شهریور، آذر و بهمن ماه



شکل ۴: روند تغییرات غلظت نیترات EC در شهریور، آذر و بهمن ماه

پایین دست روندی تقریباً ثابت دارد. از عوامل موثر در ایجاد اختلاف می‌تواند ناشی از تفاوت شرایط واقعی مانند میزان دمای آب، میزان دبی رودخانه و شرایط تعریف شده در مدل (ثابت در نظر گرفتن این مقادیر از ابتدا تا انتهای بازه) باشد. همچنین ورود منابع ناشناخته آلاینده به رودخانه هم در ایجاد این اختلاف موثر می‌باشد.

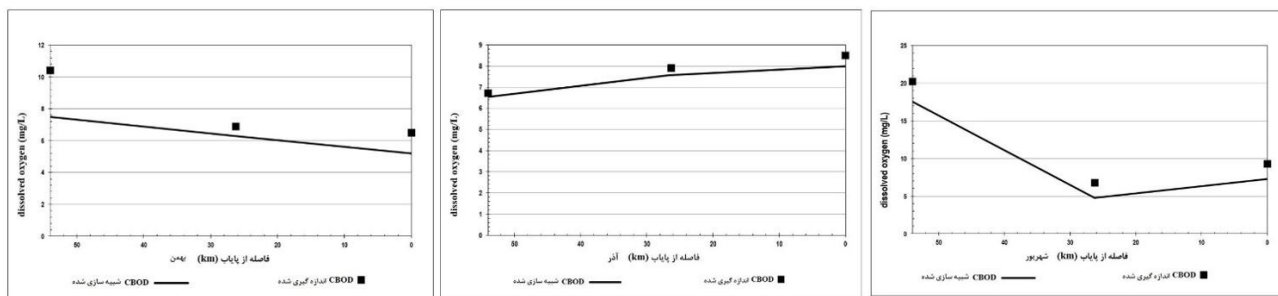
شبیه‌سازی فسفات کل

با توجه به نمودارهای شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه‌های نمونه‌برداری در طی سه ماه، تغییرات غلظت PO_4^{3-} از ایستگاه ریگ‌چشمه (تاکام) تا کردخیل (آبمال) روندی افزایشی را نشان می‌دهد (شکل ۷). با ورود رواناب‌های حاوی کود و سم به داخل رودخانه، کیفیت فیزیکی و شیمیایی رودخانه تغییر می‌کند. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان داد که غلظت فسفر محلول در حداکثر مقدار خود به $0/74$ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه کردخیل در ماه شهریور و حداقل آن به $0/06$ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه تاجن در بهمن ماه می‌رسد که با مطالعه عباس‌پور و همکاران [۱] مطابقت دارد. لذا به نظر می‌رسد با شروع کشت دوم در مرداد ماه و افزایش بیش از اندازه کود و سم نسبت به کشت اول جهت برداشت محصول بهتر و افزایش توان گیاه برنج، مقدار فسفر محلول میزان حداکثری خود را در ماه شهریور نشان دهد. سطح بحرانی فسفر برای شکوفایی جلبکی حدود $0/05$ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط رشد تابستانی است [۳۷]. افزایش جلبک در پیکره‌های آبی باعث افزایش مواد آلی اکسیژن‌خواه شده و در نهایت باعث کاهش مطلوبیت زیستگاهی برای موجودات زنده به‌خصوص ماهی‌ها می‌شود [۳].

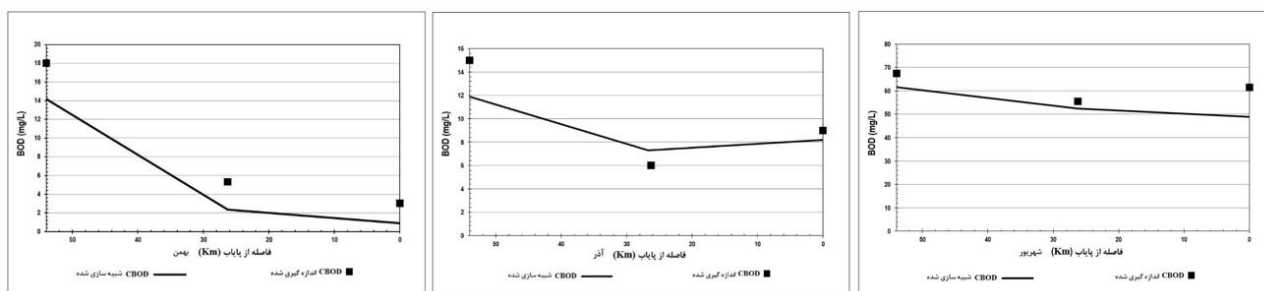
ماه‌های پر آب که باعث افزایش جریان آب و افزایش اکسیژن در آب می‌شود، از دلایل موثر بر این امر می‌باشد. غلظت اکسیژن محلول در آب برای ماهی‌ها و سایر آبزیان بسیار مهم است. ماهی‌ها حداقل به ۵ تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر اکسیژن برای رشد و تولید مثل نیاز دارند. اگر مقدار اکسیژن به ۳ تا ۴ میلی‌گرم بر لیتر برسد، تغذیه ماهی‌ها متوقف می‌شود و اگر این مقدار به یک میلی‌گرم بر لیتر کاهش پیدا کند ماهی‌ها خواهند مرد [۳۷].

شبیه‌سازی اکسیژن خواهی بیولوژیکی

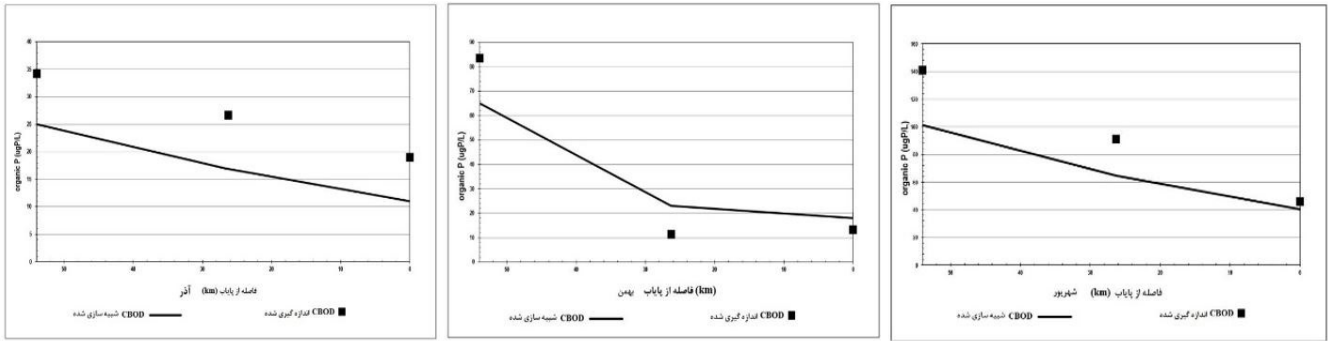
نمودارهای شبیه‌سازی غلظت CBOD در شکل (۶) برای ماه‌های شهریور، آذر و بهمن نشان داده شده است. اکسیژن موردنیاز بیوشیمیایی در بیشترین مقدار خود ۴۵ میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه کردخیل در ماه شهریور اندازه‌گیری شد. همچنین کمترین مقدار اندازه‌گیری برای این متغیر به میزان ۲ میلی‌گرم در همان ایستگاه در ماه بهمن بود. طبق شکل ۶ شهریور ماه بحرانی‌تر از سایر ماه‌ها است. زیرا پساب‌های آزاد شده از واحدهای صنعتی، باعث افزایش این پارامتر به مقدار خطرناک می‌شود. در ماه شهریور مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل در ایستگاه ابتدایی کمتر از واقعیت برآورد گردیده است. اما تا حدودی هم‌خوانی بین مقادیر پیش‌بینی شده مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده دیده می‌شود. نتایج این پژوهش با نتایج حسینی و همکاران [۱۳] همخوانی دارد. آن‌ها با بررسی کیفی رودخانه کارون با مدل Qual2kw نشان دادند که انطباق مناسب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی وجود دارد و حکایت از شبیه‌سازی مناسب این مدل در پارامتر CBOD در ماه‌های موردنظر رودخانه می‌باشد. نمودار CBOD در هر سه ماه با حرکت به سمت



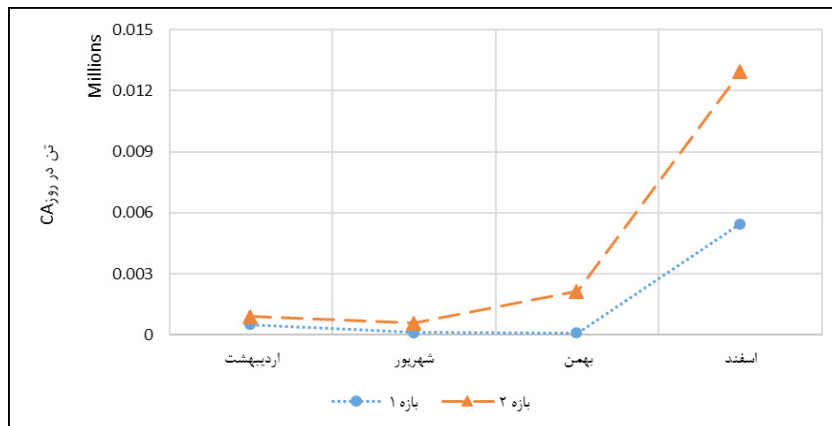
شکل ۵: روند تغییرات غلظت اکسیژن محلول در شهریور، آذر و بهمن ماه



شکل ۶: روند تغییرات غلظت BOD در شهریور، آذر و بهمن ماه



شکل ۷: روند تغییرات غلظت فسفات کل در شهرپور، آذر و بهمن ماه



شکل ۸: توانایی خودپالایی آلاینده‌ها توسط رودخانه تجن

جدول ۵: ضریب انتشار مولکولی و ضریب هوادهی رودخانه تجن در ایستگاه‌های نمونه‌برداری

ماه	شماره بازه	$D_{LT}(m^2 \cdot day^{-1})$	$K_2 (day^{-1})$
اردبیهشت	۱	۰/۰۰۰۱۶۴	۲۳/۱۰۶۰۹
	۲	۰/۰۰۰۱۵۲	۲۸/۰۹۴۵۳
شهرپور	۱	۰/۰۰۰۱۸۹	۱۷/۲۸۸۷۵
	۲	۰/۰۰۰۲۱۱	۴۲/۷۱۲۰۶
بهمن	۱	۰/۰۰۰۱۱۸	۱۳/۸۷۴۱۷
	۲	۰/۰۰۰۱۲۷	۴۹/۱۲۵۹۱
اسفند	۱	۰/۰۰۰۱۲۷	۵۰۶/۲۴۷۳
	۲	۰/۰۰۰۱۳۶	۱۰۸/۰۶۷۶

اکسیژن محلول، این نتیجه حاصل می‌شود که رودخانه تجن توانایی خودپالایی دارد که این امر می‌تواند باعث از بین رفتن بسیاری از آلاینده‌ها شود.

شاخص‌های ارزیابی

شاخص‌های ارزیابی، توانایی مدل را در شبیه‌سازی کیفی آب طی فرایند واسنجی و صحت‌سنجی نشان می‌دهند. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل Qual2kw طی فرایند شبیه‌سازی رودخانه تجن RMSE، CV (RMSE)، در مورد پارامترهای کیفی pH، EC، DO، $CBOD_5$ ، NO_3^- ، PO_4^{3-} در سه ماه شهرپور، آذر و بهمن در جدول‌های (۶)، (۷) و (۸) ارائه شده است. در این بین، مدل بهترین شبیه‌سازی را در ماه آذر انجام داده است.

خودپالایی رودخانه تجن

به‌منظور تعیین توانایی خودپالایی رودخانه تجن، ابتدا پارامترهای ضریب انتشار مولکولی و ضریب هوادهی طبق جدول (۵) محاسبه شدند. نتایج نشان داد که با رسیدن به انتهای رودخانه، توانایی خودپالایی رودخانه تجن افزایش یافت. با توجه به شکل (۸) نمودار (بازه دوم (حد فاصل پل تجن و کردخیل) بالاتر از نمودار بازه اول (حد فاصل بین ریگ چشمه و پل تجن) قرار دارد. بیشترین قدرت خودپالایی رودخانه تجن در ماه اسفند در هر دو بازه و کمترین قدرت خود پالایی در ماه شهرپور در هر دو بازه اتفاق افتاد. قدرت خودپالایی رودخانه تجن در هر دو بازه، از ماه اردبیهشت تا ماه اسفند دارای روند افزایشی بود. با بررسی توان خودپالایی براساس

جدول ۶: شاخص‌های ارزیابی در شهریور ماه

DO (mg/l)		BOD (mg/l)		PO ₄ ³⁻ (mgP/l)		NO ₃ ⁻ (mgN/l)		EC (μmhos/cm)		pH		نام ایستگاه
P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	
۷/۳	۹/۳	۴۸/۸۳	۶۱/۵	۴۰/۳۲	۴۵/۶	۱۷۴/۴۷	۲۷۱	۷۲۱/۳۳	۷۲۲	۷/۱۲	۷/۸۹	ریگ چشمه (تاکام)
۴/۸	۶/۸	۵۲/۳۸	۵۵/۵	۶۴/۶۶	۹۱/۱	۱۵۴/۴۶	۲۱۷	۷۲۱/۹۱	۵۹۵	۷/۱۶	۸/۱	پل تجن
۱۷/۵	۲۰/۲	۶۱/۵	۶۷/۵	۱۰۱/۳	۱۴۰/۵	۴۵۳	۵۹۵	۷۲۲	۵۹۲	۷/۸۹	۷/۸۲	کردخیل (آبمال)
۲/۲		۸/۲۹		۲۷/۴۶		۱۰۵/۵		۱۰۴/۸۹		۰/۹۴		RMSE
۰/۲		۰/۱۴		۰/۲۷		۰/۲۹		۰/۱۵		۰/۱۲		CV(RMSC)

جدول ۷: شاخص‌های ارزیابی در آذرماه

DO (mg/l)		BOD (mg/l)		PO ₄ ³⁻ (mgP/l)		NO ₃ ⁻ (mgN/l)		EC (μmhos/cm)		pH		نام ایستگاه
P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	
۸	۸/۵	۱۱/۸۷	۱۵	۱۱	۱۹	۵۵	۱۳۵/۵	۶۴۹/۹۴	۵۹۳	۷/۳۲	۸/۰۴	ریگ چشمه (تاکام)
۲/۱۴	۷/۹	۷/۳	۶	۱۷	۲۴/۵	۱۸۷/۵	۲۴۳/۹	۶۷۰/۸۸	۶۱۰	۷/۲۴	۸/۱۴	پل تجن
۶/۵۴	۶/۷	۸/۲	۹	۲۵	۳۴/۲	۲۳۵	۲۶۸/۷	۶۷۵/۸۸	۶۷۹	۸/۰۴	۸/۱۲	کردخیل (آبمال)
۰/۳۶		۲/۰۱		۸/۹		۵۹/۹۹		۴۸/۱۷		۰/۵۲		RMSE
۰/۰۴۷		۰/۲۱		۰/۳۴		۰/۲۵		۰/۰۷۴		۰/۰۶		CV(RMSC)

جدول ۸: شاخص‌های ارزیابی در بهمن ماه

DO (mg/l)		BOD (mg/l)		PO ₄ ³⁻ (mgP/l)		NO ₃ ⁻ (mgN/l)		EC (μmhos/cm)		pH		نام ایستگاه
P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	P _i	O _i	
۵/۲	۶/۵	۰/۹	۳	۱۸	۱۳/۳	۲۴۵	۲۸۹	۷۵۰/۸۲	۷۲۵	۶/۹۸	۸/۶۵	ریگ چشمه (تاکام)
۶/۳	۶/۹	۲/۳۶	۵/۳	۲۳	۱۱/۴	۲۸۵	۳۱۶	۷۴۷/۱۵	۶۹۳	۷/۰۷	۸/۵۳	پل تجن
۷/۵	۱۰/۴	۱۴/۱۷	۱۸	۶۵	۸۳/۵	۳۳۹	۳۵۹	۷۲۸/۵۲	۷۵۲	۷/۲	۸/۲۸	کردخیل (آبمال)
۱/۸۶		۳/۰۴		۱۲/۸۹		۳۳/۱۵		۳۷/۱۹		۱/۴۶		RMSE
۰/۲		۰/۴۱		۰/۲۸		۰/۱۰		۰/۰۵		۰/۱۸		CV(RMSC)

نتیجه‌گیری

توانایی کمتری برای حذف BOD و COD داشته است. حداکثر توان خودپالایی مربوط حد فاصل پل تجن و کردخیل به میزان ۷۴۸۵/۳۴۶ تن در روز و حداقل آن مربوط حد فاصل بین ریگ چشمه و پل تجن ۱۰۲/۶۸۰۵ تن در روز می‌باشد. این روند نشان می‌دهد که توان خودپالایی رودخانه از بالادست به سمت پایین دست، بیشتر می‌شود. رودخانه‌ها در مسیرهای گاه طولانی خود دچار تغییر و تحولات بسیاری می‌شوند و نیز تا حدی توانایی خودپالایی دارند که این امر می‌تواند باعث از بین رفتن بسیاری از آلاینده‌ها شود. بنابراین باید اقداماتی نظیر افزایش حق آبه صورت گیرد که این توانایی خودپالایی از بین نرفته و بلکه افزایش یابد که این مهم جز با حفظ و نگهداری این منبع ارزشمند و جلوگیری از آلودگی آن (به‌خصوص با پساب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های خانگی و صنعتی) امکان‌پذیر نیست. یافته‌ها نشان داد، علی‌رغم وجود منابع آلاینده نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای در مسیر رودخانه تجن مطابق توصیه‌های موجود، عامل محدودکننده در تامین آب شرب و کشاورزی در پایین دست وجود

روند تغییرات pH آب در ایستگاه‌های نمونه برداری شده نشان داد که در تابستان کمترین مقدار و به دلیل افزایش دما و در زمستان بیشترین مقدار می‌باشد. در کل مسیر رودخانه به سمت پایین دست، مقدار EC روند افزایشی دارد. بیشترین مقدار در تابستان ایستگاه کردخیل که به دلیل وارد شدن آلاینده زمین‌های کشاورزی و پساب‌های آن می‌باشد و کمترین مقدار آن در زمستان ایستگاه سلیمان تنگه مشاهده شد. درصد خودپالایی رودخانه تجن برای پارامتر BOD و COD در بازه اول (بین ایستگاه ریگ چشمه و پل تجن) از ماه اردیبهشت، شهریور و بهمن سیر نزولی داشته است. در طول مسیر رودخانه در ماه‌های اردیبهشت و اسفند، درصد خودپالایی افزایش یافته است. در مسیر بازه اول و دوم وجود فاضلاب‌های خانگی نشأت گرفته از روستاهای کنار رودخانه تجن و شهرستان ساری منجر به کاهش درصد خودپالایی در ماه‌های شهریور و بهمن شده است. لذا در حالت کلی به نظر می‌رسد که رودخانه تجن

10. Fakouri Dekahi, B., Mazaheri, M., and Mohammad vali Samani, J. 2018. Evaluation of Karun River Water Salinity Reduction Strategies Using Management Scenarios. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*. 5(2): 1-10. (In Persian)

11. Golshan, M., Dastoorpour, M., and Birgani, Y.T. 2020. Fuzzy environmental monitoring for the quality assessment: Detailed feasibility study for the Karun River basin, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*. 10: 100324.

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

13. Hossieni, P., Ildoromi, A., and Hosseini, Y. 2016. The Study of Qual2kw Model Efficacy on River Self-purification (A Case Study of Karun River at Interval of Zargan to Kute Amir). *Journal of Environmental Science and Technology*. 18(4): 103-122. (In Persian)

14. Jahin, H. S., Abuzaid, A. S., and Abdellatif, A. D. 2020. Using multivariate analysis to develop irrigation water quality index for surface water in Kafr El-Sheikh Governorate, Egypt. *Environmental Technology & Innovation*. 17: 100532.

15. Karamouz, M., and Kerachian, R. (2018). Planning and quality management of water resources systems. Seventh Edition. Amirkabir University of Technology Publications, Tehran, 400 pp. (In Persian)

16. Khodam Mohammadi, M.M., and Boustani, F. 2016. Evaluation of Self-Purification Potency and the Role of Dissolved Oxygen in the Kor River Water Quality (Case study: Downstream of Doroodzan Dam to Tashk-Bakhtegan Lake). *Water Resources Engineering*. 9(30): 87-96. (In Persian)

17. Khoob, N., Aminnejad, B., and Omidi, A. 2017. Water Quality Monitoring for an Assessment of Salt Contribution of Four of the QzlOuzan's Tributaries for its Contamination Using QUAL2K Numerical Model. *Water Resources Engineering*. 10(32): 33-44. (In Persian)

18. Kori, B. B., Shashidhar, T., and Mise, S. 2013. Application of automated QUAL2Kw for water quality modelling in the river Karanja, India. *Global Journal of Bio-Science and Biotechnology* 2(2): 193-203.

19. Matta, G., Srivastava, S., Pandey, R.R., and Saini, K.K. 2017. Assessment of physicochemical characteristics

ندارد. برای ادامه پژوهش پیشنهاد می‌شود فاضلاب روستاهای موجود در طول مسیر و فاضلاب‌های کارگاه‌های پرورش ماهی و زهکش‌های کشاورزی، پساب‌ها مورد بررسی قرار گیرد.

منابع

1. Abbaspour, M., Javid, A., and Habibi, A. 2014. Determination of Physical & Chemical Properties of Water of Khersan River & Investigation on Its Yearly Changes. *Journal of Environmental Science and Technology*. 15(4): 1-11. (In Persian)

2. Abdolkhani, A., Nikbakht Shahbazi, A., and Zohrabi, N. 2015. Determination and Simulation of Water Quality in Karkheh River Using QUAL2K Model. *Journal of Water Science & Engineering*. 5(12): 51-67. (In Persian)

3. Ahmadi Mamaghani, Y., Khorasani, N., and Rafiei, Gh. 2011. Investigation of pollution sources and water quality of Tajan River. *Journal of Natural Environment*. 63(4): 317-327. (In Persian)

4. Alishiri, H., Sajadifar, S.H., and Mohammadbagheri, A. 2017. Validity of the Environmental Kuznets Curve Hypotheses in Water Pollution A Case Study. *Journal of Water and Wastewater*: 28(1): 57-64. (In Persian)

5. Ashegh Moallam. M., Malek Mohammadi, B., and Torabian, A. 2016. An Evaluation of the Importance of Self- Purification Capacity of Rivers in Developing Effluent Discharge Standards. *Environmental Researches*. 7(13): 103-116. (In Persian)

6. Dahmardan, A., Mazaheri, M., and Mohammad vali Samani, J. 2018. Identification of location, activity time and intensity of the source of the unclear pollutant in the river. *Journal of environmental hazards Management*. 5(1): 35-52. (In Persian)

7. Dastourani, M., Razaghian, H., and Mohseni, B. 2021. A review of Methods for Coping with High Current in Different Hydraulic Conditions. *Journal of Extension and Development of Watershed Management*. 8(31): 18-26.

8. Effendi, H. 2016. River water quality preliminary rapid assessment using pollution index. *Procedia Environmental Sciences*. 33: 562-567.

9. Ehteshami, M., Biglarijoo, N., and Salari, M. 2014. Assessment and quality classification of water in Karun, Dez and Karkheh Rivers. *Journal of River Engineering*, 2.8: 23-30.

Biotechnology. 8(1): 27-35. (In Persian)

29. Razavizadeh, S., Khosroshahi, M., and Dargahian, F. 2021. Assessment the Impact of Maroon dam on Jarahi River Regime. *Journal of Extension and Development of Watershed Management*. 9(33): 1-9.

30. Seif, Z., and Banejad, H. 2009. A study of Zaynrood water quality in terms of drinking and agriculture. *Second National Conference on Drought Impacts and Management Strategies*, Isfahan. (In Persian)

31. Selong, J. H., and Helfrich, L. A. 2002. Impact of Trout Culture Effluent on Water Quality and Biotic Communities in Virginia Headwater Streams. *The progressive fish culturist*. 76: 247-262.

32. Sharifinia, M., Adeli, B., and Nafarzadegan, A.R. 2017. Evaluation of water quality trends in the Maroon River Basin, Iran, from 1990 to 2010 by WQI and multivariate analyses. *Environmental Earth Sciences*. 76(22): 781.

33. 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(3): 1535-1559.

34. Shokri, S., Hoshmand, A., and Moazed, H. 2015. Ammonium and Nitrate Quality Simulation in GarGar rivers using QUAL2KW Model. *Journal of Wetland Ecobiology*. 7(1): 57-68. (In Persian)

35. Singh, G., and Kamal, R. K. 2014. Application of water quality index for assessment of surface water quality status in Goa. *Current World Environment*. 9(3): 994-1000.

36. Vinay, T. M. 2017. Water Quality Analysis of River Tungabhadra Near Harihar. *IJARIE-ISSN (O)-2395-4396 Vol-3 Issue-2*.

37. Weiner, E. R. 2008. *Applications of environmental aquatic chemistry: a practical guide*. CRC press.

38. Zhang, R., Qian, X., Yuan, X., Ye, R., Xia, B., and Wang, Y. 2012. Simulation of water environmental capacity and pollution load reduction using QUAL2K for water environmental management. *International journal of environmental research and public health*. 9(12): 4504-4521.

39. Zohrabi, N., Alizadeh, E., Hasounizadeh, H., and Hosseinzadeh, S.M. 2015. Zoning Quality of Jarahi River using NSFQI and GIS. *Jouranl of Wetland Ecobiology*. 6(4): 31-40. (In Persian)

of Ganga Canal water quality in Uttarakhand. *Environment, development and sustainability*, 19(2), 419-431.

20. Misaghi, F., Delgosha, F., Razzaghmanesh, M., and Myers, B. 2017. Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: A case study of the Ghezal Ozan River. *Science of the Total Environment*. 589: 107-116.

21. Naderi, M., Pourgholam-Amiji, M., Khoshravesh, M., Ghoghghi, A., and Arab, N. 2020. Evaluation of Spatial-Temporal Comparisons of Water Quality Parameters and Health of Ziarat River using NSFQI Quality Index and Statistical Analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research*. 51(6): 1353-1372. (In Persian)

22. Naderi, M.H, Zakerinia, M., and Salarijazi, M. 2019. Aquatic Ecosystems Management and Restoration of Rivers through Implementation of the Environmental Flow Regime. *Journal of Ecohydrology*. 6(3): 719-737. (In Persian)

23. Naderi, M.H., Zakerinia, M., and Salarijazi, M. 2018. Evaluation of the Influential Factors on Water Quality Components of Qarasoo River in Golestan Province. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 5(12): 1240-1252. (In Persian)

24. Neissi, L., and Tishehzan, P. 2018. Dez River Water Quality assessment by using multivariate statistical methods. *Journal of Irrigation and Water Engineering*. 9(33): 139-150. (in Persian)

25. Noori, R., Berndtsson, R., Hosseinzadeh, M., Adamowski, J.F., and Abyaneh, M.R. 2019. A critical review on the application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index. *Environmental Pollution*. 244: 575-587.

26. Nosrati, K., Rajabi Eslami, A., and Sayadi, M. 2018. The Analysis and Classification of Water Quality Using a Multivariate Static Technique in the City of Mallard, Tehran. *Journal of Hydrogeomorphology*. 4(15): 171-191. (In Persian)

27. Noushadi, M., and Hatamizadeh, M. 2010. Qualitative measurement and simulation of Kor River using QUAL2K model. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*. 3(4): 238-249. (In Persian)

28. Rahmani, A.R., Samadi, M.T., and Heydari, M. 2008. Water Quality Assessment of Hamadan-Bahar Plain Rivers Using Wilcox Diagram for Irrigation. *Agricultural*



Abstract

Evaluation of Seasonal Changes of Tajan River Water Quality using Simulation Model of Qual2kw

M. Valizadeh Pirkolomi¹, M. Khoshravesh² and M.A. Gholami Sefidkohi³

Received: 2021/09/04 Accepted: 2021/12/28

Access to fresh and quality water is one of the most important issues for humans today. Having healthy water resources is an essential prerequisite for maintaining environmental quality and economic, political, social and cultural development. Increasing population and urban, agricultural and industrial development of the country further highlights the importance of paying attention to the quality of available water resources. With increasing of demand for water supplies and continued pollution of rivers and other waters, this will become a growing crisis in the future. Surface waters or rivers are the most important water resources that play an important role in supplying the water needed for various activities such as agriculture, industry, drinking and power generation. Today, using a simulation model is a common approach to water quality monitoring along the river's path. In this research, the water quality of Tajan River in Mazandaran province was evaluated, which is considered as one of the most important sources of water supply in different parts of the province. Using qualitative numerical simulation model (Qual2kw), investigated the process of changing the parameters of water quality parameters such as dissolved oxygen (DO), biological oxygenation (BOD), acidity (pH), electrical conductivity (EC), nitrate (NO₃⁻) and phosphate (PO₄³⁻). The average monthly data from 1385 to 1395 was entered into the model at three stations of the water regional company and environmental office along the river. Calibration of the model was performed based on the low water season data (September) and validation of the model was based on the high season data (December and February). The results of the Tajan River simulation showed that the Qual2kw model provides an appropriate estimation of the river quality conditions and this model could simulate the parameters with the appropriate accuracy. The results showed that despite the presence of point and non-point pollutant sources along the Tajan River, there is no limiting factor in supplying drinking water and agriculture at the downstream. In the aspect of agriculture, the water quality is suitable for agriculture in the whole of the river path. Only Kordkhil station was good category due to located in the downstream of the river and the rest of the stations are in the excellent category, which can be used for agriculture. The maximum self-purification power was belonging to the interval 2 (between Pol-e-Tajan and Kordkhil) equal to 7485.346 tons per day and the minimum of self-purification power was belonging to the interval (1) (between Rig-Cheshmeh and the Pol-e-Tajan) equal to 102.6805 tons per day. This trend shows that the power of self-purification of the river was increased from upstream to downstream.

Keywords: Self- purification, Nitrate, Pollutant sources, Water pollution, Qual2kw. Watershed health.

1. M.Sc. Graduated, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University

2. Associate Professor, of Water Engineering Department,, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, and correspond author: khoshravesh_m24@yahoo.com

3. Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University