



Modeling and Management of the River Water Quality for Aquatic Habitat Health Using a Source Control Approach (Case Study: Zarrineh-rud River)

M.R. Biglari¹, S. Sima^{2*} and M. Saadatpour³

Abstract

Protection and water quality management of rivers, as one of the valuable natural resources, is of high importance, especially where water scarcity is as well an issue. In the present study, in addition to identifying the contamination resources, different scenarios were surveyed for controlling the major pollutants in Zarrineh-rud River in order to meet the water quality standards for a healthy aquatic life. To achieve these objectives water quality sampling and monitoring of the contamination resources and plant coverage were conducted along the river during three seasons in 2016. By using these data in QUAL2Kw, water quality and hydraulic modeling was conducted, calibrated and confirmed. Evaluation of the hydraulic behavior and the river water quality indicated that during dry seasons both reaction kinetics and advection process affect the variations in water quality parameters, whereas during the wet periods advection dominants. Subsequently, analysis of the river water quality pollutants revealed that the distributed sources like pile of trashes and animal wastes at river banks have the largest share in contamination (Nutrients) of the Zarrineh-rud River. Among the point sources of pollution and agricultural pollutants, the point source had the larger share in contamination during summer and fall and agricultural pollutants had the main contribution during the spring. Evaluation of water quality management scenarios during the fall season in the present condition showed that restricting Sugar Factory Sewage BOD5 by 210 mg/l resulted in keeping the amount of BOD within standard values for the aquatic life.

Keywords: Water Quality, QUAL2Kw Model, Point and Distributed Source, Source Control of Pollutants, Aquatic Life.

Received: November 16, 2017

Accepted: June 27, 2018

مدل‌سازی و مدیریت کیفیت آب رودخانه با رویکرد کنترل آلودگی در مبدأ به منظور تأمین سلامت حیات آبریان (مطالعه موردی: زرینه‌رود)

محمد رضا بیگلری^۱، سمیه سیمای^{۲*} و مظهره سعادتپور^۳

چکیده

حفاظت و مدیریت کیفیت آب رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع طبیعی ارزشمند در شرایط تشدید بحران کمی منابع آب بیش از پیش حائز اهمیت است. در این تحقیق، ضمن شناسایی منابع آلاینده، سناریوهای متعدد کنترل آلودگی‌های رودخانه زرینه‌رود برای دستیابی به استانداردهای کیفیت آب برای حیات آبریان مورد ارزیابی قرار گرفته است. به‌منظور دستیابی به اهداف تحقیق، سه دوره نمونه‌برداری پارامترهای کیفیت آب، پایش منابع آلاینده رودخانه و پایش وضعیت پوشش گیاهی بستر از نقاط مختلف رودخانه زرینه‌رود در فصول مختلف سال ۱۳۹۵ انجام گردید. با استفاده از داده‌های گردآوری شده، مدل هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه در محیط QUAL2Kw آماده‌سازی و سپس واسنجی و صحت‌سنجی گردید. ارزیابی رفتار هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود متأثر از سناریوهای مختلف نشان می‌دهد که در طی فصول خشک، کنتیک واکنش و فرآیند انتقال هر دو بر تغییرات غلظت پارامترهای کیفیت آب اثرگذار هستند، در حالی که در فصل تر، فرآیند انتقال غالب و اثرگذار است. متعاقباً، تحلیل منابع آلاینده نشان می‌دهند منابع گسترده مانند زباله‌ها و فضولات انباشته شده در ساحل رودخانه بیشترین سهم را در آلودگی آب (مواد مغذی) دارند و از بین منابع نقطه‌ای و آلاینده‌های کشاورزی، منابع نقطه‌ای سهم بیشتر آلودگی را در فصل تابستان و پاییز و آلاینده‌های کشاورزی سهم بیشتر را در فصل بهار دارند. بررسی سناریوهای مختلف مدیریت کیفیت رودخانه در فصل پاییز نشان می‌دهند محدود نمودن BOD5 فاضلاب کارخانه قند به مقدار ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط کنونی، سبب می‌گردد تا غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی رودخانه در حد استاندارد برای حیات آبریان بماند.

کلمات کلیدی: کیفیت آب، مدل Qual2kw، آلاینده‌های نقطه‌ای و گسترده، کنترل منابع آلاینده، حیات آبریان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۸/۲۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۴/۶

1- M.Sc. Graduate in Water Resources Engineering and Management, School of Civil & Environmental Engineering, University of Tarbiat Modares, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, School of Civil & Environmental Engineering, University of Tarbiat Modares Tehran, Iran. Email: s.sima@modares.ac.ir

3- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته دوره کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- استادیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

رودخانه گل‌آلود بوستون (Boston's Muddy River) قبل از احیای آن، مطالعات خود را آغاز کردند. شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه و ارزیابی سناریو کنترل منابع آلاینده از مبدأ به رودخانه با استفاده از مدل QUAL2K نشان داد که منابع آلاینده ورودی به رودخانه سهم قابل توجهی در آلودگی رودخانه نداشته و عامل اصلی کاهش اکسیژن محلول در رودخانه وجود رسوبات، جلبک‌های کف و فصولات پرندگان مهاجر به رودخانه است و تنها با لایروبی می‌توان کیفیت آب رودخانه را در شرایط مطلوب قرار داد.

از میان مطالعات متعدد داخلی صورت گرفته در زمینه شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه و منابع آلاینده آن (به‌عنوان نمونه: Jafarzadeh- Haghghi et al, 2005; Pour karimi, 2008; Hashemi, 2009; Mirbageri et al., 2010; Noushadi and Hatamizadeh, 2010; Hosseini and Hosseini, 2017) در تعداد محدودی از مطالعات بررسی اثر اجرای سناریوهای بهبود کیفیت آب رودخانه مورد توجه قرار گرفته است (به‌عنوان نمونه: Nazari, 2005; Shariyari, 2010; Malakipour, 2010). در برخی از این مطالعات، محققین به تعیین سهم منابع آلاینده در آلودگی پیکره آبی پرداخته‌اند. برای مثال، Hashemi et al. (2010) سهم بار آلودگی ورودی از زیر حوضه‌ها به مخزن سد امیرکبیر را با استفاده از مدل QUAL2K تعیین کردند، نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که سهم بار آلودگی ورودی به مخزن سد از شاخه‌های فرعی، بیشتر از شاخه‌ی اصلی رودخانه است. در مطالعه‌ی دیگری (Shariyari, 2010)، ضمن شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه کارون، اظهار داشت که بیش از ۷۸ درصد از حجم کل فاضلاب ورودی به رودخانه کارون و دز، ناشی از برگشت پساب‌های کشاورزی به رودخانه است. انجام مطالعات شناسایی منابع آلاینده رودخانه زربینه‌رود، تعیین نقاط بحرانی از نظر آلودگی، تدوین برنامه پیشگیری، کنترل و کاهش آلودگی و در نهایت طراحی برنامه پایش و ارزیابی عملکرد برنامه‌های اجرایی در سال ۲۰۰۷ توسط شرکت مهندسی لار آغاز شد. در مطالعه مذکور، از مدل QUAL2Kw برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه استفاده شد (Lar Consulting Engineers, 2009).

اگرچه مطالعات متعددی با اهداف مختلف توسط محققین داخلی با استفاده از مدل‌های خانواده QUAL (QUAL2E, QUAL2K,) QUAL2Kw, etc. در رودخانه‌های ایران صورت پذیرفته، اما کاستی‌هایی چون نادیده انگاشتن منابع آلاینده غیر نقطه‌ای، عدم در نظر گرفتن برداشت‌های جریان و اثرات جریانات برگشتی، عدم دسترسی کامل و هم‌زمان به داده‌های پارامترهای کیفیت آب و خصوصیات هیدرولیکی جریان، عدم توجه به هیدرولیک جریان و

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع طبیعی که تمرکز گسترده‌ای از فعالیت‌های بشر روی آن وجود دارد، پذیرنده حجم وسیعی از آلودگی‌های شیمیایی و بیولوژیکی می‌باشند (Hemond & Fechner, 2014). ورود بیش از حد مواد آلی و کربنی موجود در پساب‌ها و فاضلاب‌ها به درون بدنه‌های آبی منجر به مصرف بیش از حد اکسیژن محلول در اثر فعالیت باکتری‌ها و کاهش آن می‌گردد. کنترل منابع آلاینده از مبدأ، هوادهی جریان و رهاسازی جریان (سناریو ترقیق)، تصفیه زیستی و غیره از جمله راهکارهای بهبود و کنترل کیفیت آب رودخانه‌ها می‌باشد (Kannel et al., 2007; Zhang et al., 2012).

مدل‌های کیفیت آب با شبیه‌سازی ساده و دقیق راهکارهای بهبود کیفیت آب می‌توانند به‌عنوان ابزاری در فرآیند مدیریت کیفیت آب استفاده شوند. در سال‌های اخیر، مدل‌های کیفیت آب به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Zhang et al., 2012). مدل S-P (Streeter-Phelps) به‌عنوان یک مدل کلاسیک کیفیت آب است که برای تخمین غلظت اکسیژن محلول توسعه داده شد. در مدل‌های یک بعدی فرض می‌گردد فرآیندهای انتقال و پخش در جهت اصلی جریان رخ می‌دهند. برخی از مدل‌های دینامیکی کیفیت آب از جمله WQRRS, WASP, CE-QUAL-W2 نسبت به مدل‌های یک بعدی پیچیده‌تر هستند (Cox, 2003). مدل‌های پیچیده دو بعدی و سه بعدی به راحتی آماده‌سازی نمی‌شوند و نیازمند گستره وسیعی از داده‌های میدانی و تنظیم پارامترها و ضرایب متعدد از معادلات انتقال- واکنش در بعدهای مختلف می‌باشند. در شرایط محدودیت تأمین داده‌های مورد نیاز برای شبیه‌سازی، مدل‌های یک بعدی هیدرولیک و کیفیت آب به طور گسترده‌ای پذیرفته شده‌اند. QUAL2K یکی از بهترین ابزارها به علت انعطاف‌پذیری، سهولت استفاده و دسترسی آزاد برای شبیه‌سازی کیفیت آب است (Ye et al., 2013). تاکنون مطالعات متعددی در زمینه شبیه‌سازی کیفیت آب و تحلیل اثر سناریوهای بهبود کیفیت آب رودخانه‌ها با استفاده از این مدل انجام شده است. (Kannel et al. (2007) ضمن شناسایی آلودگی، نمونه‌برداری و ساخت مدل کیفیت آب رودخانه Bagmati، اثر اجرای سه راهکار بهبود کیفیت آب رودخانه (کنترل منابع آلاینده از مبدأ، رهاسازی جریان، هوادهی موضعی) را ارزیابی کردند. نتایج ایشان نشان داد که هوادهی موضعی مؤثرترین راهکار برای بهبود کیفیت آب این رودخانه است. علاوه بر این هوادهی موضعی و کنترل منابع آلاینده از مبدأ راهکار ترکیبی بسیار کارآمدی برای بهبود کیفیت آب رودخانه است. در مطالعه دیگری، Mathew et al. (2011) با هدف شناسایی و درک مشکل کیفیت آب

فرآیندهای فرارفت و پخشیدگی بر انتقال و سرنوشت پارامترهای کیفیت آب در اکثر این مطالعات قابل توجه است. در این مطالعه ضمن پایش میدانی زمانی و مکانی پارامترهای هیدرولیکی و کیفیت آب، شناسایی منابع آلاینده منطقه مورد مطالعه و نیز گردآوری منحنی‌های دبی-اشل و دبی-سرعت رودخانه زربینه رود در مقاطع مختلف طولی رودخانه، ۱- کالیبراسیون و صحت‌سنجی توأم مدل هیدرولیک و کیفیت آب، ۲- مدل‌سازی منابع آلاینده غیر نقطه‌ای/جریان‌های برگشتی از اراضی کشاورزی، ۳- مدل‌سازی تأثیر پوشش گیاهی بستر رودخانه، ۴- مدل‌سازی کامل پارامترهای مؤثر در فرآیند تغذیه‌گرایی، ۵- مدل‌سازی اثر هیدرولیک جریان بر فرآیند هواگیری صورت پذیرفته و از ویژگی‌های قابل توجه و نوآورانه این تحقیق است که در مطالعات پژوهشگران داخلی به این موارد کمتر پرداخته شده است. همچنین اثر سناریوهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژیکی بر فرآیندهای انتقال و تبدیل مواد مورد ارزیابی قرار گرفته است. بررسی سیاست‌های کنترل منابع آلاینده به منظور تأمین سلامت کیفیت آب رودخانه برای حیات آبیان و تأمین شرایط مطلوب زیستی گونه‌های شاخص و نیز تعیین سهم منابع آلاینده مختلف بر کیفیت آب رودخانه زربینه رود از دیگر موضوعات مورد توجه در این تحقیق است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

زربینه رود یکی از مهم‌ترین و طویل‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که در جنوب دریاچه واقع شده است. در این تحقیق بخش انتهایی رودخانه زربینه رود حد فاصل بند انحرافی نورزولو تا ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد به منظور مطالعه انتخاب شد. لیلان‌چای که در حال حاضر کاملاً خشک شده است تنها شاخه فرعی است که در این محدوده به زربینه رود ملحق می‌شود (شکل ۱). وجود باغات و زراعت آبی سواحل رودخانه در محدوده مطالعاتی سبب برداشت غیرمجاز آب از رودخانه شده است. مطالعات صورت گرفته در حوضه نشان می‌دهد که متوسط حجم آبیاری صورت گرفته در حوضه ۷۷۰ میلیون مترمکعب در سال است که ۴۱۵ میلیون مترمکعب آن مصرف واقعی و مابقی آب برگشتی بوده که مجدداً به حوضه بازمی‌گردد. این برگشت به آب‌های زیرزمینی و سطحی صورت می‌گیرد و سهم تغذیه آبخوان و جریان برگشتی به رودخانه به صورت دقیق مشخص نیست (Toluei, 2013).

۲-۲- تأمین داده‌های مورد نیاز

داده‌های مورد نیاز این مطالعه به سه بخش کلی داده‌های هواشناسی، داده‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی رودخانه و در نهایت داده‌های

کیفیت آب رودخانه تقسیم می‌شوند. به دلیل عدم قطعیت در مقادیر برخی داده‌های مورد نیاز مدل (میزان منابع آلاینده گسترده در امتداد رودخانه زربینه رود)، از گزینه تدقیق داده‌های ورودی در مدل QUAL2Kw استفاده گردید.

۲-۲-۱- تأمین داده‌های هواشناسی، هیدرولیکی و هیدرولوژیکی

برای تأمین داده‌های هواشناسی، از اطلاعات ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک میاندوآب استفاده شد. به منظور شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه، اطلاعات مقاطع مختلف طولی رودخانه از روی نقشه‌های سازمان نقشه‌برداری کشور و همچنین نقشه‌برداری‌های طرح تعیین حقایق زیست‌محیطی رودخانه‌ها و تالاب‌های حوضه دریاچه ارومیه (WERI (a), 2016) استخراج و سپس این مقاطع به مدل HEC-RAS منتقل و منحنی‌های دبی-اشل و دبی-سرعت استخراج گردیدند. منحنی‌های دبی-اشل و دبی-سرعت رودخانه به عنوان ورودی به مدل هیدرولیک و کیفیت آب QUAL2Kw معرفی گردیدند. مقدار ضریب آب برگشتی به رودخانه با توجه به مطالعات صورت گرفته در حوضه (Faraspandab Consulting Engineers, 2009) و همچنین بازدیدهای میدانی برای فصول کم آب و پر آب به ترتیب برابر با ۱۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شدند. بر اساس بازدیدهای میدانی فصل پاییز، برداشت آبی از رودخانه زربینه رود در این فصل صورت نپذیرفته اما در فصول بهار و تابستان، برداشت آب در امتداد رودخانه انجام می‌گیرد. مقادیر آب برداشتی در این فصول بر اساس معادله بقای جرم و بر اساس تفاضل دبی جریان در ابتدای محدوده مطالعاتی (رهاسازی شده از بند نورزولو) و انتهای آن (ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد)، میزان جریان‌های برگشتی به رودخانه و دبی منابع آلاینده نقطه‌ای محاسبه گردید. بر اساس محاسبات انجام شده، متوسط برداشت جریان در طول بازه مطالعاتی برای بهار و تابستان به ترتیب برابر با ۸/۱ و ۳/۴ مترمکعب بر ثانیه است. بررسی داده‌های بلندمدت دبی ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد (2013-1981) نشان می‌دهد که دو ماه فروردین و اردیبهشت دوره پرآب (فصل تر) رودخانه هستند و از خرداد تا انتهای سال آبی از شدت جریان کاسته می‌شود. به طوری که اواخر تابستان و اوایل پاییز را می‌توان فصل خشک قلمداد نمود (WERI (b), 2016).

۲-۲-۲- تأمین داده‌های کیفیت آب رودخانه؛ عملیات میدانی و نمونه‌برداری

عملیات نمونه‌برداری و بازدید میدانی از رودخانه زربینه رود در ماه‌های اردیبهشت، شهریور و آذر سال ۱۳۹۶ انجام شد. با توجه به موقعیت

شهریور نشان می‌دهد که این منبع گسترده آلاینده، یک منبع بسیار تأثیرگذار بر وضعیت کیفیت آب رودخانه در پایین‌دست بوده است و کیفیت آب به شدت پس از عبور از این محل‌ها (محل انباشت فضولات حیوانی و زباله در حاشیه رودخانه) زوال می‌یابد. همچنین کیفیت پساب برگشتی از فعالیت‌های کشاورزی به رودخانه نیز از دیگر منابع آلاینده گسترده اثرگذار بر کیفیت آب رودخانه شناسایی گردیدند. در شکل ۲ موقعیت منابع آلاینده‌ی نقطه‌ای رودخانه نشان داده شده است.

به دلیل ابهام در مقادیر دقیق غلظت جریان‌های ورودی از منابع آلاینده گسترده امتداد رودخانه زربنه‌رود از قابلیت تدقیق داده‌های ورودی توسط مدل QUAL2Kw استفاده گردید.

منابع آلاینده موجود در رودخانه، طول گسترده بازه مطالعاتی، محدودیت‌های مالی و زمانی، نمونه‌برداری پارامترهای کیفیت آب از پنج نقطه در طول رودخانه صورت گرفت (شکل ۱). چهارده متغیر کیفیت آب در این دوره‌ها به صورت درجا و آزمایشگاهی ثبت و اندازه‌گیری گردیدند. در بازدیدهای میدانی مشخص شد که در حال حاضر، فاضلاب کارخانه قند و پساب تصفیه‌خانه آب و فاضلاب میاندوآب و همچنین فاضلاب ۹ روستای حاشیه رودخانه به زربنه‌رود وارد می‌گردند که از فاضلاب روستای حیدرآباد به نمایندگی از کیفیت فاضلاب روستایی نمونه‌برداری صورت گرفت. همچنین در برخی از این روستاها (۴ روستا) روستاییان اقدام به تخلیه فضولات حیوانی و زباله در حاشیه رودخانه می‌نمایند. بررسی تغییرات مکانی متغیرهای اندازه‌گیری شده (از جمله اکسیژن و آمونیوم) در ماه‌های اردیبهشت و

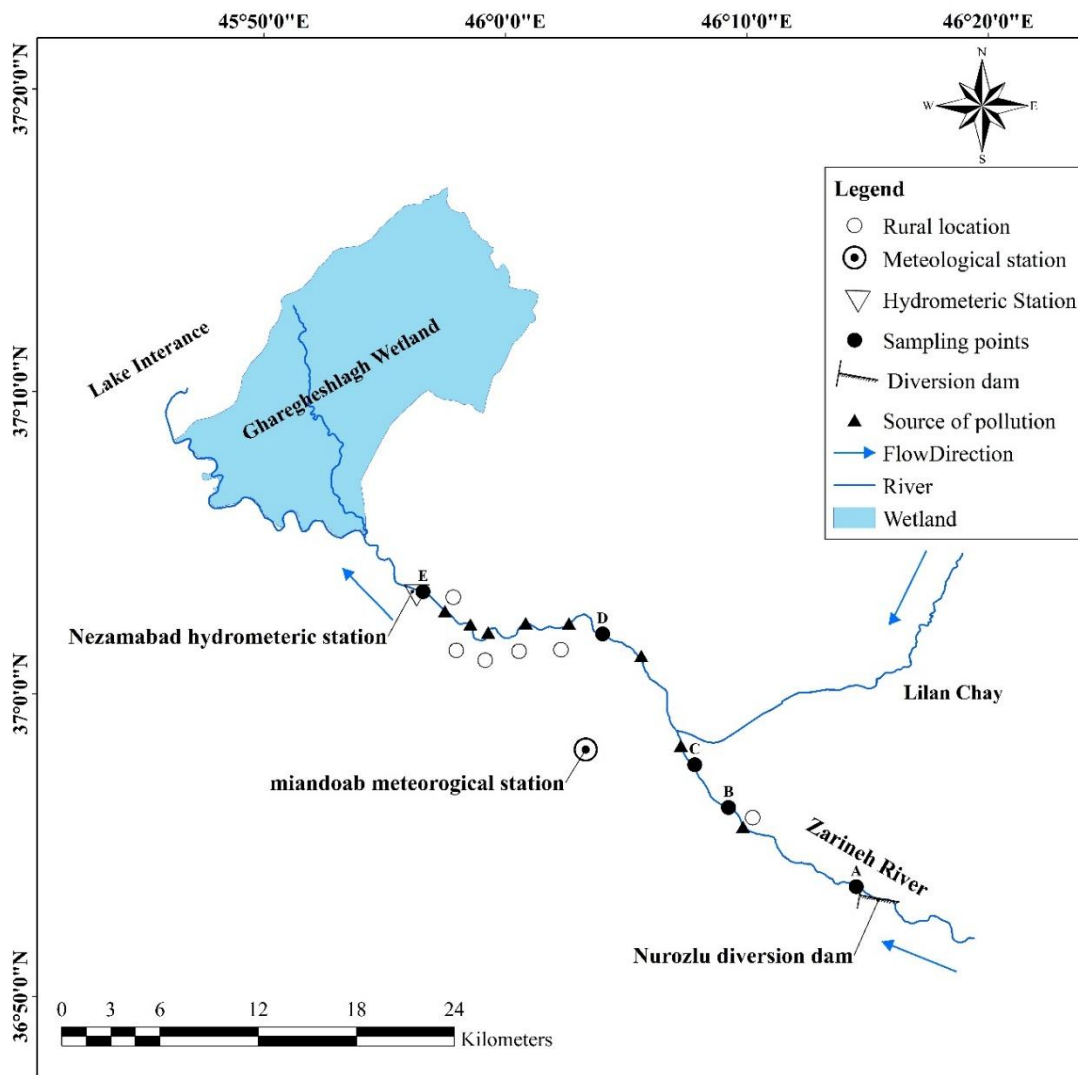


Fig. 1 - Study area, sampling points and location of the active pollution point sources along the Zarrineh-rud River

شکل ۱- محدوده مطالعاتی، نقاط نمونه‌برداری و موقعیت منابع آلاینده فعال زربنه‌رود

۲-۳-۱- فرضیات مدل‌سازی

علاوه بر فرضیات اصلی مدل، رودخانه از نظر کمی، کیفی و توابع تحریک هر فصل در شرایط دائمی شبیه‌سازی شده و فرض شده است که تمام برداشت‌های هر بازه در ابتدای آن صورت می‌گیرد. آلاینده‌های کشاورزی ورودی از هر بازه به صورت یکنواخت در کل طول آن بازه در نظر گرفته شده است. در این کار تحقیقاتی ضخامت لایه رسوب و تخلخل دانه‌های رسوب به ترتیب برابر با ۱۰ سانتی‌متر و ۰/۴ فرض شد (Kannel et al., 2007; Camargo et al., 2010; Rafiee et al., 2014). در این مطالعه اطلاعاتی از میزان اکسیژن خواهی رسوبات (SOD) و همچنین کفزی‌ها و بی‌مهرگان موجود در رسوبات و وضعیت کیفی ناحیه hyporheic و همچنین ضخامت و جریان این ناحیه در دسترس نبود لذا از شبیه‌سازی SOD و اثر تبادل جریان بین این ناحیه و آب رودخانه صرف‌نظر گردید. لازم به ذکر است که، سایر محققین نیز در اکثر تحقیقات از این اثر صرف‌نظر نموده‌اند (Kannel et al., 2007; Rafiee et al., 2014). با توجه به عدم وقوع شرایط بی‌هوازی در رودخانه زرنه‌رود، نرخ دینیریفیکاسیون برابر با صفر در نظر گرفته شد. روابط استخراج شده برای تعیین نرخ هوادهی رودخانه زرنه‌رود برای فصل‌تر (k_{a-w}) و خشک (k_{a-d}) به ترتیب روابط ۲ و ۳ می‌باشند که انتخاب این معادلات نیز از مولفه‌های کالیبراسیون مدل کیفیت منابع آب است. در این روابط، u سرعت جریان برحسب متر بر ثانیه و h عمق جریان برحسب متر است:

$$k_{a-d} = f(u, h) = 5.06 \frac{u^{0.98}}{h^{1.51}} \quad (2)$$

$$k_{a-w} = f(u, h) = 5.94 \frac{u^{0.52}}{h^{1.51}} \quad (3)$$

۲-۴- آماده‌سازی مدل

کل طول ۳۸ کیلومتری رودخانه با توجه به مقاطع موجود به ۱۲ بازه تقسیم‌بندی گردید. شکل ۲ بازه‌های رودخانه و موقعیت منابع آلاینده نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

اطلاعات حداقل و حداکثر غلظت منابع آلاینده گسترده به‌عنوان داده‌های مورد نیاز مدل QUAL2Kw به‌منظور تدقیق غلظت این منابع آلاینده، از گزارش‌های ارائه شده در خصوص ویژگی‌های کیفیت منابع آبی خروجی ۲۷ زهکش کشور استخراج گردیدند (Pour-karimi, 2008; Hashemi, 2009; Shariyari, 2010).

۲-۳- ابزار مدل‌سازی

مدل مناسب برای شبیه‌سازی کیفیت آب، ساده‌ترین مدلی است که بیشترین کاربرد را در مسأله مورد نظر داشته باشد (Chapra, 2008). بر اساس همین معیار، از بین مدل‌های رایج شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه، نسخه ۵.۱ مدل QUAL2Kw به‌منظور مدل‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه زرنه‌رود انتخاب شد. QUAL2Kw مدل یک‌بعدی، شبیه‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه با جریان دائمی بوده که قادر است تغییرات کیفیت آب (۱۹ متغیر) را به صورت روزانه و با گام زمانی کمتر از یک ساعت شبیه‌سازی نماید (Pelletier and Chapra, 2005). در مدل QUAL2Kw برای همه پارامترها به‌جز جلبک‌های کف یک موازنه جرم کلی برای هر المان به صورت رابطه ۱ در نظر گرفته می‌شود (بدون در نظر گرفتن hyporheic sediment zone):

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

در این رابطه، Q_i دبی در بازه i (L/day)، $Q_{ab,i}$ برداشت جریان از بازه i (L/day)، V_i حجم بازه i (L)، W_i بارگذاری خارجی در بازه i (mg/day)، S_i چشمه یا چاه بر اثر عکس‌العمل‌ها یا انتقال جرم ($mg/L/day$)، E_{i-1} ضریب پخش حجمی بین بازه‌ها (L/day)، E_i ضریب پخش حجمی بین بازه‌های i و $i-1$ و $i+1$ (L/day)، C_i غلظت پارامتر کیفی آب در بازه i در زمان t (day) می‌باشد (Pelletier and Chapra, 2005).

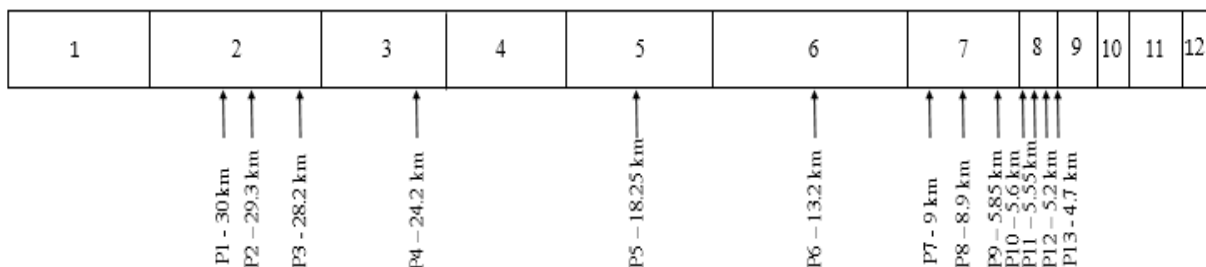


Fig. 2- System segmentation with location of pollution sources along Zarrineh-rud River

شکل ۲- بازه‌بندی زرنه‌رود و موقعیت منابع آلاینده آن

$$MAPE = \frac{100}{n} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |O_i^{obs} - O_i^{sim}|}{\sum_{i=1}^n O_i^{obs}}} \quad (5)$$

$$PBIAS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim}) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i^{obs}}} \quad (6)$$

۲-۶- ارزیابی سلامت کیفیت آب رودخانه برای آبریان

به منظور ارزیابی سلامت کیفیت آب رودخانه، غلظت متغیرهای کیفیت آب رودخانه با مقادیر توصیه شده برای آبریان (استخراج شده از مراجع مختلف علمی معتبر) مقایسه گردید. جدول ۱ محدوده استاندارد توصیه شده متغیرهای کیفیت آب برای حیات آبریان که در این تحقیق از آن‌ها استفاده شده است را نشان می‌دهد.

Table 1- Standard range of water quality variables for aquatic life

جدول ۱- محدوده استاندارد متغیرهای کیفیت آب برای حیات آبریان

Variable	Standard range	Reference
DO(mg/l)	> 6	(USEPA, 1989; WERI(c), 2016)
BOD(mg/l)	< 6	(EEC, 1978; Bhatnagar et al., 2004; Bhatnagar & Devi, 2013)
EC(μm/cm)	< 5000	WERI(c), 2016; Stone & Thomforde, 2004; Bhatnagar & Devi, 2013)
PH	6-9	(EEC, 1978)
TEMP(°C)	< 30	(WERI(c), 2016)
NO3(mgN/l)	< 10.161	(ANZECC, 2000)
NH4(mgN/l)	< 0.77	(EPA, 2003)
NH3(mgN/l)	< 0.024	(ANZECC, 2000)
TN(mgN/l)	< 5	(EPA, 2003)
TP(mgP/l)	< 0.5	(EPA, 2003)
ALK(mgcaco 3/l)	50-300	(USEPA, 1986; ; Santhosh & Singh, 2007; Bhatnagar & Devi, 2013)

۳- بحث و نتایج

۳-۱- نتایج کالیبراسیون مدل‌های فصول تر و خشک

جدول ۲ پارامترهای کالیبراسیون مدل برای دو فصل تر و خشک را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر به دست آمده در کالیبراسیون برای یک پارامتر مشخص در فصل تر و خشک متفاوت می‌باشد، از دلایل این اختلاف، تفاوت مشخصات هیدرولیکی رودخانه و دبی جریان، تفاوت وضعیت پوشش گیاهی (نوع و میزان) رودخانه، دمای آب، طبیعت مواد و همچنین نوع و تعداد میکروارگانیسم‌ها در دو فصل تر و خشک است.

گام زمانی حل معادلات برابر با ۵/۶۲۵ دقیقه در نظر گرفته شد. روش حل اولر و نیوتن رافسون به ترتیب برای حل معادلات انتقال جرم و شبیه‌سازی pH مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به وجود پوشش گیاهی در بستر و تعریف آن در مدل، حداقل زمان شبیه‌سازی برای رسیدن به حالت دائمی باید بیش از ۲ برابر زمان عبور باشد (Pelletier and Chapra, 2005). زمان عبور جریان مورد نظر بر اساس خصوصیات جریان و طول مسیر بازه مورد مطالعه محاسبه گردیده و بر همین اساس مدت زمان اجرای مدل در این کار تحقیقاتی برابر با ۵ روز در نظر گرفته شد.

۲-۴-۱- کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل هیدرولیک و کیفیت آب

به منظور کالیبراسیون مدل فصل خشک و تر به ترتیب از داده‌های ماه شهریور و اردیبهشت سال ۱۳۹۵ استفاده گردید. تعداد پارامترهای کالیبره شده برای فصول خشک و تر به ترتیب ۲۱ و ۱۷ بوده‌اند. در تابع هدف الگوریتم ژنتیک، با توجه به اهمیت شبیه‌سازی اکسیژن محلول، وزن ۵۰ برای اکسیژن محلول و برای سایر متغیرهای کیفی وزن ۲ در نظر گرفته شد. اندازه جمعیت اولیه و تعداد نسل در الگوریتم ژنتیک با آنالیز حساسیت‌های متعدد، به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۲۰۰ انتخاب گردیدند. محدوده مجاز تغییر پارامترهای کنتیک در کالیبراسیون مدل کیفیت آب رودخانه (کمینه و بیشینه) برابر با مقادیر پیش فرض مدل در نظر گرفته شدند. دوره صحت‌سنجی نیز بر اساس داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و پارامترهای کیفیت منابع آب گردآوری شده در آذر ۱۳۹۵ آماده‌سازی و ارزیابی گردید.

۲-۵- ارزیابی دقت مدل‌ها

به منظور تعیین خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله کالیبراسیون و صحت‌سنجی از شاخص‌های معمول محاسبه خطا از جمله شاخص‌های $RMSE^1$ ، $MAPE^2$ و $PBIAS^3$ استفاده شد. روابط ۴ تا ۷ به ترتیب شاخص‌های خطای مورد استفاده را نشان می‌دهد. در این روابط n تعداد کل داده‌ها، O_i^{obs} مقدار مشاهداتی متغیر کیفی در رودخانه و O_i^{sim} مقدار شبیه‌سازی شده‌ی متغیر کیفی است. هر چه مقادیر این شاخص‌ها کمتر باشد، دقت مدل در شبیه‌سازی شرایط واقعی بیشتر است. حدود قابل قبول این شاخص‌ها برای ارزیابی دقت مدل‌های کیفیت آب در مطالعات پیشین ارائه شده است (Kannel et al., 2007; Moriasi et al., 2007; Rafiee et al., 2014):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i^{obs} - O_i^{sim})^2}{n}} \quad (4)$$

مقادیر خطای ارائه شده در جدول ۳ گویای گردآوری مجموعه گسترده‌ای از داده‌های کیفیت به ترتیب شامل اکسیژن محلول، نیاز اکسیژن خواهی بیولوژیکی، هدایت الکتریکی، نیتрат، آمونیم، نیتروژن آلی، مجموع نیتروژن، فسفر آلی و غیرآلی، مجموع فسفر، pH و قلیائیت در پنج نقطه پایش در طول رودخانه زربنه رود و نیز کالیبراسیون و صحت‌سنجی این پارامترهای کیفی در ارزیابی وضعیت رودخانه با تنظیم پارامترها و ضرایب متعدد در مدل QUAL2Kw است.

۳-۲- نتایج صحت‌سنجی مدل

پس از کالیبراسیون مدل برای دوره‌های کم‌آب و پرآب (فصول تر و خشک)، از نتایج نمونه‌برداری و بازدیدهای میدانی در آذرماه سال ۱۳۹۵ برای صحت‌سنجی مدل کیفیت آب رودخانه برای فصل خشک استفاده شد. بررسی مقادیر شاخص‌های خطا بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای متغیرهای مختلف (جدول ۴) و مقایسه‌ی آن‌ها با حدود قابل قبول گزارش شده در مطالعات گذشته، صحت مدل‌های اکسیژن محلول، اکسیژن خواهی بیوشیمیایی، هدایت الکتریکی، نیترات، آمونیم، فسفر آلی و کل، نیتروژن کل، قلیائیت و pH را تأیید می‌نماید.

شکل ۳ و ۴ به ترتیب نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل‌های هیدرولیک و کیفیت آب رودخانه زربنه رود را نشان می‌دهد. بررسی تغییرات مکانی متغیرها در هر دو فصل نشان می‌دهد که کیفیت آب در پایین دست رودخانه به واسطه‌ی ورود منابع آلاینده نقطه‌ای و گسترده کاهش می‌یابد. وجود فضولات حیوانی و زباله در ساحل رودخانه (روستاهای حاشیه‌ی رودخانه) از عوامل اصلی آلودگی آب در هر دو فصل است و بیشترین اثر آن افزایش غلظت مواد مغذی (انواع فسفر و نیتروژن) در رودخانه می‌باشد. جدول ۳ مقدار شاخص‌های خطای بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل را برای فصل تر و خشک نشان می‌دهد. مقایسه نتایج با مقادیر قابل قبول خطا که در مطالعات گذشته گزارش شده (Kannel et al., 2007; Moriasi et al., 2007; Rafiee et al., 2014)، نشان می‌دهد که اغلب مدل‌های ساخته شده به جز مدل BOD که در اغلب شاخص‌های خطا برای هر دو فصل، مقادیر خطای زیادی را نشان می‌دهد، دقت قابل قبولی را برای شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در مرحله کالیبراسیون دارند.

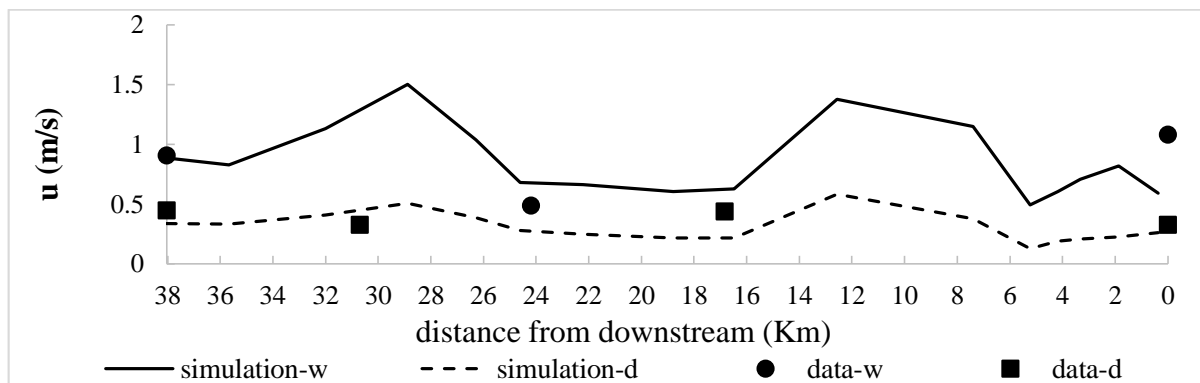
مقادیر سرعت و عمق جریان بالا در ماه اردیبهشت نسبت به ماه شهریور متأثر از دبی بالای رودخانه در ماه‌های نخست فصل بهار و کاهش آن در ماه شهریور در اثر برداشت‌های بالادست برای تأمین نیازهای مصرفی در منطقه است.

Table 2- Calibrated parameters for the Zarrineh-rud River water quality modeling in 2016
جدول ۲- پارامترهای کالیبره شده برای مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه زربنه رود در سال ۱۳۹۵

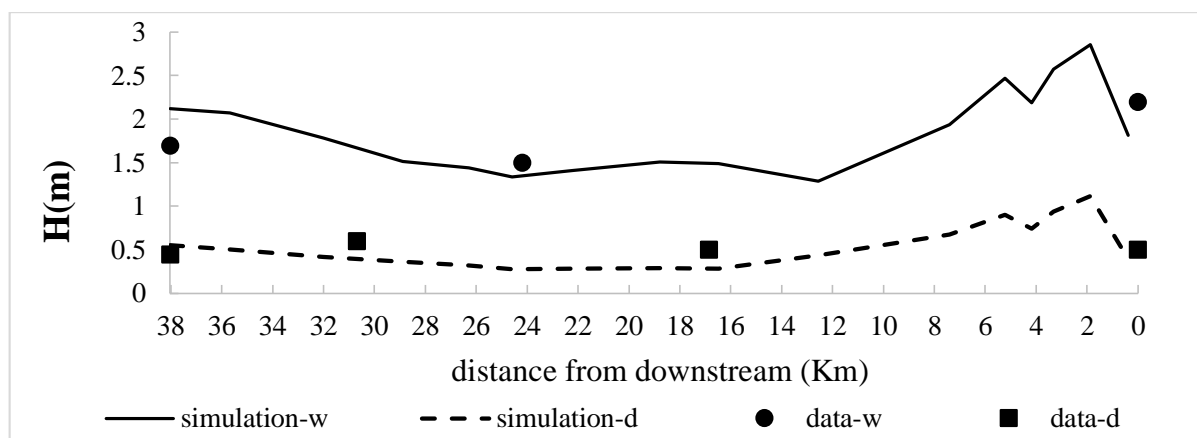
Parameter	Value (WS*)	Value(DS**)	Units	AUTOCAL (WS)	AUTOCAL (DS)	Min value	Max value
Slow CBOD Hydrolysis rate	3.415	2.846	/d	Yes	Yes	0	5
Slow CBOD Oxidation rate	0.219	0.221	/d	Yes	Yes	0	0.5
Fast CBOD Oxidation rate	0.302	3.574	/d	Yes	Yes	0	5
Organic N Hydrolysis	0.004	0.508	/d	Yes	Yes	0	5
Organic N Settling velocity	0.018	0.282	m/d	Yes	Yes	0	2
Ammonium Nitrification	0.904	1.020	/d	Yes	Yes	0	10
Organic P Hydrolysis	-	1.010	/d	No	Yes	0	5
Organic P Settling velocity	-	0.077	m/d	No	Yes	0	2
Inorganic P Settling velocity	-	1.153	m/d	No	Yes	0	2
Sed P oxygen attenuation half sat constant	-	1.014	mgO ₂ /L	No	Yes	0	2
Detritus Dissolution rate	3.153	4.162	/d	Yes	Yes	0	5
Detritus Settling velocity	3.188	2.746	m/d	Yes	Yes	0	5
Max Growth rate	48.857	9.662	gD/m ² /d or /d	Yes	Yes	0	100
Basal respiration rate	0.005	0.027	/d	Yes	Yes	0	0.3
Excretion rate	0.006	0.058	/d	Yes	Yes	0	0.5
Death rate	0.028	0.066	/d	Yes	Yes	0	0.5
Light constant	24.242	22.836	langleys/d	Yes	Yes	1	100
Ammonia preference	12.683	76.486	ugN/L	Yes	Yes	1	100

*WET SEASON

**DRY SEASON



الف

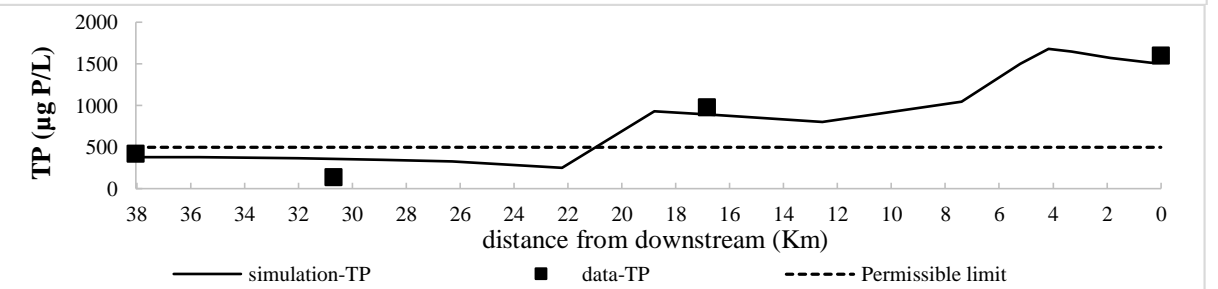
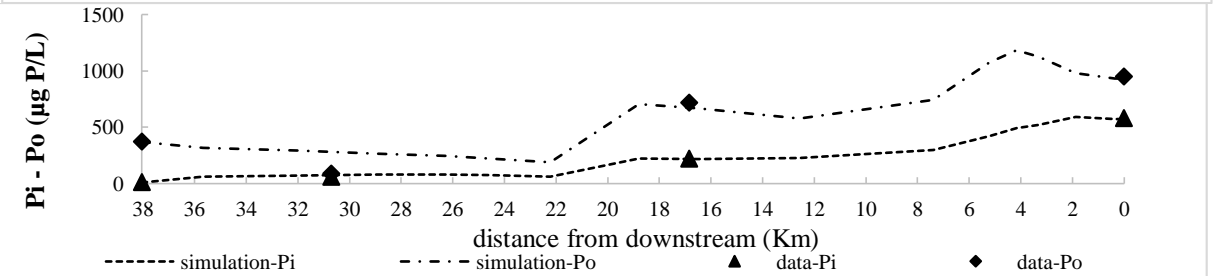
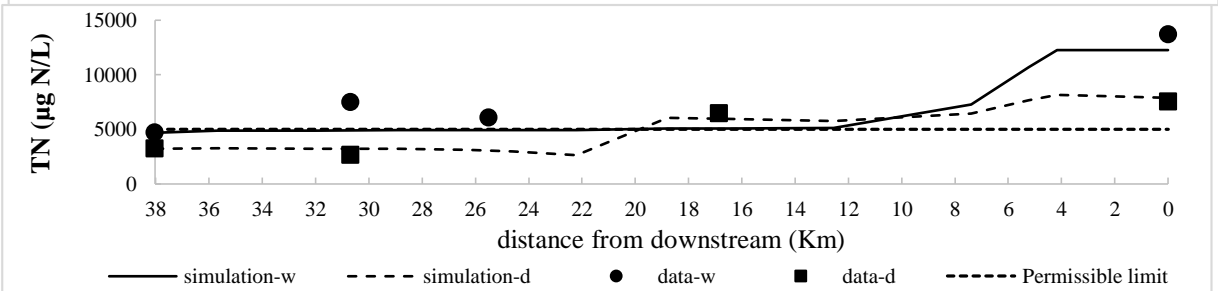
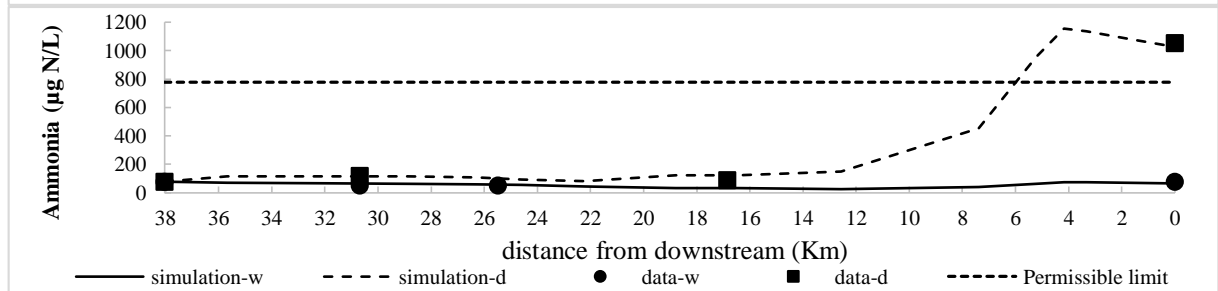
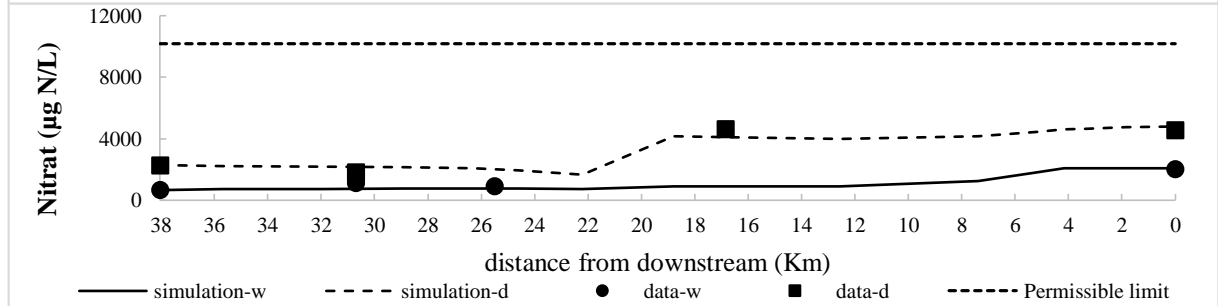
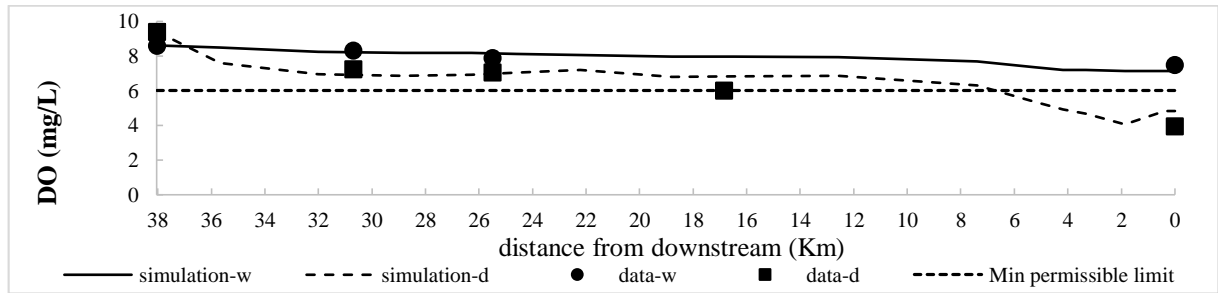


ب

Fig. 3- Calibration of Hydraulic model for Zarrinehbrud River bz data on April and August-2016
 شکل ۳- کالیبراسیون هیدرولیک رودخانه زرینه رود با داده های ماه های اردیبهشت و شهریور سال ۱۳۹۵؛ الف) سرعت جریان
 ب) عمق جریان

Table 3- The amount of error indicators for predicted vs. measured water quality parameters (Calibration)
 جدول ۳- مقدار شاخص های خطا بین مقادیر پیش بینی شده و اندازه گیری شده (کالیبراسیون)

Water quality parameters	Wet season			Dry season		
	RMSE	MAPE	PBIAS	RMSE	MAPE	PBIAS
DO(mg/l)	0.23	0.67	-0.92	0.51	1.24	-3.21
BODu (mg/l)	1.87	11.01	4.69	1.21	11.92	-4.84
EC ($\mu\text{m}/\text{cm}$)	12.6	0.75	-2.6	21.69	0.86	-3.45
NO ₃ (mg N/l)	0.24	3.99	-12.61	0.38	2.69	15.20
NH ₄ (mg N/l)	0.01	3.70	5.22	0.02	0.97	8.76
Organic N (mg N/l)	1.67	5.90	-20.73	0.16	2.79	23.47
TN(mg N/l)	1.70	5.42	-19.06	0.50	2.48	16.96
Organic P (mg P/l)	-	-	-	0.11	3.81	15.62
Inorganic P (mg P/l)	-	-	-	0.01	1.11	10.18
TP(mg P/l)	-	-	-	0.14	4.17	10.23
pH	0.26	0.74	2.97	0.48	1.15	4.50
ALK(mg cacO ₃ /l)	-	-	-	14.83	1.27	-5.08



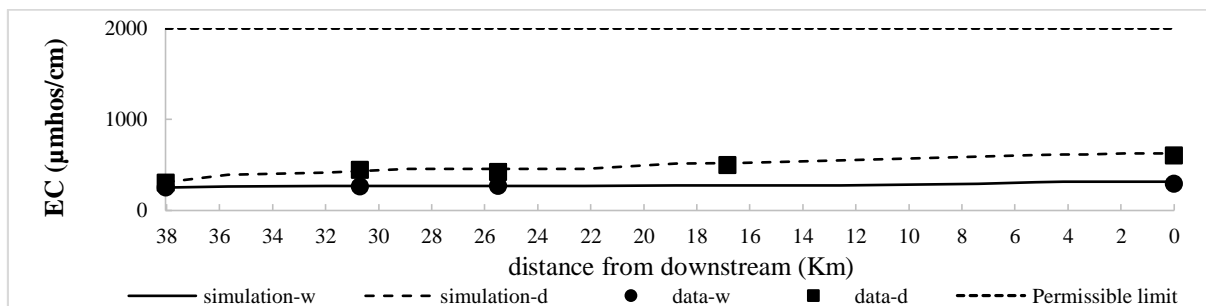


Fig. 4- Calibration of water quality in Zarrineh River by data on April and August-2016

شکل ۴- کالیبراسیون کیفیت آب رودخانه زرینه رود با استفاده از داده‌های ماه‌های اردیبهشت و شهریور در سال ۱۳۹۵

مستقیم و غیرمستقیم این متغیر بر غلظت سایر متغیرها، تحلیل حساسیت مدل اکسیژن محلول برای هر دو فصل انجام شد. به منظور تحلیل حساسیت، چهار پارامتر مدل و یازده ورودی (شامل دبی منابع آلاینده، دبی جریان سرشاخه و غلظت آلاینده‌های آن، ضرایب و توان‌های روابط دبی-اشل و دبی-سرعت، درصد پوشش گیاهی و میزان جریان در تماس با فضولات انباشته شده در ساحل رودخانه) به میزان ۱۰، ۲۰ و ۵۰ درصد (که در محدوده‌ی معنی‌دار می‌باشد) تغییر داده و شیب منحنی حساسیت مدل اکسیژن محلول محاسبه شده است. جدول ۵ نتایج تحلیل حساسیت مدل را نشان می‌دهد. مدل فصل خشک از بین پارامترهای مدل، بیشترین حساسیت را به ضریب و توان عمق در رابطه‌ی دبی-اشل، و نرخ هوادهی دارد.

همچنین از بین متغیرهای ورودی به مدل، مدل بیشترین حساسیت را به ترتیب به دبی سرشاخه، دبی منابع نقطه‌ای و جریان در تماس با فضولات و زباله‌ها دارد. حساسیت مدل فصل خشک به پارامترهای مدل و متغیرهای ورودی، حاکی از این است که، در فصل خشک کنتیک واکنش و فرآیند انتقال هر دو بر تغییرات کیفیت آب اثرگذار هستند. مدل اکسیژن محلول فصل‌تر بیشترین حساسیت را به دبی سرشاخه و توان سرعت دارد. همچنین حساسیت کمتری به پارامترهای مدل، از جمله نرخ حذف BOD دارد. دستیابی به چنین نتیجه‌ای نشان می‌دهد که، در فصل‌تر، اثر انتقال بر تغییرات غلظت پارامترهای کیفی بیش از اثر واکنش می‌باشد.

اما مدل نیتروژن آلی و همچنین فسفر غیر آلی در مرحله صحت‌سنجی دارای خطای قابل توجهی هستند. بررسی‌ها نشان داد که تغییر ضرایب کالیبراسیون به حدود حداقل و حداکثر و همچنین تغییر در دبی و غلظت منابع آلاینده نیز نمی‌تواند سبب بهبود این مدل‌ها در دوره صحت‌سنجی شود. تغییر در سرعت جریان می‌تواند نرخ هیدرولیز، ته‌نشینی و تعلیق مواد آلی را تحت تأثیر قرار دهد، اما با توجه به اینکه دبی جریان در دوره صحت‌سنجی تغییرات چندانی نسبت به دوره کالیبراسیون ندارد، علت بروز این خطا را نمی‌توان وابسته به مشخصات جریان دانست. علت بروز چنین خطایی می‌تواند ورود آلاینده‌هایی باشد (برای مثال تخلیه توسط تانکرهای حمل فاضلاب به رودخانه زرینه‌رود؛ مشاهده شده در بازدید میدانی آذر سال ۱۳۹۵) که نمی‌توان محل و مقدار آن‌ها را پیش‌بینی کرد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی و کیفیت آب رودخانه در دوره صحت‌سنجی به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده است. بررسی تغییرات مکانی غلظت متغیرهای کیفیت آب در آذرماه نشان می‌دهد که بعد از ورود فاضلاب کارخانه قند در شهر میاندوآب به رودخانه (۲/۲۴ کیلومتری از پایین‌دست)، غلظت اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی افزایش یافته و سبب وقوع شرایط نامساعد کیفیت آب در این پایین‌دست این محل می‌شود.

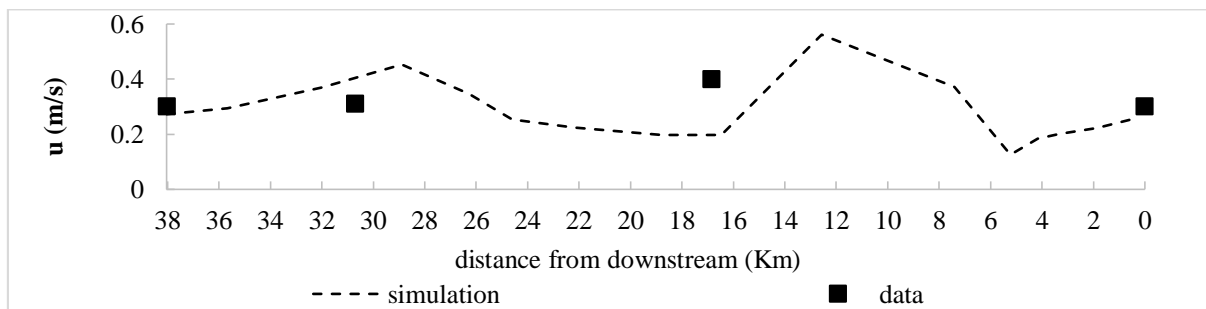
۳-۳- تحلیل حساسیت مدل

با توجه به اهمیت مقدار اکسیژن محلول موجود در تأمین شرایط کیفی مناسب برای حیات آبیان و همچنین تأثیرپذیری و تأثیرگذاری

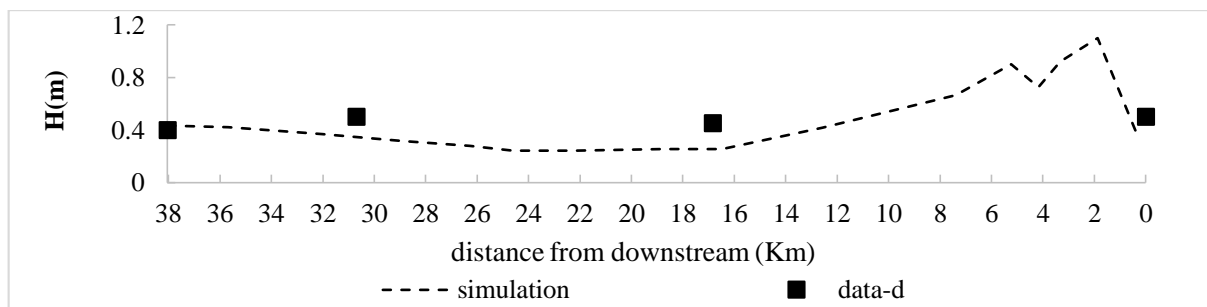
Table 4- The amount of error indicators for predicted vs. measured water quality parameters

جدول ۴- مقدار شاخص‌های خطا بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده (صحت‌سنجی)

Error indicators	water quality parameters											
	DO (mg/l)	BOD _u (mg/l)	EC (µmhos/cm)	NO ₃ (mg N/l)	NH ₄ (mg N/l)	Organic N (mg N/l)	TN (mg N/l)	Organic P (mg P/l)	Inorganic P (mg P/l)	TP (mg P/l)	pH	ALK (mg CaCO ₃ /l)
RMSE	0.74	1.59	52.66	0.34	0.07	4.66	5.01	0.66	0.55	1.27	0.35	16.66
MAPE	1.95	11.61	9.85	3.43	5.87	17.48	13.44	8.49	21.21	8.22	0.82	2.72
PBIAS	5.86	12.62	-7.16	-10.27	0.03	-52.44	-4031	-3.72	-63.64	-24.67	-3.27	6.20



الف



ب

Fig. 5- Validation of Hydraulic model in Zarrineh River for data on December -2016
 شکل ۵- صحت سنجی هیدرولیک رودخانه زرینه رود با داده های ماه آذر سال ۱۳۹۵؛ الف) سرعت جریان، ب) عمق جریان

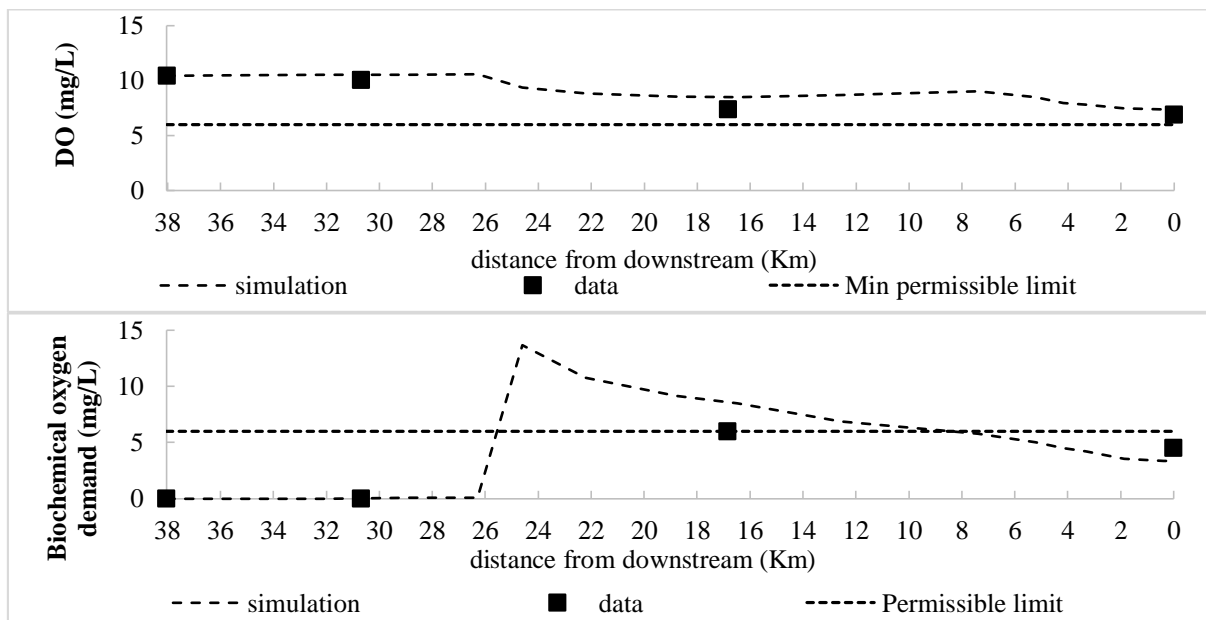


Fig. 6- Validation of water quality in Zarrineh River for data on December -2016
 شکل ۶- صحت سنجی کیفیت آب رودخانه زرینه رود با استفاده از داده های ماه آذر در سال ۱۳۹۵

Table 5- Sensitivity analysis for the data on Zarrineh-rud River in 2016

جدول ۵- آنالیز حساسیت مدل کیفیت آب رودخانه زرینه رود در سال ۱۳۹۵

Dry season		Wet season	
Parameter	Slope of the model's sensitivity curve	Parameter	Slope of the model's sensitivity curve
Depth coefficient	-5.38	Headwater flow	0.94
Depth exponent	-3.93	Velocity exponent	0.56
Headwater flow	3.64	Flow in contact with Animal Waste	-0.47
Reaeration rate	2.23	Depth exponent	-0.43
Point sources flow	-1.83	Velocity coefficient	0.38
Flow in contact with Animal Waste	-1.82	CBOD oxidation rate	-0.37
Bottom plant growth rate	1.72	Return flow	-0.28
Bottom plant coverage	1.31	Depth coefficient	-0.27
Nitrification rate	-1.10	Headwater CBOD	-0.12
CBOD oxidation rate	-1.02	Reaeration rate	0.08
Return flow	-0.74	Headwater NH ₄ ⁺	-0.06
Velocity coefficient	0.67	Nitrification rate	-0.05
Velocity exponent	0.57	Point sources flow	0.02
Headwater CBOD	-0.32	Bottom plant coverage	0.02
Headwater NH ₄ ⁺	-0.02	Bottom plant growth rate	0.00

Table 6- The contribution of pollution sources to river pollution

جدول ۶- سهم منابع آلاینده در آلودگی رودخانه

Month (season)	Water quality Variable	Pollution sources	The contribution of pollution sources to river pollution (%)	Major source of river pollution
April (spring)	TN	PS	2.7	Pile of Tr&AW
		Pile of Tr&AW	92.0	
		Dis Agr Act	5.3	
August (summer)	NH ₄	PS	1.4	Pile of Tr&AW
		Pile of Tr&AW	90.3	
		Dis Agr Act	8.3	
December (fall)	TN	PS	59.4	Pile of Tr&AW+ WWTP
		Pile of Tr&AW	33.9	
		Dis Agr Act	6.7	
	TP	PS	47.0	Pile of Tr&AW+ WWTP
		Pile of Tr&AW	49.8	
		Dis Agr Act	3.2	
BOD	PS	99.9	Sugar Factory Sewage	
	Pile of Tr&AW	0.1		
	Dis Agr Act	0		
December (fall)	TN	PS	16.9	Pile of Tr&AW
		Pile of Tr&AW	83.1	
		Dis Agr Act	0	
December (fall)	TP	PS	91.7	WWTP
		Pile of Tr&AW	8.3	
		Dis Agr Act	0	

PS: Point source;

Dis Agr Act: Discharges from agricultural activities;

Pile of Tr&AW: Pile of trashes and animal waste;

WWTP: Wastewater treatment plant

به عبارتی روشن در فصول تر، متأثر از کاهش دمای هوا و آب، نرخ واکنش‌ها کاهش یافته و آنچه در تعیین غلظت پارامترهای متعدد کیفی در مکان‌های مختلف اثرگذار خواهد بود، بیشتر متأثر از پدیده انتقال است.

۳-۴- تعیین سهم منابع آلاینده رودخانه زربینه رود

تعیین نوع آلودگی آب رودخانه و در ادامه تعیین سهم منابع آلاینده در آلودگی آب رودخانه را می‌توان از گام‌های اساسی برای شناسایی و کنترل آلودگی رودخانه‌ها برشمرد. نتیجه بررسی تأمین و یا عدم تأمین شرایط استاندارد کیفیت آب برای حیات آبریان رودخانه زربینه رود در فصل‌های مختلف نشان می‌دهد که غلظت نیتروژن کل در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز و سفر کل در فصل تابستان و پاییز بیش از حدود استاندارد توصیه شده برای آبریان است و علاوه بر این غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در فصل پاییز و آمونوم در فصل تابستان در برخی از مقاطع رودخانه به بیش از حدود مجاز برای آبریان می‌رسد و غلظت اکسیژن محلول رودخانه در فصل تابستان در پایین‌دست به کمتر از ۴ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد که کمتر از حدود توصیه شده است (شکل‌های ۴ و ۶). به منظور تعیین سهم منابع آلاینده، ابتدا شدت جرمی ورودی از منابع آلاینده محاسبه و در ادامه سهم هر منبع نسبت به کل آلودگی ورودی به رودخانه محاسبه گردید. در جدول ۶ سهم منابع آلاینده در آلودگی رودخانه زربینه رود ارائه شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی فصولات و زباله‌های انباشته شده در حاشیه رودخانه سهم قابل توجهی از مقدار کل آلودگی ورودی به رودخانه (انواع مواد مغذی) را در فصول مختلف سال دارد. از بین منابع نقطه‌ای و آلاینده‌های کشاورزی، منابع نقطه‌ای سهم بیشتری را نسبت به آلاینده‌های کشاورزی در میزان آلودگی ورودی به رودخانه در فصل تابستان و پاییز دارند و در فصل بهار سهم آلاینده‌های کشاورزی بیشتر است. لازم به ذکر است که هرچند به‌واسطه جریان برگشتی از فعالیت‌های کشاورزی مقادیر قابل توجهی از مواد مغذی و غیرمغذی وارد رودخانه می‌شود؛ اما در این رودخانه، تنها منابع آلاینده نقطه‌ای و همچنین فصولات و زباله‌های انباشته شده در حاشیه رودخانه سبب وقوع شرایط نامناسب کیفیت آب برای آبریان می‌شوند.

۳-۵- کنترل آلودگی آب رودخانه

کنترل منابع آلاینده از مبدأ اقدامی است که در این تحقیق با توجه به شرایط و نتایج به دست آمده، مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول ۷ اقدامات مختلف مورد بررسی را برای فصول مختلف سال نشان می‌دهد. در خصوص فصل پاییز لازم به ذکر است که، در این فصل غلظت نیتروژن و فسفر کل، در جریان سرشاخه بسیار بیشتر از حداکثر مقدار مجاز بر اساس استانداردها بوده و کنترل منابع آلاینده در پایین‌دست، کمک چندانی به کاهش غلظت مواد مغذی نخواهد کرد. در ادامه ارزیابی اثر اجرای سناریوهای ارائه شده بر تغییرات غلظت متغیرهایی که در فصل‌های مختلف خارج از محدوده‌ی مجاز برای حیات آبریان بودند انجام شده است (شکل‌های ۷ تا ۹).

Table 7- Scenarios for river water quality improvement
جدول ۷- اقدامات بهبود کیفیت آب رودخانه

Scenarios	Month (season)	Description
A	April (spring)	avoiding the contact of flows with the pile of trash & animal waste
B	August (summer)	controlling point sources (Sugar Factory Sewage and WWTP) and avoiding the contact of flows with the pile of trash & animal waste
C	December (fall)	controlling point sources (Sugar Factory Sewage)

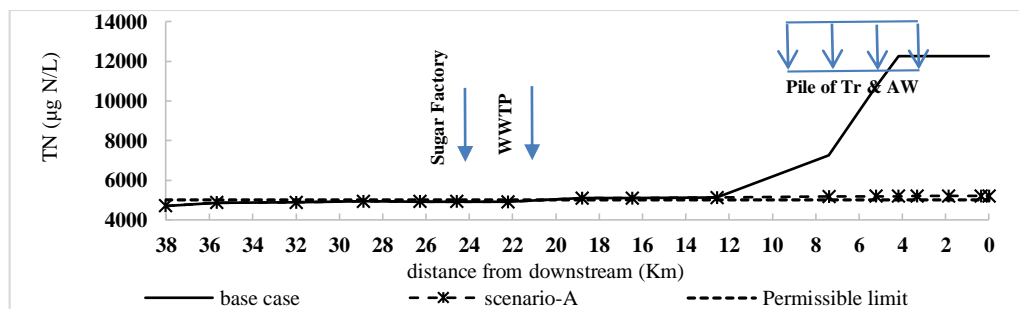


Fig. 7- Assessing the effect of implementation of scenario (A)
شکل ۷- ارزیابی اثر اجرای سناریو (A)

می‌توان شرایط استاندارد کیفیت آب برای حیات آبریان را فراهم نمود. لازم به ذکر است که، مقدار استاندارد اکسیژن خواهی بیوشیمیایی پنج روزه برای تخلیه به آب‌های سطحی بر اساس استاندارد تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی ایران برابر با ۳۰ میلی‌گرم بر لیتر است که مقدار تخلیه شده توسط این واحد صنعتی در فصل پاییز ۴۷۰ میلی‌گرم بر لیتر، (۱۵/۶ برابر حد استاندارد تخلیه) می‌باشد. بر اساس نتایج مدل‌سازی، محدود نمودن BOD_5 فاضلاب کارخانه قند به مقدار ۲۱۰ میلی‌گرم بر لیتر در شرایط کنونی، سبب می‌گردد تا غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی رودخانه در حد استاندارد برای حیات آبریان بماند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، با اجرای اقدامات تعریف شده در این تحقیق که در واقع کنترل منابع آلاینده اصلی رودخانه در فصول مختلف سال می‌باشد، می‌توان شرایط مطلوب کیفیت آب را برای حیات آبریان فراهم نمود. با اجرای اقدام A فصل بهار و اقدام B در فصل تابستان غلظت این متغیرهای کیفیت آب نیز تا حد استاندارد برای حیات آبریان کاهش می‌یابد و سلامت کیفیت آب رودخانه تأمین می‌گردد (به ترتیب شکل ۷ و شکل ۸). ورود فاضلاب تصفیه نشده کارخانه قند (واقع در ۲۴/۲ کیلومتری از پایین‌دست) در فصل پاییز سبب شده تا غلظت اکسیژن خواهی بیوشیمیایی در آب به بیش از حد استاندارد برای حیات آبریان برسد. با اجرای اقدام C در این فصل

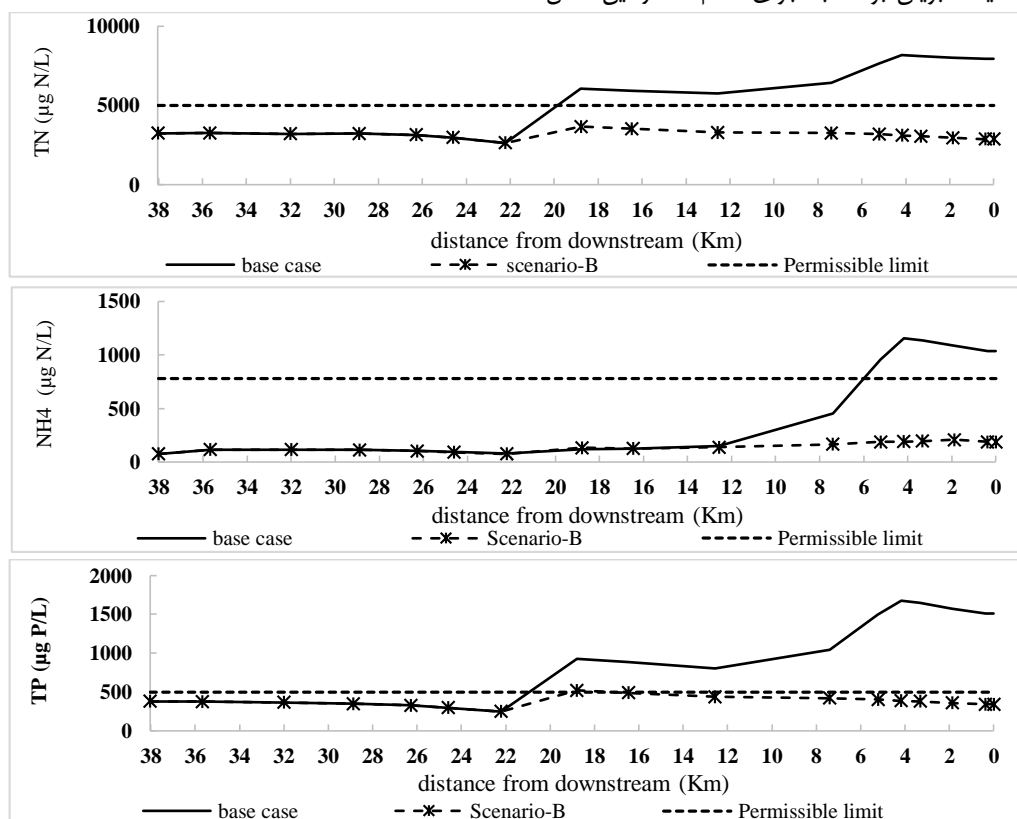


Fig. 8- Assessing the effect of implementation of scenario (B)

شکل ۸- ارزیابی اثر اجرای سناریو (B)

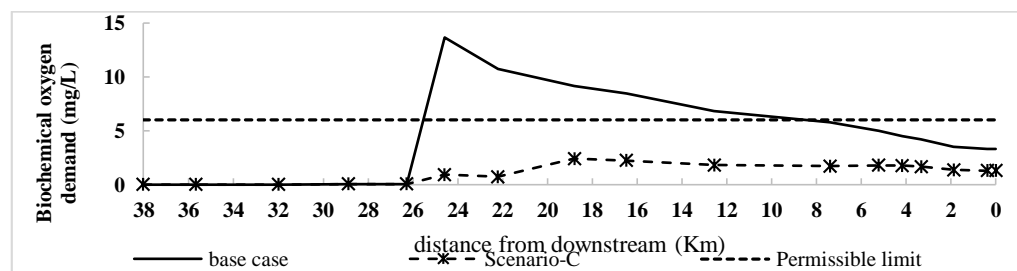


Fig. 9- Assessing the effect of implementation of scenario (C)

شکل ۹- ارزیابی اثر اجرای سناریو (C)

۴- نتیجه گیری و پیشنهادها

رودخانه‌ها به‌عنوان یکی از منابع طبیعی که تمرکز گسترده‌ای از فعالیت‌های بشر روی آن وجود دارد، پذیرنده حجم وسیعی از آلودگی‌ها می‌باشند. در این تحقیق روند کامل فرآیند مدیریت کیفیت آب رودخانه با هدف، شناسایی و کنترل آلودگی رودخانه به‌منظور تأمین کیفیت آب برای حیات آبریزان در رودخانه زرینه‌رود در سال ۱۳۹۵ صورت گرفت. بخش انتهایی رودخانه زرینه‌رود به دلیل اهمیت اکولوژیک، تنوع آبریزان (WIRI (a), 2016)، اتصال به دریاچه ارومیه، تأمین آب تالاب قره‌قشلاق، تخلیه بیش از حد مجاز آلاینده‌ها و وضعیت نامساعد کیفیت آب در سال‌های اخیر (Lar Consulting Engineers, 2009) به عنوان محدوده مطالعاتی این تحقیق انتخاب شد. حفظ توأم کمیت و کیفیت جریان آب در ایستگاه‌های پایین‌دست رودخانه روی اکوسیستم‌های تالابی تغذیه شونده از رودخانه (نظیر تالاب قره‌قشلاق و دریاچه ارومیه)، اثر مثبت داشته و علاوه بر این سبب حفاظت از گونه‌های متنوع آبریزان موجود در محدوده گردد. نتایج کلیدی به دست آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که:

- آلودگی به مواد مغذی (انواع نیتروژن و فسفر) و مواد آلی کربنی (اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی) سبب شده تا در برخی از فصول سال و در برخی از بازه‌های رودخانه، شرایط کیفیت آب برای حیات گونه‌های شاخص ماهیان مساعد نباشد،

- نتایج تحلیل حساسیت مدل کیفیت آب رودخانه نشان می‌دهد که در فصل کم آب، کنتیک واکنش توأم با فرآیند انتقال بر تغییر غلظت متغیرهای کیفیت آب اثرگذار است و در فصل پرآب، اثر فرآیند انتقال غالب است،

- تحلیل سهم منابع آلاینده رودخانه که سبب وقوع شرایط نامساعد کیفیت آب برای آبریزان می‌شود، نشان داد که در تابستان و پاییز (فصول خشک و کم آب) منابع نقطه‌ای سهم بیشتری را نسبت به آلاینده‌های کشاورزی در میزان آلودگی ورودی به رودخانه و در فصل بهار سهم آلاینده‌های کشاورزی با تشدید رواناب بیشتر است. علاوه بر این، فصولات و زباله‌های انباشته شده در حاشیه رودخانه زرینه‌رود سهم قابل توجهی از مقدار کل آلودگی ورودی به رودخانه (انواع مواد مغذی) را در فصول مختلف سال دارد،

- با اجرای اقدامات کنترل از مبدأ تعریف شده در فصول مختلف سال، امکان تأمین شرایط مطلوب کیفیت آب برای حیات آبریزان (گونه‌های شاخص) بدون هیچ اقدام سازهای یا اقدامی در خصوص هیدرولوژی و مورفولوژی رودخانه وجود دارد.

از نتایج به دست آمده این تحقیق می‌توان در اعمال کنترل‌های کیفیت آب در زمان و محل مناسب به منظور اثر بخشی بر شرایط کلی رودخانه

زرینه‌رود استفاده کرد. در این تحقیق حدود ارائه شده استانداردهای کیفیت آب کلی بوده و برای یک گونه خاص نیست. پیشنهادهای آتی برای ادامه این تحقیق به شرح موارد زیر می‌باشد:

- بررسی الزامات زیستگاه‌های مختلف (Run, Riffle, Pool) رودخانه برای گونه‌های شاخص رودخانه در بازه‌های مختلف آن و ارزیابی اقدامات تأمین زیستگاه مناسب برای آبریزان،

- ارزیابی اثرات مخزن سد بالادست بر کیفیت آب جریان رودخانه در پایین‌دست،

- گسترش مدل‌سازی هیدرولیک و کیفیت آب به پیکره/پیکره‌های آبی پایین‌دست رودخانه

پی‌نوشت‌ها

- 1- Root Mean Square Error
- 2- Mean Absolute Percentage Error
- 3- Percentage Bias

۵- مراجع

- ANZECC (2000) Australian and New Zealand guidelines for fresh and marine water quality. Australian and New Zealand environment and conservation council and agriculture and resource management council of Australia and New Zealand, Canberra:1-103
- Bhatnagar A, Devi P (2013) Water quality guidelines for the management of pond fish culture. International Journal of Environmental Sciences 3(6):1980-1990
- Bhatnagar A, Jana S, Garg S, Patra B, Singh G, Barman U (2004) Water quality management in aquaculture. Course Manual of summer school on development of sustainable aquaculture technology in fresh and saline waters, CCS Haryana Agricultural, Hisar (India):203-210
- Camargo R, Calijuri M, Santiago A, and Couto E (2010) Water quality prediction using the QUAL2Kw model in a small karstic watershed in Brazil. Acta Limnologica Brasiliensia 22(4):486-498
- Chapra S (2008) Surface water-quality modeling. Waveland press, 835P
- Cox B (2003) A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers. Science of the Total Environment 314:303-334
- EEC (1978) On the quality of fresh waters needing protection or improvement in order to support fish life. Official Journal

- Nazari H (2005) Effect of pollutant sources on water quality in Shafa River. M.Sc.Thesis, School of Civil & Environmental Engineering, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- Nooshadi N, Hatami Zadeh M (2011) Determination and simulation of water quality in the Kor River using Qul2k model. Iranian Journal of Irrigation & Drainage 3(4):338-349 (In Persian)
- Pelletier G, Chapra S (2005) QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1), A modeling framework for simulating river and stream water quality, retrieved 10 May 2005 from: <http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models>
- Pour-Karimi A (2006) Recognition of Gharagagh River polluting resources and its impact on river water quality using the QUAL2k model. M.Sc.Thesis, School of Civil & Environmental Engineering, University of Shiraz (In Persian)
- Rafiee M, Ali A, Mohammad A, Moazed H, Lyon S, Jaafarzadeh N, Zahraie B (2014) A case study of water quality modeling of the Gargar River, Iran. Journal of Hydraulic Structures 1(2):10-22
- Shahriari F (2010) The effect of water flow changes on Karoun River quality parameters using QUAL2k model. M.Sc.Thesis, School of water sciences, University of Shahid Chamran (In Persian)
- Toluie Z (2013) Assessing the development of irrigation systems under pressure to increase the discharge of Zarrineh River into Urmia Lake. M.Sc.Thesis, School of Agricultural Engineering, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- USEPA (1986) Quality criteria for water. Gold book quality criteria, EPA 440/5-86-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington
- USEPA (2000) Nutrient criteria technical guidance manual: rivers and streams. Washington
- WERI (a) (2016) Determination of the environmental flow on wetlands and rivers of the Urmia lake basin. Hydraulic Studies, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- WERI (b) (2016) Determination of the environmental flow on wetlands and rivers of the Urmia lake basin. Hydrological Studies, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- WERI (c) (2016) Determination of the environmental project on wetlands and rivers of the Urmia lake basin. Ecological Studies, University of Tarbiat Modares (In Persian)
- Ye H, Guo S, Li F, Li G (2013) Water quality evaluation in tidal river reaches of Liaohe River estuary, China
- EPA (2003) Aquaculture management and the Environment Protection (Water Quality) Policy. Official Journal
- Farasvandab Consulting Engineers (2009) Project for upgrading the water balance of the study area of Lake Urmia watershed, water balance report. West Azarbaijan Regional Water Authority, Office of Basic Water Resources Studies (In Persian)
- Hashemi B (2009) Pollution measurement and modeling of water quality in Shapur, Dalaki and Hilla rivers. M.Sc.Thesis, School of Civil & Environmental Engineering, University of Shiraz (In Persian)
- Hashemi H, Ghasemi Zeyarani E, Ranjkesh Y (2010) Partitioning the load from the sub-basins into the AmirKabir Dam reservoir using the Qual2k model. Journal of Environmental Studies 37(59):1-8 (In Persian)
- Hemond H, Fechner E (2014) Chemical fate and transport in the environment. Elsevier, Academic Press, 338P
- Hoseini P, Hoseini Y (2016) Changes in self-purification capacity of the Ahvaz Karun River in 2008 and 2014 using QUAL2Kw model. Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering 49(1):35-45 (In Persian)
- Jafarzadeh-Haghighi N, Tavasol M H, Barootkoob A (2005) Investigation of Karoon River water quality variations using Qual2E program. Journal of Iran-Water Resources Research 1(2):85-96 (In Persian)
- Kannel P, Lee S, Lee Y, Kanel S, Pelletier G (2007) Application of automated QUAL2Kw for water quality modeling and management in the Bagmati River, Nepal. Journal of Ecological Modelling 202(3):503-517
- Lar Consulting Engineers (2009) Identification, control and prevention of pollution of the Zarrineh River. Iran Environment Organization (In Persian)
- Mathew M, Yao Y, Cao Y, Shodhan K, Ghosh I, Bucci V, Hellweger F (2011) Anatomy of an urban waterbody: A case study of Boston's Muddy River. Journal of Environmental pollution 159(8):1996-2002
- Mirbagheri A, Mahmood SH, Khezri M (2010) Modeling of nitrogen and phosphorus changes along the Chalus River in 2008 using Qual2k software. Journal of Civil Environmental Engineering 40(3):49-60 (In Persian)
- Moriasi D, Arnold J, Van Liew M, Bingner R, Harmel R, Veith T (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE 50(3):885-900

programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China. Science of the Total Environment 431:278-285

using a revised QUAL2K model. Journal of Chinese Geographical Science 23(3):301-311

Zhang R, Qian X, Li H, Yuan X, Ye R (2012) Selection of optimal river water quality improvement