کنگره علوم و مهندسی آب و فاضلاب ایران
دانشگاه تهران، تهران
۲۶ و ۲۷ بهمن‌ماه ۱۳۹۵

1134P-NWWCE

شبیه‌سازی کیفیت آب رودخانه در شرایط بحرانی و اثربخشی اقدامات مدیریتی (مطالعه موردی: زرینه‌رود)

محمدرضا بیگلری[۱]، سمیه سیما[۲]، مطهره سعادتپور[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه علم و صنعت

Mohammadreza.biglari@modares.ac.ir

خلاصه

زرینه‌رود به‌عنوان منبع اصلی تأمین‌کننده آب دریاچه ارومیه و برخوردار از تنوع زیستی غنی می‌باشد که در سال‌های اخیر علاوه بر افزایش برداشت‌های بی‌رویه با مشکلات کیفی ناشی از تخلیه زهاب‌ها و سایر منابع آلاینده مواجه بوده است. در این تحقیق به منظور تحلیل شرایط کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود در شرایط بحرانی، یک دوره نمونه‌برداری در فصل خشک از رودخانه صورت گرفته و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی شامل DO، BOD، PH، TN، TP و دما با استفاده از مدل Qual2kw انجام شد. سپس چندین سناریو به‌منظور بهبود شرایط کیفی رودخانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که مدل قابلیت خوبی در شبیه‌سازی کمی و کیفی رودخانه دارد و اثربخشی سناریوی افزایش جریان سرشاخه در قیاس با کنترل آلاینده از منبع ناچیز است. همچنین اتخاذ ترکیب این دو سناریو می‌تواند بهبود چشمگیری در کیفیت آب رودخانه در شرایط بحرانی ایجاد کند.

کلمات کلیدی: زرینه‌رود، شرایط بحرانی کیفی، الزامات کیفیت آب، Qual2kw، کنترل منابع آلاینده

۱. مقدمه

مصرف‌کنندگان منابع آب سطحی بخصوص رودخانه‌ها اغلب در حال رشد و توسعه هستند. چنانچه هم‌زمان با رشد و توسعه، به مسائل و مشکلات فراروی محیط‌زیست بخصوص کیفیت منابع آب توجه نشود نه‌تنها این امر توسعه‌ای را در پی نخواهد داشت بلکه معضلات و پیامدهای جبران‌ناپذیری را در پی خواهد داشت. شرایط هیدرولوژیکی، بیولوژیکی، ژئومورفولوژیکی، فیزیک زیستگاه و کیفیت آب رودخانه به‌طور هم‌زمان بر حیات آبزیان مؤثر هستند. عدم وجود شرایط مساعد در یکی از عوامل ذکر شده محیط‌زیست اکوسیستم آبی را دچار مخاطرات جدی خواهد کرد[۱]. نتایج بررسی وضعیت کیفی رودخانه‌های داخل کشور نشان می‌دهد که اغلب، کیفیت آب رودخانه‌ها پس از عبور از مناطق با کاربری شهری، روستایی، صنعتی و کشاورزی به واسطه‌ی ورود آلاینده‌ها کاهش می‌یابد و این کاهش کیفیت آب اغلب در فصول خشک که حداقل جریان برقرار است اتفاق می‌افتد[۲، ۳، ۴، ۵].

اکسیژن محلول در آب یک پارامتر اساسی و بسیار مهم است که به‌تنهایی می‌تواند نماینده‌ای از سلامت آب برای آبزیان باشد، کاهش اکسیژن محلول اغلب در دوره کم‌آبی مشهود است، اثر کاهش اکسیژن محلول در بدترین شرایط، منجر به وقوع شرایط بی‌هوازی می‌گردد، این شرایط تعادل اکوسیستم را برهم زده و همراه با مرگ‌ومیر ماهی‌ها، بوی بد و منظره‌ی نامناسب می‌گردد [۶]. محققین دیگر سلامت کیفی رودخانه (قابل‌قبول) را، رسیدن به حد آستانه‌ی (قابل‌قبول بر اساس استانداردهای حیات آبزیان) پارامترهای کلیدی اکسیژن محلول (DO)، نیاز اکسیژن خواهی بیوشیمیایی کربنی (CBOD)، نیتروژن کل (TN)، فسفر کل (TP)، دما (TEMP) و pH است[۷]. حد کشنده اکسیژن محلول برای ماهی‌های سالمون کمتر از ۳

میلی‌گرم بر لیتر و برای ماهی‌های سرد آبی بر اساس استاندارد آژانس حفاظت محیط‌زیست آمریکا برابر با ۴ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شده است [۸]. حداقل غلظت DO برای حیات آبزیان بر اساس استاندار کیفیت عمومی آب‌های ایران برابر با ۵ میلی‌گرم بر لیتر است. دمای مجاز برای ماهیان گرم آبی و سرد آبی به ترتیب برابر با ۲۸/۳ و ۲۰ درجه سانتی گراد است[۹]. محدوده‌ی مجاز pH برای حیات آبزیان بین ۸/۵ – ۶/۵ است و حد مطلوب BOD برای ماهی‌های سالمون و کپور به ترتیب برابر با ۳ و ۶ میلی‌گرم بر لیتر است. EPA حداکثر مقدار مجاز TN و TP را به ترتیب برابر با ۱/۵ و ۰/۰۷۵ میلی‌گرم بر لیتر توصیه می‌کند.

ارتباط پیچیده‌ای بین بارهای آلاینده از منابع مختلف و اثر آن بر کیفیت آب پذیرنده وجود دارد که به‌خوبی توسط مدل‌های ریاضی تشریح می‌گردد[۷]. مدل Qual2kw ازجمله مدل‌هایی که در مطالعات بسیاری از آن استفاده شده است[۲، ۳، ۴، ۵، ۷، ۱۰، ۱۱]. ساخت یک مدل مناسب کیفیت آب با دقت مناسب و قابل‌قبول مستلزم شناخت دقیق منطقه مورد مطالعه و تأمین داده‌های مورد نیاز آن می‌باشد که با نمونه‌برداری از و بازدید میدانی می‌توان داده‌های مورد نیاز را تأمین نمود. با کنترل منابع آلاینده، افزایش جریان و هوادهی موضعی می‌توان به شرایط کیفی مطلوب برای رودخانه دست‌یافت. بررسی این راهکارها روی کیفیت آب رودخانه باگماتی نشان داد که با ترکیب این راهکارها برای حفظ معیارهای کیفیت آب در حد مجاز مناسب است[۷]. مطالعات ژانگ و همکاران در رودخانه هونگ کی چین نشان داد که استفاده از سیستم‌های تصفیه‌ی آب در رودخانه هم چون بستر زیست‌محیطی عمودی، بستر شناور اکولوژیکی و اکسیداسیون (تماس زیستی)، می‌تواند سبب کاهش ۳۰ درصدی غلظت BOD و انواع نیتروژن در آب شود[۱۰]. متیو و همکاران به‌منظور کمک به بهبود و ارزیابی موفقیت طرح احیای رودخانه‌ی گل‌آلود بوستون از مدل Qual2kw استفاده کردند. شناسایی و فهم مشکل کیفیت آب رودخانه‌ی گل‌آلود بوستون قبل از احیای آن، هدف اصلی این طرح بود. مقادیر قابل توجهی فاضلاب به این رودخانه تخلیه می‌شود. نتایج نشان داد که اثر این فاضلاب‌ها بر تخریب کیفیت آب رودخانه و یا به‌عبارت‌دیگر کاهش اکسیژن محلول رودخانه قابل‌ملاحظه نیست و بارگذاری داخلی رودخانه ناشی از وجود جلبک، رسوبات کف بستر و همچنین فضولات پرندگان آبزی، عامل اصلی در الگوی مکانی کیفیت آب رودخانه است[۱۱].

هدف از این تحقیق شبیه‌سازی کیفیت آب زرینه‌رود در شرایط بحرانی و بررسی اثر اقدامات مدیریتی غیر سازه‌ای بر بهبود کیفیت آب رودخانه است. به‌منظور تأمین داده‌های مورد نیاز، یک دوره نمونه‌برداری کیفی و بازدید میدانی از رودخانه در شهریور ماه ۱۳۹۵ صورت گرفت. پس از ساخت و کالیبراسیون مدل، اثر چند سناریوی مدیریت غیر سازه‌ای در بهبود کیفیت آب رودخانه مورد بررسی قرار گرفت.

۲. روش تحقیق

۱.۲ منطقه مورد مطالعه

زرینه‌رود یکی از مهم‌ترین و طویل‌ترین رودخانه‌های حوضه آبریز زرینه‌رود (با مساحتی در حدود ۱۱۷۸۰ کیلومترمربع) ارومیه است. تقریباً ۵۴ درصد از سطح حوضه تحت کشت دیم و ۳/۶ از اراضی حوضه کشت آبی و ۴۰ درصد از حوضه دارای کاربری مرتع است [۱۲]. در این رودخانه، حدود ۱۲ گونه ماهی شناسایی شده که ۱۱ گونه آن مربوط به خانواده کپور ماهیان بوده و یک گونه مربوط به خانواده سگ‌ماهیان جویباری است. هیچ‌یک از گونه‌ها در لیست قرمز IUCN نبودند. از بین گونه‌های صید شده ۴ گونه بومزاد، ۴ گونه بومی و بقیه غیر بومی بوده‌اند [۱۳]. در این تحقیق بخش انتهای رودخانه زرینه‌رود حدفاصل بند انحرافی نوروزلو تا ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد به‌منظور شبیه‌سازی کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفت. این بخش از رودخانه دارای طول تقریبی ۳۸ کیلومتر می‌باشد. لیلان چای تنها شاخه‌ی فرعی است که در این محدوده به زرینه‌رود ملحق می‌گردد. در حال حاضر لیلان چای کاملاً خشک شده و ارتباط آن با زرینه‌رود در شهر میاندوآب با احداث جاده کاملاً قطع شده است.

۲.۲ تامین و جمع آوری داده‌ها

۱.۲.۲ داده‌های هواشناسی

از داده‌های متوسط ماهانه، درجه حرارت هوا، دمای نقطه‌ی شبنم و سرعت باد ایستگاه هواشناسی میاندوآب که نزدیک‌ترین ایستگاه به بازه مطالعاتی است برای مدل‌سازی استفاده شد. درصد پوشش ابر با توجه به مشاهدات میدانی برابر با صفر درصد در نظر گرفته شد. تابش خورشیدی توسط مدل محاسبه و مورد استفاده قرار گرفت.

۲.۲.۲ داده‌های هیدرولیکی رودخانه

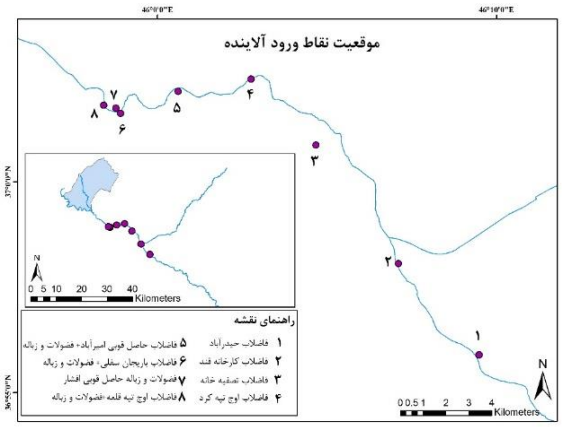
داده‌های هیدرولیکی رودخانه شامل شکل مقطع، ضریب زبری و مشخصات جریان (دبی، سرعت، عمق) می‌باشد. شکل مقاطع، ضریب زبری و دبی‌های محتمل رودخانه در نرم‌افزار HEC-RAS تعریف و پس از مدل‌سازی هیدرولیکی رودخانه ضرایب و توان‌های روابط دبی اشل و سرعت اشل استخراج شد. (جدول۱) داده‌های هیدرولیکی رودخانه را نشان می‌دهد.

جدول ۱. داده‌های هیدرولیکی رودخانه زرینه رود در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۷ [۱۴]

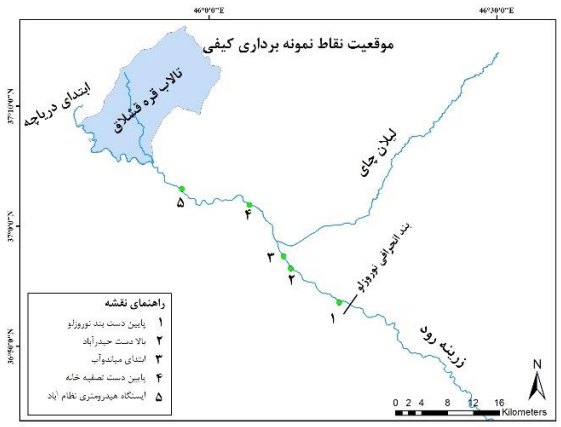
فاصله از پایین‌دست(km)	بازه	مقطع	سرعت		عمق		ضریب نسبت برداشت آب	مقدار برداشت آب (m^3/s)	ضریب آب برگشتی	ضریب زبری	دبی سرشاخه (m^3/s)
			ضریب	توان	ضریب	توان					
۳۸/۰۴	۰-۱	۱	۰/۱۶۲	۰/۳۵۵	۰/۲۱۳	۰/۴۷۷	۰/۴۲۱۲	۱/۲۴			
۳۳/۳۲	۱-۲	۲	۰/۱۸۴	۰/۳۱۵	۰/۲۰۸	۰/۴۸۱	۰/۱۸۱۶	۰/۵۵			
۲۷/۰۸	۲-۳	۳	۰/۲۶۳	۰/۳۴۱	۰/۱۵۶	۰/۴۷۶	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰			
۲۳/۶۹	۳-۴	۴	۰/۱۶۱	۰/۳۶۶	۰/۱۵۶	۰/۴۷۶	۰/۰۰۱۸	۰/۰۱			
۲۰/۷۱	۴-۵	۵	۰/۱۳۶	۰/۳۳۳	۰/۱۰۹	۰/۵۳۸	۰/۰۴۷۳	۰/۱۴			
۱۶/۱۰	۵-۶	۶	۰/۱۱۱	۰/۳۶۳	۰/۱۰۱	۰/۵۵۳	۰/۱۱۲۴	۰/۳۳			
۹/۰۴	۶-۷	۷	۰/۳۶۴	۰/۲۸۶	۰/۲۴۳	۰/۳۵۷	۰/۱۲۱۷	۰/۳۶			
۵/۷۵	۷-۸	۸	۰/۲۱۴	۰/۳۶۲	۰/۳۹۸	۰/۳۴۰	۰/۰۴۶۷	۰/۱۴	۰/۱	۰/۰۳۵	۷/۹۴
۴/۷	۸-۹	۹	۰/۰۶۵	۰/۴۳۸	۰/۵۵۲	۰/۳۲۲	۰/۰۲۰۰	۰/۰۶			
۳/۶۵	۹-۱۰	۱۰	۰/۱۰۲	۰/۳۷۷	۰/۴۱۹	۰/۳۴۸	۰/۰۰۷۵	۰/۰۲			
۳/۰۰	۱۱-۱۰	۱۱	۰/۱۰۹	۰/۳۹۵	۰/۵۵۲	۰/۳۲۴	۰/۰۳۰۲	۰/۰۹			
۰/۷۵	۱۲-۱۱	۱۲	۰/۱۱۶	۰/۴۱۳	۰/۶۸۵	۰/۳۰۱	۰/۰۰۹۲	۰/۰۳			
۰/۰۰	۱۲	۱۳	۰/۱۷۱	۰/۲۶۰	۰/۱۷۹	۰/۴۸۹	-	-			

۲.۲.۳ داده‌های کیفی رودخانه و منابع آلاینده

با توجه به طول محدوده‌ی مطالعاتی و محل ورود منابع آلاینده به رودخانه، ۵ ایستگاه نمونه‌برداری کیفی از رودخانه تعیین شد. با توجه اینکه هدف بررسی وضعیت کیفیت آب در شرایط بحرانی بود نمونه‌برداری از رودخانه در فصل خشک نقاط تعیین شده در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۷ صورت گرفت (شکل ۱). طی بازدیدهای میدانی و پایش کامل مسیر رودخانه ۱۳ منبع آلاینده نقطه‌ای برای رودخانه شناسایی شد که از ۸ نقطه وارد رودخانه می‌شوند (شکل ۲). عمده‌ترین منابع آلاینده عبارت‌اند از فاضلاب روستایی، فاضلاب کارخانه قند و تصفیه‌خانه آب و فاضلاب، زباله‌ها و فضولات انباشته شده در ساحل رودخانه در محل روستاها، مشخصات کمی و کیفی منابع آلاینده در (جدول ۲) ارائه شده است. (جدول ۳) نتایج حاصل از نمونه‌برداری کیفی رودخانه را نشان می‌دهد. بررسی داده‌های کیفی نشان می‌دهد که به‌جز BOD، pH و دما سایر پارامترها خارج از حدود توصیه شده برای حیات آبزیان می‌باشد.



شکل۱. موقعیت نقاط نمونه‌برداری کیفی از رودخانه زرینه‌رود



شکل۲. موقعیت ورود منابع آلاینده نقطه‌ای به رودخانه زرینه‌رود

جدول ۲. مشخصات کمی و کیفی منابع آلاینده رودخانه زرینه رود در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۷

منبع آلاینده	دبی (m^3/s)	دما (ºc)	DO (mg /l)	TDS (mg /l)	EC (µm/cm)	PH	BOD_5 (mg/l)	TN (mg/l)	TP (mg/l)	ALK (mg $caco_3$ /l)
فاضلاب روستایی(P1، P2، P3، P6، P7، P9، P11)	-۰/۱ ۰/۰۳	۲۱	۰/۵	۹۱۲	۱۸۱۶	۷/۵	۴۶	۱۱/۶۳	۰/۶۵	۵۶۰
فاضلاب کارخانه قند (P4)	۰/۰۲	۲۲	۲	۶۱۳	۱۲۰۰	۷	۴۶	۲/۳۱	۰/۷۱	۶۶۴
پساب تصفیه‌خانه آب و فاضلاب شهری میاندوآب (P5)	۰/۲	۲۸	۲/۲	-	۱۵۵۰	۷/۸	۷۹	۱۰۰/۷	۲۳/۶۹	۲۷۴
جریان در تماس با فضولات و زباله‌ها(P8، P10، P12، P13)	٪۱۰ جریان	۲۶	۵/۶	-	۵۷۸	۶/۹۹	۱/۸	۱۲/۹۸	۳/۳۸	۳۴۵/۸
جریان آب برگشتی (متوسط)	۰/۱۲۴	۲۹/۹	۴/۵۲	-	۶۳۰۰	۷/۱۴	۸۰	۱۲/۹۹	۱/۵۹	۳۹۶/۷

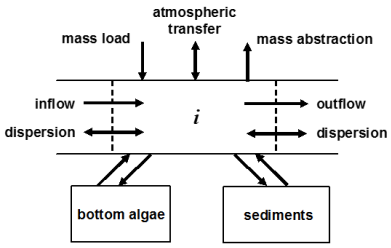
جدول۳. نتایج حاصل از نمونه‌برداری کیفی رودخانه زرینه‌رود در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۷

فاصله از پایین‌دست (km)	۳۸/۰۳۷	۳۰/۶۹	۲۵/۴۹	۱۶/۸۵	۰/۰۰
محل	پایین‌دست بند نورزلو	بالادست حیدرآباد	ابتدای میاندوآب	پایین‌دست تصفیه‌خانه	ایستگاه هیدرومتری نظام‌آباد
پارامتر					
TEMP(ºC)	۲۶/۶	۲۶/۰	۲۶/۰	۲۵/۷	۲۴/۴
DO(mg/l)	۹/۴	۷/۲۴	۷/۰۵	۶/۰۰	۳/۹۵
EC (µm/cm)	۳۱۰	۴۴۹	۴۲۷	۵۰۲	۶۰۵
TDS (mg/l)	۱۴۸	۲۱۲	۲۰۶	۲۴۳	۲۹۰
pH	۶/۷۰	۷/۶۷	۷/۶۷	۷/۵۰	۷/۳۶
BOD_5(mg/l)	۱/۲	۰/۲	۲/۰	۲/۶	۰/۴
TN(mg N/l)	۳/۲۳۰	۲/۶۵۰	۱۹/۸۲	۶/۴۷۰	۷/۵۵۰
TP(mg P/l)	۰/۴۲۰	۰/۱۴۰	۰/۹۸۰	۰/۹۸۰	۱/۶۰۰
ALK(mg caco3/l)	۱۸۰	۲۱۴	۲۱۰	۲۱۲	۲۴۴

۳.۲ ابزار مدلسازی

ویرایش جدیدی از برنامه معروف کیفیت آب رودخانه‌ها یعنی Qual2e است که از الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون اتوماتیک استفاده می‌کند و پس از شبیه‌سازی هیدرولیک رودخانه و دما، ۱۹ پارامتر کیفی را شبیه‌سازی می‌نماید. در مدل Qual2kw برای همه این پارامترها به‌جز جلبک¬های کف یک موازنه جرم کلی برای هر المان (شکل۳) به‌صورت زیر (بدون در نظر گرفتن hyporheic sediment zone) در نظر گرفته می‌شود:

$$\frac{dc_i}{dt} = \frac{Q_{i-1}}{V_i}C_{i-1} - \frac{Q_i}{V_i}C_i - \frac{Q_{ab,i}}{V_i}C_i + \frac{E'_{i-1}}{V_i}(C_{i-1} - C_i) + \frac{E'_i}{V_i}(C_{i+1} - C_i) + \frac{W_i}{V_i} + S_i \qquad (۱)$$



شکل ۳. بیلان جرم المان i از یک بازه [۱۵]

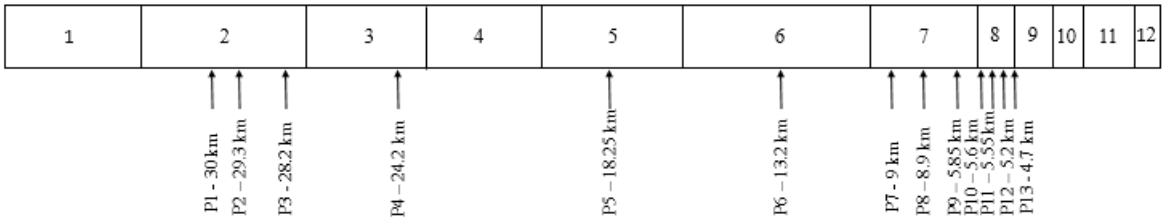
برای جلبک کف ترم‌های مربوط به انتقال جرم و جرم ورودی از سیستم حذف می‌گردد. در این رابطه، Q_i = دبی در بازه i (L/day)، $Q_{ab,i}$ = برداشت جریان از بازه i (L/day)، V_i = حجم بازه i (L)، W_i = بارگذاری خارجی د ر بازه i (mg/day)، S_i = چشمه یا چاه بر اثر عکس‌العمل‌ها یا انتقال جرم (mg/L/day)، E'_i = ضریب پخش حجمی بین بازه‌ها (L/day)، E'_{i-1} و E'_i ضریب پخش حجمی بین بازه‌های i و $i-1$ و i و $i+1$ (L/day)، C_i = غلظت پارامتر کیفی آب در بازه i ، t = زمان (day). برهمکنش این متغیرها و روابط ریاضی مربوط به این فرایندها و توضیحات بیشتر در راهنمای مدل ارائه شده است.

۴.۲ کالیبراسیون مدل

مدل Qual2kw از الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون اتوماتیک استفاده می‌کند. الگوریتم ژنتیک مورداستفاده در این برنامه به بیشینه کردن مقدار تابع هدف می¬پردازد. تابع هدف این زیر برنامه، می¬بایست تابعی نرمال باشد. تابع معکوس میانگین جذر مربعات خطای نرمال شده (RNRMSE) یکی از این توابع می‌باشد. در این تحقیق کالیبراسیون ۲۹ پارامتر به شرح جدول ۵ انجام شد.

۱.۴.۲ تعریف رودخانه

کل طول ۳۸ کیلومتری رودخانه با توجه به مقاطع موجود به ۱۲ بازه با طول‌های مشخص شده در (جدول۴) تقسیم شد. (شکل ۴) بازه‌های رودخانه و موقعیت منابع آلاینده نقطه‌ای را نشان می‌دهد. آلاینده کشاورزی در کل مسیر به رودخانه وارد می‌شود و فرض شده است که تمام برداشت‌های هر بازه در ابتدای آن صورت می گیرد.



شکل٤. موقعیت منابع آلاینده نقطه‌ای رودخانه زرینه‌رود

۲.۴.۲ فرضیات مدل‌سازی

ورودی‌های مورد نیاز مطابق با آنچه در بخش‌های قبل ارائه شده است وارد مدل شد. مقدار پوشش گیاهی کف و پوشش رسوبات کف بستر با توجه به مشاهدات میدانی به ترتیب برابر با ۳۰ و ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شد. تخلخل ذرات ضخامت لایه رسوب و تخلخل ذرات رسوب به ترتیب برابر با ۱۰cm و ۰/۶ فرض شد.

محدوده‌ی مجاز برای تغییرات پارامترهای کالیبراسیون (حداقل و حداکثر) برابر با پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شد. . در این مطالعه با توجه به اهمیت شبیه‌سازی اکسیژن محلول وزن ۵۰ برای آن در نظر گرفته شد. برای pH وزن ۱۰۰ در نظر گرفته شد، محدوده‌ی تغییرات این پارامتر بسیار کم بود و در شبیه‌سازی با وزن‌های کم، دقت زیادی حاصل نمی‌شد و بنابراین وزن ۱۰۰ انتخاب شد. در مدل نیز مقدار وزن پیش‌فرض برای pH برابر با ۱۰۰ است. وزن انتخابی برای CBOD و Organic N با توجه به محدوده‌ی تغییرات آن‌ها و دقت کمتر در نتایج شبیه‌سازی به ترتیب برابر با ۱۵ و ۱۰ انتخاب شد. برای فسفر و نیتروژن کل نیز وزن ۲ انتخاب گردید. برای سایر پارامترهای کیفی مورد استفاده در تابع هدف از وزن ۵ استفاده گردید. در تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک برای کالیبراسیون مدل، تعداد جمعیت اولیه و تعداد نسل به ترتیب برابر با ۱۰۰ و ۵۰۰ و سایر پارامترها برابر با پیش‌فرض مدل در نظر گرفته شد. نرخ هوادهی نیز از پارامترهایی بود که با استفاده از کالیبراسیون محاسبه و رابطه‌ی آن استخراج گردید.

در زمان نمونه‌برداری از رودخانه فاضلاب کشاورزی که به‌صورت سطحی وارد رودخانه شود مشاهده نشده و جریانی در زهکش‌های کشاورزی برقرار نبود و تنها لجن در این زهکش‌ها مشاهده شد. هرچند در اغلب مطالعات از تأثیر آب برگشتی بر کیفیت آب رودخانه صرفه نظر شده است[۹، ۱۰، ۱۱] اما تحقیقات نشان داده است که آلاینده‌های ناشی از کشاورزی از عوامل اصلی تخریب کیفیت آب رودخانه‌ها بشمار می‌روند[۱۶]. به‌منظور تأمین داده‌های کیفی آب برگشتی به رودخانه و همچنین غلظت جریانی که در تماس با زباله‌ها و فضولات انباشته شده در ساحل است از امکان بهینه یابی مدل استفاده شد. استفاده از این امکان مدل، مستلزم تعریف حد بالا و پایین مقادیر مجهول در مدل است. برای این منظور، تمامی پایان‌نامه‌ها و مقالات در دسترس بررسی و وضعیت کیفیت آب ۲۸ زهکش یا فاضلاب کشاورزی استخراج گردید(جدول ۴). حداکثر غلظت زهکش‌ها به‌عنوان حد بالا و کیفیت آب رودخانه در هر نقطه به‌عنوان حد پایین به مدل معرفی شد. اکسیژن محلول نیز حداقل برابر با ۲ میلی‌گرم بر لیتر و حداکثر برابر با غلظت اکسیژن محلول در آب رودخانه در نظر گرفته شد.

۲.۴.۲ فرضیات مدل‌سازی

گام زمانی حل معادلات برابر با ۵/۶۲۵ دقیقه و روش حل اولر و نیوتن رافسون به ترتیب برای حل معادلات انتقال جرم و 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 [۱۵]، زمان عبور رودخانه در فصل خشک برابر با ۱/۵ روز است، بنابراین حداقل زمان مورد نیاز برابر با ۳ روز می‌باشد، این زمان برابر با ۵ روز تنظیم شد.

جدول٤. وضعیت کیفیت آب زهکش‌ها و فاضلاب‌های کشاورزی داخل کشور

زهکش	EC (µm/cm)	PH	BOD5 (mg/l)	NO3 (mg N/l)	NH4 (mg N/l)	Organic N (mg N/l)	Organic P (mg P/l)	In Organic P (mg P/l)	ALK (mg caco3/l)	مرجع
کارون۱	۳۱۰۰۰	۸/۵	۱۴۳/۵	۴۰۹۰	-	-	-	-	-	۲
رودخانه شیراز۲	۱۰۷۵	۷/۸	۱۷	۲۵	-	۵	۱	۰/۸	۲۹۰	۳
زاینده‌رود۳	۲۷۱۰۰	۸/۲۲	۲۱۰	۸/۲	۲۲	۱۲	۳/۲	۰/۸	-	۴
رودخانه قره‌آغاج	۱۴۰۰	۷/۸	۴۰	۲۵	-	۵	۱	۰/۸	۲۹۰	۵

۳. نتایج

۱.۳ کالیبراسیون مدل

نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل و شبیه‌سازی پارامترهای کمی و کیفی به ترتیب در (جدول۵) و (شکل ۵) ارائه شده است. همان‌طور که در (شکل۵) مشاهده می‌شود، مدل با دقت مناسبی پارامترهای کیفی را شبیه‌سازی می‌نماید. نتایج کالیبراسیون مدل تطابق قابل‌قبولی با داده‌های مشاهداتی دارد. جذر مجموع مربعات خطا (RMSE) برای DO، BOD، PH، TN و TP به ترتیب برابر با ۸/۵، ۳۲۴، ۱/۶۵، ۱۳/۱۵و ۸۵/۱۷ درصد است. بیشترین خطای شبیه‌سازی مربوط به CBOD است، لازم به ذکر است که بخش عمده‌ای از این خطا مربوط به یک نقطه می‌باشد و در سایر بازه‌ها دقت در روند پیش‌بینی تغییرات این پارامتر قابل‌قبول مناسب است. همان‌طور که در (شکل ۵) مشاهده می‌شود، غلظت اکسیژن محلول در بالادست مطلوب است، اما به سبب ورود آلاینده‌ها و کاهش نرخ هوادهی به کمتر از ۶ میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. حداکثر افت اکسیژن محلول در انتهای بازه رخ می‌دهد و به کمتر از ۴ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. افت اکسیژن محلول به دلیل افزایش مقدار مواد مغذی در این بازه به واسطه‌ی تماس آب با فضولات و زباله‌های انباشته شده در ساحل رودخانه می‌باشد.

جدول ۵. نتایج حاصل از کالیبراسیون مدل کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود برای شرایط بحرانی

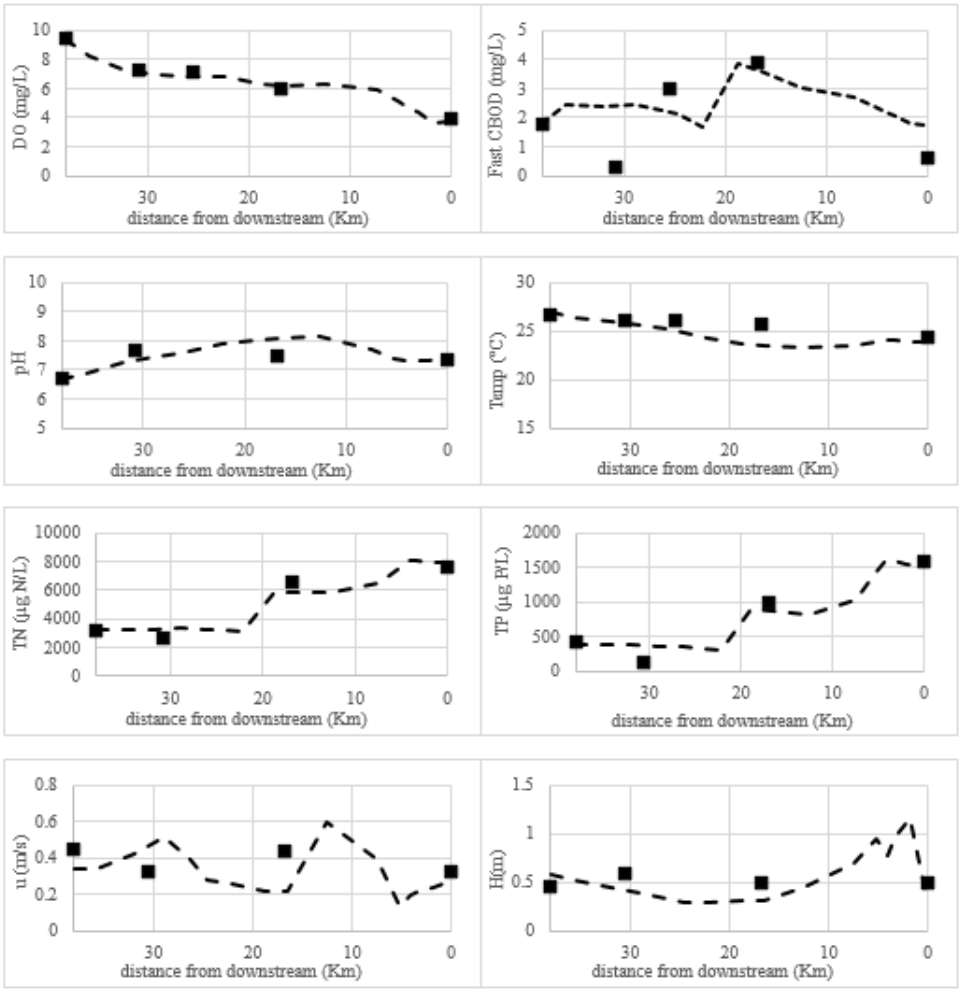
پارامتر	مقدار به دست آمده از مرحله کالیبراسیون	واحد	حداقل	حداکثر
Inorganic suspended solids Settling velocity	1.38	m/d	0	2
Reaeration model		/d		
Slow CBOD Hydrolysis rate	3.42	/d	0	5
Slow CBOD Oxidation rate	0.09	/d	0	0.5
Fast CBOD Oxidation rate	1.55	/d	0	5
Organic N Hydrolysis	0.64	/d	0	5
Organic N Settling velocity	0.21	m/d	0	2
Ammonium Nitrification	1.37	/d	0	10
Organic P Hydrolysis	1.08	/d	0	5
Organic P Settling velocity	0.02	m/d	0	2
Inorganic P Settling velocity	0.77	m/d	0	2
Sed P oxygen attenuation half sat constant	0.22	mgO_2/L	0	2
Detritus Dissolution rate	1.21	/d	0	5
Detritus Settling velocity	4.62	m/d	0	5
Bottom Plants:				
Max Growth rate	15.92	$gD/m^2/d$ or /d	0	100
Basal respiration rate	0.01	/d	0	0.3

[۱] آمار ۲۱ زهکش رودخانه کارون بررسی و نازل‌ترین کیفیت در جدول ثبت شد.

[۲] پساب کشاورزی رودخانه های دالکی، حله و شاپور شیراز.

[۳] آمار ۳ زهکش زرین شهر، شاه کرم و سگزی بررسی و نازل‌ترین کیفیت در جدول ثبت شد.

Excretion rate	0.02	/d	0	0.5
Death rate	0.18	/d	0	0.5
External nitrogen half sat constant	145.57	ugN/L	0	300
External phosphorus half sat constant	86.27	ugP/L	0	100
Inorganic carbon half sat constant	7.87118E-05	moles/L	1.30E-06	1.30E-04
Light constant	70.8485	langleys/d	1	100
Ammonia preference	10.8456	ugN/L	1	100
Subsistence quota for nitrogen	21.6777	mgN/gD	0.072	72
Subsistence quota for phosphorus	2.7209	mgP/gD	0.01	10
Maximum uptake rate for nitrogen	633.9465	mgN/gD/d	350	1500
Maximum uptake rate for phosphorus	132.3875	mgP/gD/d	50	200
Internal nitrogen half sat ratio	1.6913		1.05	5
Internal phosphorus half sat ratio	2.6335		1.05	5



شکل۵. نتایج شبیه‌سازی کمی و کیفی رودخانه زرینه‌رود در تاریخ ۱۳۹۵/۶/۷

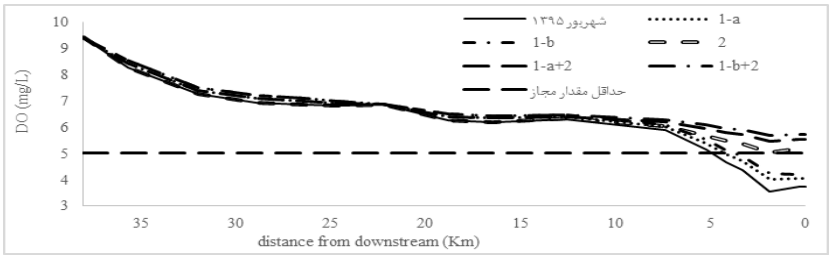
۴. سناریوهای بهبود کیفیت آب

دو سناریوی افزایش جریان بالادست (ترقیق) و کنترل منابع آلاینده و ترکیب این دو سناریو مدیریتی به‌منظور بهبود شرایط کیفی مورد بررسی قرار گرفت. در مجموع تعداد ۵ سناریو به شرح (جدول ۶) بررسی شد.

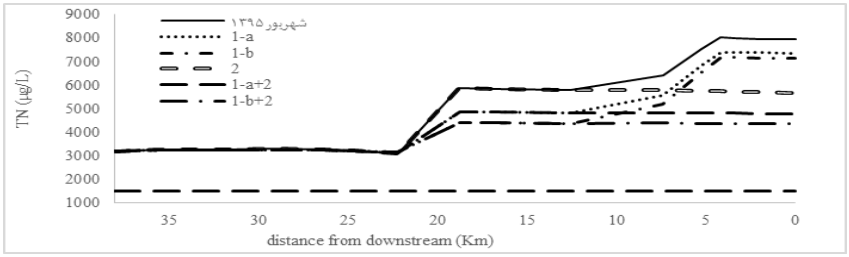
جدول ٦. سناریو های مدیریتی مورد استفاده بمنظور بهبود کیفیت آب رودخانه زرینه رود

اقدام مدیریتی	سناریو	توضیح
ترقیق	۱-a	افزایش جریان بالادست به میزان ۵۰ ٪
	۱-b	افزایش جریان بالادست به میزان ۱۰۰ ٪
کنترل منابع آلاینده از مبدا	۲	جمع آوری زباله‌ها و فضولات از حاشیه رودخانه
ترکیبی	۱-a+۲	افزایش جریان بالادست به میزان ۵۰ ٪ + جمع آوری زباله‌ها و فضولات از حاشیه رودخانه
	۱-b+۲	افزایش جریان بالادست به میزان ۵۰ ٪ + جمع آوری زباله‌ها و فضولات از حاشیه رودخانه

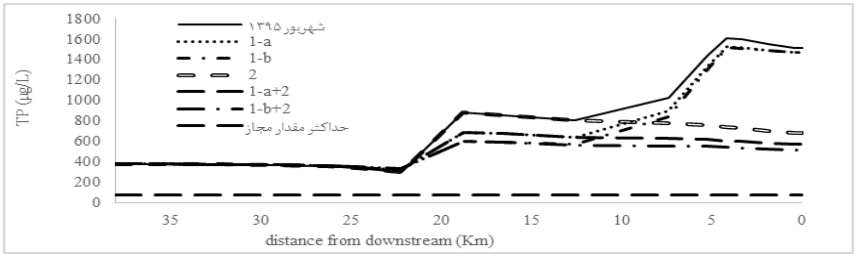
نتایج سناریوهای بهبود کیفیت آب بر میزان اکسیژن محلول، نیتروژن کل و فسفر کل موجود به ترتیب در شکل‌های ۶، ۷ و ۸ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش جریان در بالادست کیفیت آب رودخانه بهبود چشمگیری پیدا نمی کند. چراکه جریان سرشاخه همواره دارای مقادیر قابل توجهی آلاینده است و همچنین افزایش جریان در این رودخانه سبب کاهش نرخ هوادهی می‌گردد اما جمع آوری فضولات حیوانی و زباله‌های حاشیه‌ی رودخانه اثر قابل توجهی بر بهبود کیفیت آب دارد. بررسی ترکیب این دو سناریو نشان می‌دهد که در اثر اتخاذ چنین تصمیمی مدیریتی غلظت اکسیژن محلول آب رودخانه همواره بیش از حداقل مجاز برای حیات آبزیان خواهد بود. اتخاذ سناریو حذف زباله‌ها و فضولات، و همچنین سناریوهای ترکیبی، کاهش چشمگیری در غلظت نیتروژن و فسفر کل ایجاد می‌کند. اما از آنجایی که غلظت نیتروژن و فسفر کل بیش در سرشاخه بیش از مقدار مجاز می‌باشد، حتی با اتخاذ این سناریوها نمی‌توان آن‌ها را تا حد مجاز رساند.



شکل ٦. شبیه‌سازی اکسیژن محلول رودخانه زرینه‌رود در ازای اتخاذ سناریوهای مدیریتی



شکل۷. شبیه‌سازی غلظت نیتروژن کل رودخانه زرینه‌رود در ازای اتخاذ سناریوها مدیریتی



شکل۸. شبیه‌سازی غلظت فسفر کل رودخانه زرینه‌رود در ازای اتخاذ سناریوها مدیریتی

۵. نتیجه گیری

در این مطالعه ارزیابی شرایط کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود در شهریور ماه سال ۹۵ به‌عنوان دوره شاخص شرایط بحرانی با هدف تأمین الزامات زیستی مورد نیاز آبزیان شاخص این رودخانه مدنظر قرار گرفت. برای این منظور نمونه‌برداری از رودخانه در فصل خشک انجام و شبیه‌سازی کیفی رودخانه با استفاده از مدل Qual2kw انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که مدل قابلیت مناسبی در شبیه‌سازی بیشتر پارامترهای کیفیت آب این رودخانه دارد و مقادیر TP، TN و DO در شرایط بحرانی از حدود مجاز برای حیات آبزیان تجاوز نموده‌اند و انتهای بازه مطالعاتی بحرانی‌ترین مقطع رودخانه از لحاظ کیفیت آب می‌باشد. به‌منظور بهبود وضعیت کیفیت آب رودخانه دو سناریو افزایش جریان سرشاخه و کنترل منابع آلاینده بررسی شد. نتایج به دست آمده نشان داد که سناریو برتر برای بهبود کیفیت آب رودخانه، جمع‌آوری زباله‌ها و فضولات حیوانی انباشته شده در ساحل رودخانه است و در صورت اتخاذ ترکیب دو سناریو می توان کیفیت آب رودخانه را تا حد زیادی بهبود بخشید و غلظت اکسیژن محلول را در تمام طول رودخانه به بیش‌ازحد مجاز برای حیات آبزیان رساند.

در این تحقیق صرفاً دو اقدام مدیریتی غیر سازه‌ای برای بهبود وضعیت کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود مورد بررسی قرار گرفت، اتخاذ اقدامات مدیریتی همچون هوادهی موضعی، کنترل مقدار و نوع کودهای مصرفی، استفاده از سیستم‌های تصفیه زیستی در سرشاخه (بند نوروزلو)و طول مسیر و ... می‌تواند در مطالعات آینده مورد بررسی قرار گیرد. از نتایج این تحقیق می توان برای بهبود کیفیت آب رودخانه زرینه‌رود و سایر رودخانه‌های مشابه در حوضه استفاده نمود.

۶. مراجع

1. Maddock, I. (1999). The importance of physical habitat assessment for evaluating river health. *Freshwater biology*, *41*(2), 373-391.

۲. شهریاری، ف. (۱۳۸۹). بررسی تغییرات دبی جریان بر پارامترهای کیفی رودخانه کارون با استفاده از مدل QUAL2k (بازه ملاثانی تا فارسیات) پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شهید چمران اهواز. دانشکده علوم آب.

۳. هاشمی، ب. (۱۳۸۸). اندازه‌گیری آلودگی و مدل‌سازی کیفیت آب رودخانه‌های شاپور، دالکی و حله. پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست.

۴. ابوالقاسمی رحیم‌آبادی، ع. (۱۳۸۷). شناخت و بررسی تأثیر منابع آلاینده بر کیفیت آب زاینده‌رود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی اصفهان. دانشکده عمران.

۵. پورکریمی، ع. (۱۳۸۵). شناخت منابع آلاینده رودخانه قره‌آغاج و بررسی تأثیر آن بر کیفیت آب رودخانه با استفاده از مدل QUAL2k. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز.

6. Cox, B. A. (2003). A review of currently available in-stream water-quality models and their

applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. Science of the Total Environment, 314, 335-377.

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

8. USEPA, (1986). Quality criteria for water. Gold Book Quality Criteria, EPA 440/5-86-001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington

9. MADEP, (1997). Surface Water Quality Standards. 314 CMR 4.0 Division of Water Pollution Control, Department of Massachusetts, USA, Updated 5/30/97.

10. Zhang, R., Qian, X., Li, H., Yuan, X., & Ye, R. (2012). Selection of optimal river water quality improvement programs using QUAL2K: A case study of Taihu Lake Basin, China. Science of the Total Environment, 431, 278-285.

11. Mathew, M., Yao, Y., Cao, Y., Shodhan, K., Ghosh, I., Bucci, V... & Hellweger, F. L. (2011). Anatomy of an urban waterbody: a case study of Boston's Muddy River. Environmental Pollution, 159(8), 1996-2002.

۱۲. احمدزاده، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی بهره‌وری آب کشاورزی با استفاده از مدلSWAT: مطالعه موردی، حوضه زرینه‌رود، پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس. دانشکده کشاورزی.

۱۳. محیط‌زیست آذربایجان غربی. (۱۳۹۵)، طرح تعیین حق آب زیست‌محیطی تالاب و رودخانه‌های حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه، گزارش مطالعات اکولوژیک.

۱۴. محیط‌زیست آذربایجان غربی. (۱۳۹۵)، طرح تعیین حق آب زیست‌محیطی تالاب و رودخانه‌های حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه، گزارش مطالعات هیدرولیک.

15. Pelletier, G.J., Chapra, S.C., 2005. QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1), A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality

16. Ongley, E. D. (1996). Control of water pollution from agriculture (No. 55). Food & Agriculture Org.