تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال نوزدهم، شماره ۵، زمستان ۱۴۰۲
Volume 19, No. 5, Winter 2024 (IR-WRR)
۱۳۰-۱۴۴

بررسی اثرات کنترل منابع آلاینده نقطه‌ای بر کیفیت منابع آب حوضه آبریز مبتنی بر مدل هیدرولوژیکی و کیفیت آب SWAT؛ مطالعه موردی: حوضه سیمره

طیبه گنجایی[۱] و مطهره سعادت‌پور[۲*]

چکیده

فراوانی بارهای فسفر، نیتروژن و رسوبات در سطح حوضه‌های آبریز متأثر از مراکز آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، دامپروری، توسعه صنعت و غیره، تهدیدهای فزاینده‌ای را متوجه منابع آب‌های سطحی در کشور نموده است. در این کار تحقیقاتی مدل‌سازی شرایط هیدرولوژیکی، رسوب و مواد مغذی در منابع آب حوضه آبریز سیمره در مقیاس گسترده مکانی و زمانی در مدل SWAT، توسعه یافته و سپس واسنجی و اعتبارسنجی شده است. عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی جریان، رسوب و مواد مغذی در ایستگاه‌های مختلف آب‌سنجی، رسوب‌سنجی و کیفیت منابع آب با استفاده از شاخصه‌های آماری R^2 (ضریب همبستگی) و NS (نش–ساتکلیف) مورد ارزیابی قرار گرفته است. واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از مدل SWAT-CUP و تکنیک SUFI2 انجام پذیرفته است. ضریب NS در کلیه ایستگاههای هیدرومتری برای دبی، رسوب، نیتروژن کل و فسفر کل به ترتیب بیش از ۰/۵۱، ۰/۵۳، ۰/۵۲ و ۰/۴۷ و ضریب R^2 بیش از ۰/۵۹ ، ۰/۶۱، ۰/۶ و ۰/۶۷ برای دوره واسنجی بوده است. بر اساس نتایج حاصل، حذف کامل بار فسفر پنج واحد آلاینده نقطه‌ای مهم سبب کاهش متوسط غلظت فسفر خروجی از حوضه از ۱/۳۴ میلی‌گرم در لیتر به ۱/۱۴ میلی‌گرم در لیتر خواهد شد. همچنین، فاضلاب شهری کرمانشاه نقش به مراتب حائز اهمیتی در میان منابع آلاینده نقطه‌ای در تخریب کیفیت آب حوضه دارد. بارهای آلاینده غیرنقطه‌ای (کشاورزی و دامپروری) و فرسایش خاک نیز، نقش قابل توجهی در زوال کیفیت منابع آب حوضه در مقایسه با واحدهای آلاینده نقطه‌ای دارند.

کلمات کلیدی: آلاینده‌های نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، مدل‌سازی کمیت و کیفیت، SWAT، SWAT CUP.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۹/۲۸
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۷

Studying the Effects of Point Source Pollution on Water Quality in River-basin Scale based on Hydrological and Water Quality Model, SWAT; Seymareh River-Basin as a Case Study

T. Ganjaee [1] and M. Saadatpour [2]*

Abstract

The abundance of phosphorus, nitrogen and sediment loads in the watershed affected by point and non-point pollution sources due to agricultural activities, animal breeding, urban and industrial development have led to increasing threats to surface water resources in the country. In this research, the spatiotemporal hydrological, sediment and nutrients modelling of water resources has been developed in SWAT environment for the Seymareh River-basin. The SWAT model performances in simulating the flow rate, sediment, and nutrients in different hydrometric and water quality monitoring stations have been evaluated using statistical indicators R^2 (correlation coefficient) and NS (Nash-Sutcliffe). The SWAT model calibration and validation was accomplished by SWAT-CUP tool and SUFI2 technique. According to SWAT model results, the NS coefficients in various hydrometric/monitoring stations for calibration stage are more than 0.51, 0.53, 0.52, and 0.47 respectively for flow rate, sediment, total nitrogen (TN), and total phosphorus (TP). The results demonstrated that the complete removal of the phosphorus loads in 5 important point contaminant sources will reduce the average phosphorus concentration from 1.34 mg/L to 1.14 mg/L in the monitoring point (river basin outlet). Furthermore, the effects of Kermanshah City sewage on water quality degradations in the Seymareh control point are dominant in comparison to other pollution point sources. Non-point pollution sources (agriculture drainage, animal breeding, and soil erosions) have significant contribution in water quality deteriorations in the Seymareh River-basin compared to point sources.

Keywords: Point and Non-point Pollutants, Water Quantity and Quality Modelling, SWAT, SWAT-CUP.

Received: December 19, 2022
Accepted: December 28, 2023

۱- کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
۲- دانشیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
*- نویسنده مسئول

1- M.Sc. in Water Resources Management and Engineering, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
2- Assistant Professor, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email: Msaadatpour@iust.ac.ir
*- Corresponding Author

Doi: 10.22034/IWRR.2023.186214

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۳ امکانپذیر است.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

۱- مقدمه

آب شیرین منبعی محدود و ضروری برای بقای حیات بشری است که کمبود دسترسی به آن از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر است. فراوانی بارهای فسفر، نیتروژن و رسوبات در سطح حوضه‌های آبریز متأثر از مراکز آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای و منبعث از فعالیت‌های کشاورزی، دامپروری، توسعه صنعت، گسترش سکونتگاه‌های انسانی و غیره، تهدیدهای فزاینده‌ای را متوجه منابع آب‌های سطحی در کشور نموده است. به عبارتی، روند رو به رشد توسعه و تغییرات چشم‌گیر آن بر چرخه بیوشیمیایی، اثراتی ژرف بر بار رسوبات و مواد مغذی تولیدی در سطح کره زمین نموده است. حدود یک سوم تا یک دوم از این مواد مغذی تولیدی در قالب فزونی مواد مغذی به آب‌های سطحی منتقل می‌گردند (Goodwin, 2011). در کاهش/ تعدیل مشکلات کیفیت منابع آبی پیکره‌های آبی، کنترل آلاینده‌های بالادست و تعیین مقادیر مجاز تخلیه یکی از راهکارهای متداول و مؤثر است. زوال کیفیت منابع آبی در کشور از موضوعات نگران‌کننده در حوزه مهندسی و مدیریت منابع آبی است و عدم توجه به این مهم، مدیران و برنامه‌ریزان محیط زیست و منابع آبی کشور را در آینده نه چندان دور، با چالش‌های جدی‌تری نسبت به شرایط کنونی مواجه خواهد ساخت. از این رو، نیاز است که نگاه ویژه‌ای به مباحث مدل‌سازی و مدیریت کیفیت منابع آبی داشت. ترسیم تصویری صحیح و درست از کیفیت منابع آبی در سطح حوضه آبریز مستلزم شناخت، درک و تصویرسازی مناسب از ویژگی‌های کمی و هیدرولوژیکی منابع آب است تا بتوان اندرکنش و درهم‌تنیدگی مؤلفه‌های کمی و کیفی را به درستی شبیه‌سازی نمود. با توجه به پویائی زمانی و گستردگی مکانی ویژگی‌های خاک، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، تنوع الگو و سطوح زیرکشت، الگوها و شدت بارندگی در سطح حوضه آبریز و غیره استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی دینامیک و گسترده/شبه گسترده در سطح حوضه آبریز، بسیار کارا و مؤثر خواهد بود. منابع آلودگی نقطه‌ای شامل فاضلاب‌های شهری، فاضلاب های صنعتی و زهکشی روناب‌های شهری و روستائی هستند. منابع آلودگی غیر نقطه‌ای شامل فعالیت‌های کاربری اراضی مانند توسعه مناطق شهری، فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری، زهکشی معدن و رواناب ناشی از بارش، ذوب برف یا آب آبیاری در روی این سطوح بوده که بر روی زمین جاری شده و وارد رودخانه‌ها، دریاچه‌ها و آب‌های ساحلی می‌شوند (Wu and Chen, 2013). توسعه اراضی کشاورزی و مصرف رو به گسترش کودهای شیمیایی برای افزایش تولید محصول و رشد سکونتگاه‌های انسانی از مهم‌ترین مشکلات آلودگی آب‌های سطحی در جهان به شمار می‌رود. از این رو کاهش بارهای آلودگی نقطه‌ای وارد شونده به آب، مانند فاضلاب شهری و فاضلاب صنعتی ناشی از کارخانه‌ها و هم چنین کاهش بارهای آلودگی غیر نقطه‌ای مانند فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری، به عنوان روش‌های متداول برای بهبود کیفیت آب‌های سطحی لازم است. مطالعات متعددی توسط محققین در شبیه‌سازی رواناب و پارامترهای کیفیت آب با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و کیفیت آب در مقیاس زمان و مکان انجام پذیرفته که در زیر برخی از این مطالعات مرور می‌شوند.

در تحقیق Spruill et al. (2000) از مدل SWAT[1] برای شبیه‌سازی دبی روزانه و ماهانه در طی یک دوره دو ساله استفاده شد. مدل به طور مناسبی روند رواناب روزانه را در طول این دوره پیش‌بینی نمود. ولی توانایی مناسبی در پیش‌بینی دبی اوج سیلاب یا فروکش‌های جریان نداشته است. Duan et al. (2009) از مدل SWAT برای تخمین رواناب و بار رسوبی استفاده نمودند. مدل SWAT هر دو مقدار رسوب و رواناب ماهانه را به درستی شبیه‌سازی نموده و در دو ایستگاه خروجی حوضه در طول دوره واسنجی، تطابق خوبی میان رواناب شبیه سازی شده و مقادیر مشاهده‌ای وجود داشت. کارائی مدل شبیه‌سازی رسوب نسبت به مدل رواناب پائین‌تر بوده یا به عبارتی با دقت کمتری واسنجی و اعتبارسنجی شده است. Ouyang et al. (2010) ارتباط بین ویژگی‌ها و فرم‌های مختلف از آلاینده‌های غیر نقطه‌ای مواد مغذی را به منظور ارزیابی بار آلودگی و پیش‌بینی تأثیر آن بر کیفیت آب‌های سطحی با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند و در نهایت مشخص شد که مناطق دارای پوشش مرتع و زمینهای کشاورزی، نقش مهمی در تغییرات آلودگی‌های غیر نقطه‌ای با ماهیت مواد مغذی در حوضه مورد مطالعه دارند. در مطالعه Molina-Navarro et al. (2014)، اثر سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر رژیم جریان و انتقال مواد مغذی به مخازن واقع در حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT بررسی شد و نتایج حاکی از کاهش ۴۸ درصدی دبی در سال‌های ۲۰۹۰ و ۲۱۰۰ و اثر ترکیبی تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی در افزایش بیشتر انتقال مواد مغذی در سطح حوضه بوده است. در طی تحقیقی توسط Castillo et al. (2014)، در سطح حوضه آبریز با استفاده از مدل SWAT و سناریوسازی، اثرات مستقل و ترکیبی تغییرات کاربری، پوشش اراضی و الگوهای بارندگی بر کیفیت آب رودخانه بررسی و مشخص شد که در مقیاس حوضه آبریز، تغییرات اقلیمی نسبت به تغییرات کاربری اراضی تأثیر بیشتری بر انتقال رسوب و کیفیت آب دارد. Abbaspour et al. (2015) یک مدل هیدرولوژیکی یکپارچه از قاره‌ی اروپا را برای بررسی کیفیت آب‌های زیر زمینی این قاره که متأثر از تنش‌های وارد بر منابع آب محلی، ملی و منطقه‌ای بوده‌اند، در مدل SWAT توسعه و واسنجی نمودند. در پژوهش ایشان، مؤلفه‌های مختلف منابع آب، شبیه‌سازی و کیفیت آب

و نشت نیترات به آب‌های زیرزمینی در بازه‌های زمانی ماهانه با استفاده از مدل SWAT مورد بررسی قرار گرفتند. Himanshu et al. (2017) به بررسی کاربرد مدل SWAT به منظور شبیه‌سازی رواناب، رسوب و بیلان آب در حوضه آبریز کن[۲] واقع در هند پرداختند. شبیه‌سازی رواناب روزانه با شاخصه‌های آماری R^2= ۰/۷۷۶، ۰/۷۷ =NS برای واسنجی و R^2= ۰/۷۸، ۰/۷۷ =NS در اعتبارسنجی قابل قبول بود. به طور کلی مطالعه بیلان آب نشان داد که تبخیر- تعرق با سهم ۴۴/۶٪ از بارش میانگین سالانه، نسبت به مؤلفه‌های دیگر در حوضه آبریز مورد مطالعه غالب‌تر است. Hanief and Laursen (2017) به پیش‌بینی الگوهای مکانی و زمانی هیدرولوژی و ورود رسوبات و مواد مغذی به دریاچه اری[۳] با استفاده از مدل SWAT پرداختند. نتایج واسنجی به صورت R^2=۰/۶۴ و ۰/۶۳ =NS و اعتبارسنجی با نتایج R^2= ۰/۸۲ و NS=۰/۷۴ به‌دست آمد که بیانگر عملکرد خوب مدل است. Nazari-Nazari-Sharabian et al. (2019) از مدل SWAT برای تعیین تأثیر تغییرات آب و هوا بر عملکرد رواناب در حوضه آبریز مخزن مهاباد در ایران و هم چنین تعیین غلظت فسفر کل به عنوان عامل مهم محدودکننده تغذیه‌گرایی در این مخزن، با توجه به اثرات ترکیبی تغییر اقلیم پرداختند. سناریوهای مورد نظر در تحقیق ایشان، ترکیبی از تغییرات در جمعیت، فعالیت‌های کشاورزی و دامداری، فعالیت‌های صنعتی و آلودگی آب و حفاظت از آب بوده‌اند. بیشترین مقدار غلظت فسفر کل مربوط به سناریوهایی بوده که در آن جریان ورودی به مخزن کاهش یافته و بارگذاری فسفر کل و تخصیص آب سد در پایین‌دست افزایش یافته است. Salimirad et al. (2020)، به مطالعه عدم قطعیت ناشی از پارامترهای مدل SWAT در برآورد رواناب حوضه آبخیز کارده پرداختند و واکنش مدل به تغییر در پارامترهای آن را با تکنیک آنالیز حساسیت مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به مقادیر ضریب NS در دوره‌های مدل توسعه یافته SWAT، کارایی خوبی برای شبیه‌سازی جریان رودخانه کارده نشان داده است. Olaoye et al. (2021) تأثیر تغییر اقلیم پیش‌بینی شده بر کیفیت آب در حوضه آبخیز OWC[۴] را با استفاده از مدل SWAT و پیش‌بینی‌های بارش و دما ارزیابی کردند. واسنجی مدل هیدرولوژیکی با استفاده از یک الگوریتم تکاملی چند هدفه و بهینه‌سازی چندهدفه انجام شده و شبیه‌سازی‌هایی برای جریان و ۹ پارامتر کیفیت آب (رسوب، نیتروژن آلی، فسفر آلی، فسفر معدنی، کلروفیل-آ، نیاز اکسیژن بیوشیمیایی کربنی، اکسیژن محلول، نیتروژن کل و فسفر کل) در سطح حوضه انجام شد.

Meshesha et al. (2021) از مدل SWAT برای پیش‌بینی کیفیت آب‌های زیرزمینی استفاده کردند. نتایج، یک دقت مناسب میان کیفیت آب زیرزمینی مشاهداتی و مدل‌سازی را نمایش می‌داد. نتایج نشان داد که غلظت نیترات و TDS[۵] در آب‌های زیرزمینی ممکن است با کیفیت‌های متفاوت آب‌های سطحی تغییر نماید که این نتیجه، نیاز به طراحی سناریوهای مدیریت تطبیقی را آشکار می‌سازد. Ashrafi et al. (2022)، چارچوبی شامل SWAT و مدل‌های دیگر و نظرات کارشناسان برای ارزیابی پایداری خدمات اکوسیستمی در سطح حوضه ارائه نمودند. برای نشان دادن کاربردی بودن چارچوب پیشنهادی، آن را برای حوضه رودخانه زرینه‌رود تحت سه سناریوی مختلف تغییر اقلیم برای دو افق زمانی مختلف اعمال کردند. سناریوها شامل پروژه‌هایی مانند تخصیص آب به دریاچه ارومیه از منابع جدید، احیای شبکه‌های آبیاری و زهکشی و اصلاح الگوی کشت منطقه بوده است. Addab and Bailey (2022)، از نسخه جدید توسعه‌یافته مدل SWAT (SWAT-Salt)، برای گنجاندن انتقال یون نمک در زهکشی‌های زیرسطحی و برای بررسی اثرات اجرای زهکشی زیرسطحی در سطح منطقه بر انتقال شوری استفاده کردند. مدل مورد استفاده توسط ایشان در قالب ابزار مفیدی در شبیه‌سازی انتقال شوری در حوضه زهکشی‌شده و بررسی تأثیر شیوه‌های مدیریت شوری در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی مورد استفاده قرار گرفت. در طی تحقیقی توسط Raja et al. (2022)، واسنجی چندمنظوره مدل SWAT با شاخص‌های تکمیلی از جمله تبخیر و تعرق و عملکرد محصولات غالب در دشت مهاباد در استان آذربایجان غربی بررسی شد. نتایج نشان داد مدل SWAT به خوبی توانسته است جریان سطحی را در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی جریان سطحی مدل‌سازی کند. در عین حال، مقادیر تبخیر-تعرق واقعی برآورد شده مدل SWAT با مقادیر مرجع هر محصول مورد مقایسه قرار گرفته است.

یکی از موارد مهم در بحث بهره‌برداری کمی و کیفی از منابع آب موجود، ترسیم شرایط هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آبی در مقیاس حوضه آبریز، ارزیابی شرایط موجود و سناریوهای مختلف کنترل بار آلودگی‌ها است. شناخت و تعیین نقش واحدهای آلاینده در زوال کیفیت منابع آبی و اهمیت حفاظت از کیفیت منابع آبی/کاهش آلایندگی واحدهای مختلف و ارتقاء کیفیت آنها، از الزامات مدیریت کیفیت منابع آب است. تاکنون تحقیقات بسیاری در رابطه با تخصیص منابع آب و مدل‌سازی با نرم‌افزار SWAT انجام شده اما بحث کیفیت آب و نقش ذینفعان در زوال کیفیت آب کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق شرایط هیدرولوژیکی و کیفی منابع آب در مقیاس حوضه آبریز ترسیم شده و سپس نقش ذینفعان متعدد در کاهش کیفیت منابع آبی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، مدل‌سازی هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آب در مقیاس حوضه آبریز در مدل

SWAT انجام پذیرفته است. منابع آلاینده نقطه‌ای در قالب واحدهای آلاینده کوچک و متمرکز در محدوده‌های مکانی مجاور با یکدیگر ادغام گردیده و منابع آلاینده غیرنقطه‌ای ناشی از کود و سموم ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و فعالیت‌های دامپروری در مدل‌سازی لحاظ شده‌اند. طول دوره شبیه‌سازی هیدرولوژیکی در مدل نیمه‌توزیعی SWAT از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ است. برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آب از نرم‌افزار SWAT-CUP و تکنیک SUFI2 استفاده شده است. واسنجی مدل SWAT بر مبنای داده‌های ماهانه دبی، رسوب و مواد مغذی در ایستگاه‌های هیدرومتری محدوده مورد مطالعه دنبال گشته است. در فرآیند واسنجی مدل SWAT در شبیه‌سازی به ترتیب پارامترهای مؤثر در ۱- دبی ۲- بار رسوب و ۳- بار نیتروژن و فسفر در مدل تنظیم شده‌اند. سناریوهای مختلف کنترل بار آلودگی واحدهای آلاینده نقطه‌ای در مدل SWAT مورد ارزیابی قرار گرفته و نقش هر یک در اضمحلال کیفیت حوضه استخراج گردیده است. محل کنترل/ارزیابی کیفیت منابع آبی در نقطه خروجی حوضه آبریز سیمره و محل جریان ورودی به مخزن سد سیمره درنظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی در غرب کشور ایران مشتمل بر محدوده مطالعاتی حوضه آبریز سد سیمره بوده و از سه زیرحوضه گاماسیاب، قره‌سو و سیمره تشکیل شده است. در شکل ۱ موقعیت محدوده مطالعاتی در کشور و زیر حوضه‌ها نشان داده شده است. گسترش فعالیتهای شهری، کشاورزی و دامپروری و صنعتی در محدوده تحت مطالعه سبب افزایش مصرف منابع آبی و نیز منابع آلاینده نقطه‌ای و گسترده و متأثر از آنها اضمحلال کیفیت منابع آبی گردیده است. در این راستا مدل‌سازی هیدرولوژی و کیفیت منابع آبی در سطح حوضه آبریز به منظور ترسیم ویژگیهای منابع آبی و ارزیابی سناریوهای مدیریتی کنترل آلایندگی و ارتقاء ویژگیهای زیست محیطی محدوده تحت مطالعه یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است.

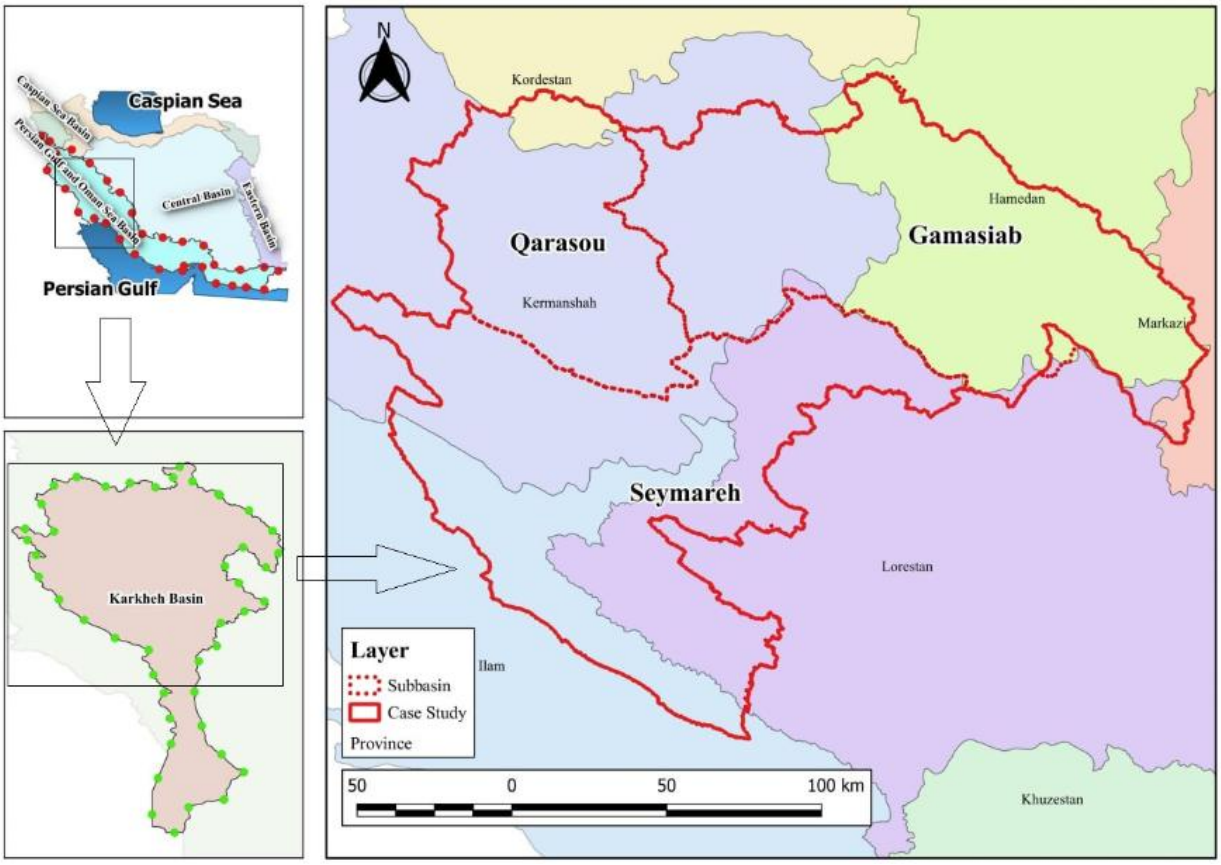
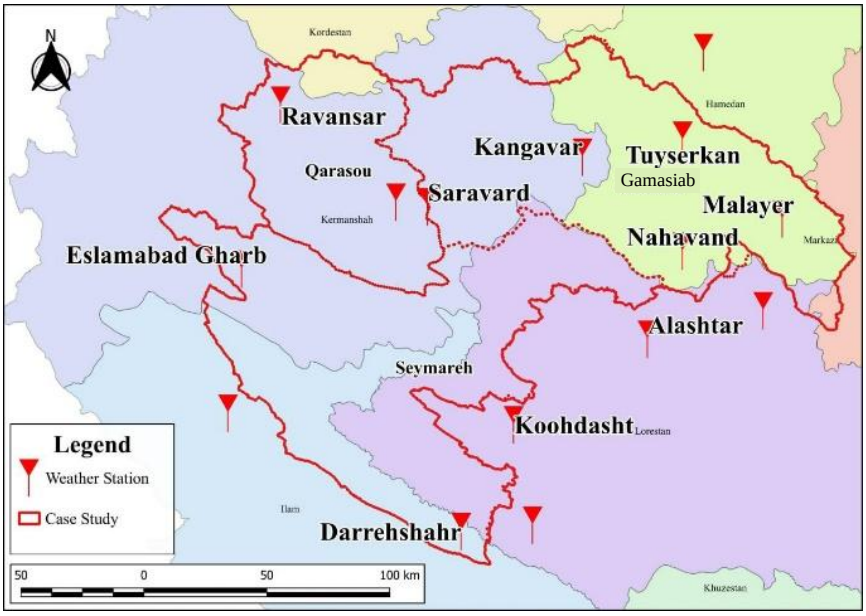


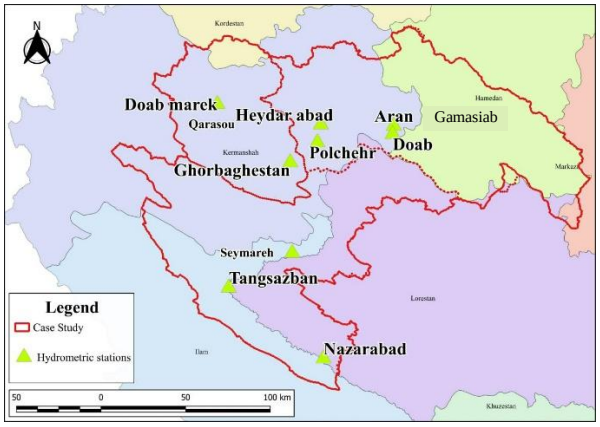
Fig. 1- Schematic illustration of Karkheh's three sub-basins of Gamasiab, Qarasu and Seymareh

شکل ۱- تصویر شماتیک سه زیر حوضه گاماسیاب، قره سو و سیمره

در مدل‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز مورد مطالعه در این تحقیق از اطلاعات ۱۰ ایستگاه هواشناسی استفاده شده است. موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی گنجانده شده در مدل SWAT مطابق شکل (۲–الف) است. داده‌های بارش و دما برای سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ به صورت روزانه برای ایستگاه‌های موجود در مدل گنجانده شدند. داده‌های دما به صورت دمای حداقل و دمای حداکثر برای هر روز در مدل تعریف شده‌اند. داده‌های دبی جریان و رسوب در مقیاس ماهانه طی (سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۳ برای دبی و سالهای ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۹ برای رسوبات) از ایستگاههای هیدرومتری واقع در محدوده مطالعاتی از دفتر مطالعات پایه شرکت مدیریت منابع آب ایران گردآوری (نه ایستگاه نمایش داده شده در شکل ۲– ب) و در قالب داده‌های مشاهداتی استفاده شد. اطلاعات منابع آلاینده نقطه‌ای و غیرنقطه‌ای، داده‌های پارامترهای کیفیت نیتروژن کل و فسفر کل در طول رودخانه‌های تحت مطالعه و در محل ایستگاههای هیدرومتری از مطالعات پایش سازمان حفاظت محیط زیست ایران استخراج و در قالب داده‌های ورودی به مدل و داده‌های مشاهداتی کیفیت استفاده شد. در مطالعات پایش منابع آلاینده و کیفیت منابع آبی حوضه آبریز کرخه پارامترهای کیفیت آب، نیتروژن کل و فسفر کل، در ایستگاههای پایش در مقیاس ماهانه و طی نوامبر ۲۰۱۲ تا آوریل ۲۰۱۳ گردآوری شدند (IRDoE, 2013).



الف (a)



ب (b)

Fig. 2- Location of a) weather stations and b) hydrometric stations

شکل ۲– موقعیت ایستگاه‌های الف: هواشناسی و ب: هیدرومتری

۲-۱-۱- بارهای آلودگی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای در محدوده تحت مطالعه

در حوضه سیمره منابع مختلف آلاینده‌های با کلاسهای آلاینده‌های نقطه‌ای و آلاینده‌های غیر نقطه‌ای وجود دارند. منابع آلودگی نقطه‌ای شامل فاضلاب شهری، فاضلاب ناشی از آبزی‌پروری و فاضلاب صنعتی بوده و زهاب ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری که در این حوضه وجود دارد، به عنوان بار آلودگی غیر نقطه‌ای وارد مدل SWAT شده است. این اطلاعات از مطالعات پایش منابع آلاینده حوضه آبریز کرخه توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران استخراج شدند (IRDoE, 2013). با توجه به تعداد بالای منابع آلودگی نقطه‌ای، با هدف مدیریت و نظم بخشیدن به داده‌های گسترده، بارهای آلودگی نقطه‌ای در صورتی که شار آلودگی کمی را دارا بودند، در مناطق/شهرهای نزدیک و مجاور با یکدیگر تجمیع شده و به عنوان یک منبع نقطه‌ای واحد درنظر گرفته شدند. بر این اساس، ۱۵ مکان به عنوان منبع بار آلودگی نقطه‌ای استخراج گردیده و در مدل‌سازی لحاظ شده است (شکل ۳). بار آلودگی غیر نقطه‌ای شامل زهاب ناشی از دامپروری و کشاورزی است که اطلاعات مربوط به آن‌ها (مصرف کود و سموم در واحدهای کشاورزی دشت‌های مختلف و تعداد و نوع دام در چراگاه‌ها و مراتع) وارد مدل SWAT شده است.

۲-۲- معرفی مدل SWAT

مدل SWAT ابزاری است برای ارزیابی آب و خاک، حوضه رودخانه یا آبخیز که توسط Arnold در سال ۱۹۹۸ برای سرویس تحقیقات کشاورزی امریکا توسعه یافته است. این مدل یک مدل مفهومی- نیمه توزیعی هیدرولوژیکی و کیفیت آب در مقیاس حوضه‌آبریزی است که در گام‌های زمانی ساعتی، روزانه و در بازه‌های زمانی طولانی مدت اجرا می‌شود.

این مدل اثر عملیات مدیریت زراعی را روی آب، خاک، رسوب و املاح در حوضه آبریزهای پیچیده بزرگ با انواع مختلف خاک، کاربری اراضی و شرایط مدیریتی برای دوره‌های طولانی مدت تخمین می‌زند. مدل SWAT جهت شبیه‌سازی کمی و کیفی حوضه آبریز، چند بسته محاسباتی شامل زیر مدول‌های شبیه‌سازی اقلیم، هیدرولوژی، پوشش گیاهی، فرسایش، انتقال و تبادلات مواد مغذی، انتقال آفت کش‌ها و راهکارهای مدیریتی را در قالب یک مدل یکپارچه به کار می‌گیرد. شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه شامل دو تقسیم‌بندی مهم است، اولین قسمت فاز زمینی در چرخه هیدرولوژی است. این فاز مقدار آب، رسوب، مواد مغذی و بار آفت کش‌ها را در کانال اصلی در هر زیر حوضه کنترل می‌کند. قسمت دوم، فاز روندیابی چرخه هیدرولوژی است که به عنوان حرکت آب و رسوب در بین شبکه کانال حوضه تا خروجی حوضه تعریف می‌شود.

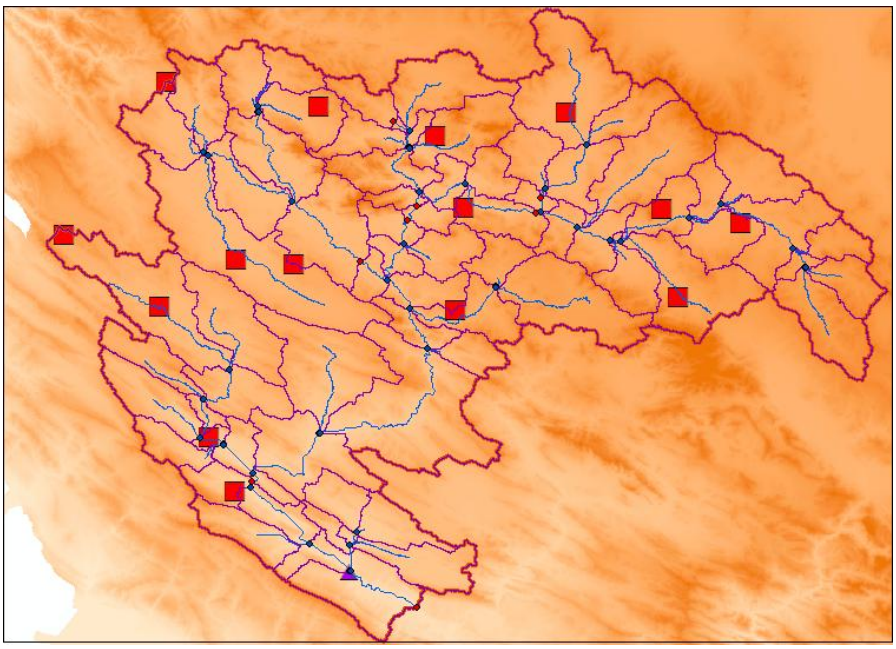


Fig. 3- Location of point pollution sources in Seymareh river-basin in SWAT model

شکل ۳- موقعیت بارهای آلودگی نقطه ای در حوضه سیمره در مدل SWAT

۲-۳- مدل SWAT-CUP

با توجه به زمان‌بر بودن و دقت کمتر در محاسبات دستی، جهت واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT، از مدل SWAT-CUP استفاده شده است. برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل SWAT از تکنیک SUFI-2 استفاده شده است. در SUFI-2 برای تمامی منابع نامشخص، تحلیل عدم قطعیت صورت می‌گیرد. عملکرد تکنیک SUFI-2 به این صورت است که در گام نخست تابع هدف تعریف گشته و در مرحله بعدی، محدوده‌های مجاز یا بازه اولیه برای هر پارامتر تعیین می‌شود. بازه پارامترها در ابتدا بزرگ است. سپس با درنظر گرفتن حدود اولیه عدم قطعیت پارامترها، نمونه‌برداری به روش لاتین هایپرکیوب[۶] صورت می‌گیرد. در هر بار نمونه گیری از حدود پارامترها، مقادیر انتخاب شده به مدل معرفی، اجرا و متعاقباً مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود. بعد از هر بار نمونه‌گیری، اجرای مدل و محاسبه مقدار تابع هدف، دامنه هر پارامتر کاهش می‌یابد. مراحل انجام کار در این پژوهش در شکل ۴ قابل مشاهده است.

پارامترهای مورد نیاز برای واسنجی مدل انتخاب و این پارامترها و مقادیر آن‌ها به صورت بازه‌ای برای جریان، رسوب و کیفیت آب وارد مدل SWAT-CUP شده است. واسنجی مدل ابتدا برای دبی جریان، سپس رسوب و در نهایت پارامترهای کیفی مغذی انجام شده است. برای واسنجی پارامترهای مغذی، مقادیر نیتروژن کل و فسفر کل، با توجه به پارامترهای مرتبط به هر یک واسنجی شده‌اند. پس از واسنجی مدل، با استفاده از مقادیر نهایی پارامترها، اعتبارسنجی مدل انجام شده و بر اساس شاخص‌های آماری خطا (ضریب نش–ساتکلیف (NS) و ضریب همبستگی (R^2))، نتایجی به شرح زیر حاصل شده است. تعدادی از پارامترهایی که برای واسنجی مدل SWAT استفاده شده‌اند، در جدول ۱ نمایش داده شده‌اند.

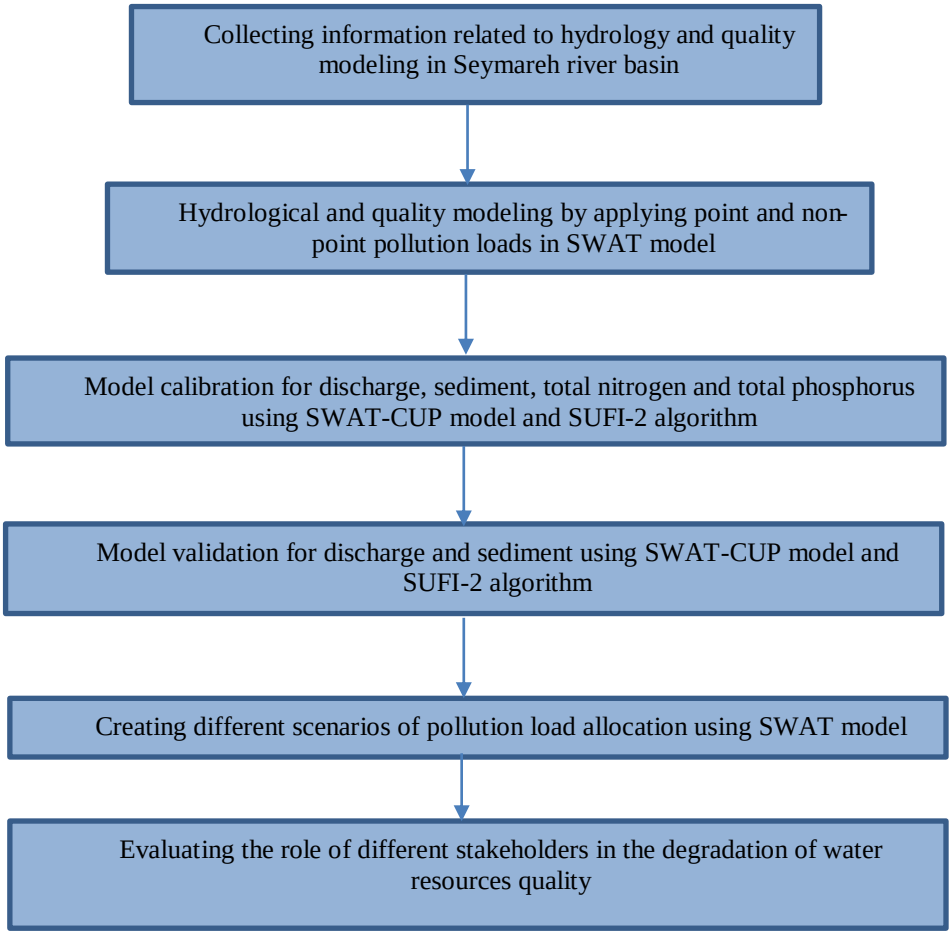


Fig. 4- Flow Diagram for Modelling Steps

شکل ۴- فلودیاگرام مراحل مدل‌سازی

Table 1- Some parameters adjusted in SWAT model calibration process

جدول ۱- برخی پارامترهای تنظیم شده در فرآیند واسنجی مدل SWAT

	Parameter	Explanation		Parameter	Explanation
1	r__CN2.mgt	Initial SCS curve number for medium moisture conditions	11	v_NPERCO.bsn	Nitrate diffusion coefficient
2	r__SOL_AWC.sol	Available water capacity of soil layers	12	r_ERORGN.hru	Concentration of ON due to sediments from runoff
3	v__ALPHA_BF.gw	Base flow alpha parameter for groundwater	13	v__RCN.bsn	Rain nitrogen
4	r__CH__N2. rte	Manning coefficient of the main waterway	14	r__BC1.swq	Oxidation rate of NH4 to NO2
5	r__OV_N.hru	Manning coefficient of basin flow	15	v__CDN. Bsn	Denitrification power rate coefficient
6	v__ADJ_PKR.bsn	Maximum rate correction factor for sediment trend in the sub-basin	16	r_ERORGP.hru	OP concentration due to sediments from runoff
7	v_SPEXP.bsn	Power parameter in estimation of waterway sediment load	17	r_BC4.swq	Conversion rate of OP to soluble phosphorus
8	v_SPCON.bsn	Linear coefficient for calculating the maximum amount of sediment	18	r__RS5.swq	OP sedimentation rate in the river
9	r__CH_COV.rte	Waterway cover factor	19	r__RS2.swq	Release rate of soluble phosphorus from sediment in river
10	r_CH_EROD.rte	The erodibility factor of waterways	20	r__BIO_EAT.mgt	Dry weight of biomass consumed per day by livestock grazing

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT

مدل‌سازی هیدرولوژی و کیفیت منابع آبی محدوده تحت مطالعه در مدل SWAT مبتنی بر گنجاندن داده‌های ایستگاههای هواشناسی، نقشه‌های محیط Arc Map (اطلاعات مکانی و مقداری) توپوگرافی و ارتفاعی، شیب، پوشش گیاهی، کاربری اراضی، جنس خاک و اطلاعات الگوی کشت، الگوی آبیاری، مصرف کود و سموم، اطلاعات دام و غیره انجام پذیرفت. با توجه به ویژگیهای توپوگرافی و ارتفاعی محدوده تحت مطالعه، این منطقه به ۸۰ زیر حوضه[۷] و ۲۲۹۶ واحد پاسخ هیدرولوژیکی[۸] (HRU) تقسیم‌بندی شد. نقاط تلاقی آبراهه‌ها به عنوان زیرحوضه و سطوحی از حوضه که دارای مشخصات یکسان هستند (از لحاظ نوع کاربری، جنس خاک و درصد شیب)، به عنوان HRU درنظر گرفته می‌شوند.

واسنجی مدل دبی جریان برای سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۱ انجام شده و از داده‌های سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۳ برای اعتبارسنجی مدل استفاده شده است. مقایسه داده‌های مشاهداتی دبی ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب، گاماسیاب و تنگ سازبن، با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مدل

SWAT بر اساس پارامترها و ضرایب واسنجی تنظیمی بهینه در شکل ۵ ارائه شده است.

بر اساس نتایج مدل، در بعضی بازه‌های زمانی اختلاف بیشتری میان این داده‌ها وجود دارد که می‌تواند ناشی از عدم دسترسی به داده‌های مناسب و کامل از پارامترهای ورودی مدل در برخی بازه‌های زمانی و مکانی ایجاد شود. این رویداد در رابطه با رسوب و غلظت نیتروژن و فسفر نیز صدق می‌کند که در قسمت‌های بعدی نشان داده شده‌اند. مقادیر NS برای پارامتر دبی در ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن به ترتیب ۰/۸۶ و ۰/۸۱ و مقدار R^2 به ترتیب ۰/۸۹ و ۰/۸۹ به دست آمده است. واسنجی رسوب برای ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن انجام و نتایج آن در نمودارهای شکل ۶ ارائه شده است.

شاخص‌های آماری به دست آمده از واسنجی مدل رسوب در مدل SWAT برای ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن در مورد NS به ترتیب ۰/۶۷ و ۰/۶۱ و برای شاخص R^2 برابر ۰/۸۴ و ۰/۸۴ به دست آمده است. به منظور واسنجی پارامترهای مغذی، ابتدا نیتروژن کل و سپس فسفر کل واسنجی شدند. با توجه به محدودیت داده‌های کیفیت، واسنجی برای سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ انجام شده است. نتیجه واسنجی نیتروژن کل در شکل ۷ قابل مشاهده است.

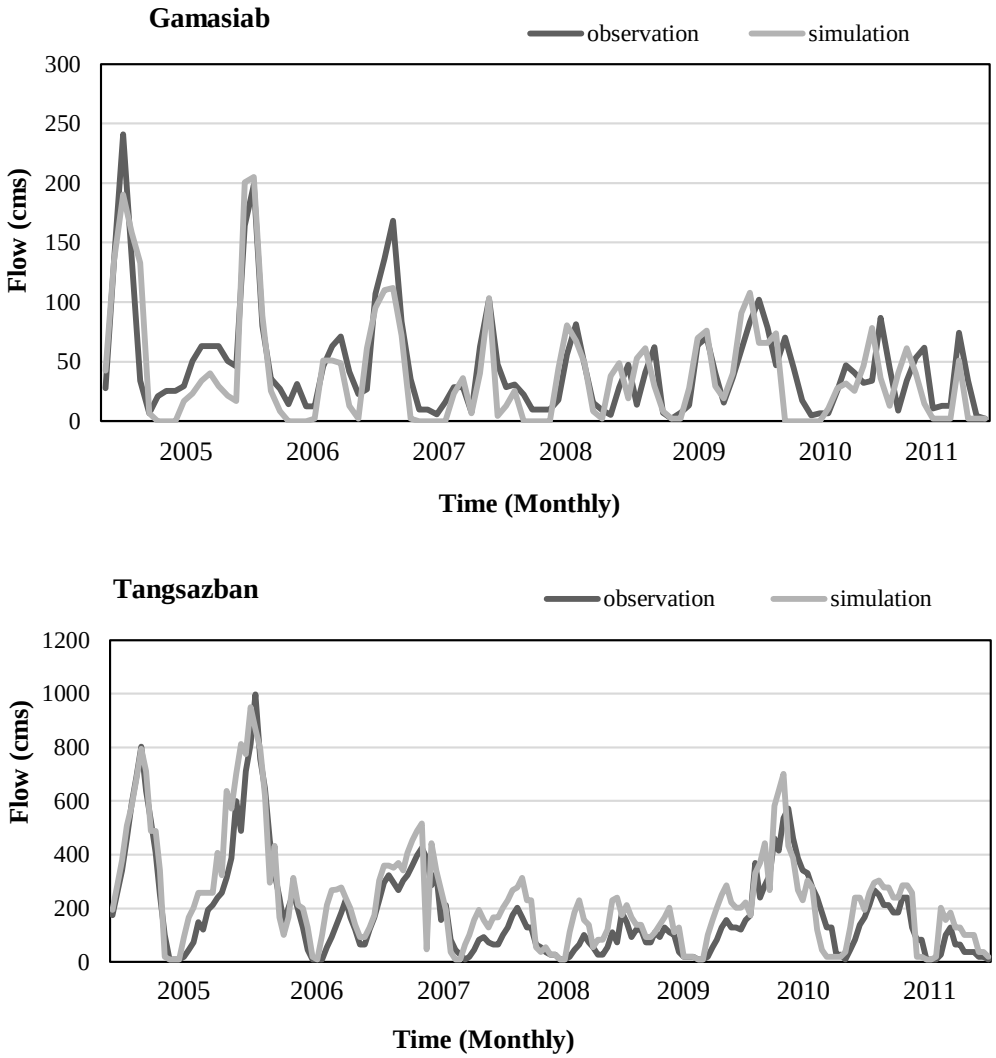


Fig. 5- Comparison of simulated and observed monthly discharge in hydrometric stations; Calibration period 2005-2011

شکل ۵- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی آبدهی ماهانه در ایستگاه هیدرومتری؛ دوره واسنجی ۲۰۱۱-۲۰۰۵

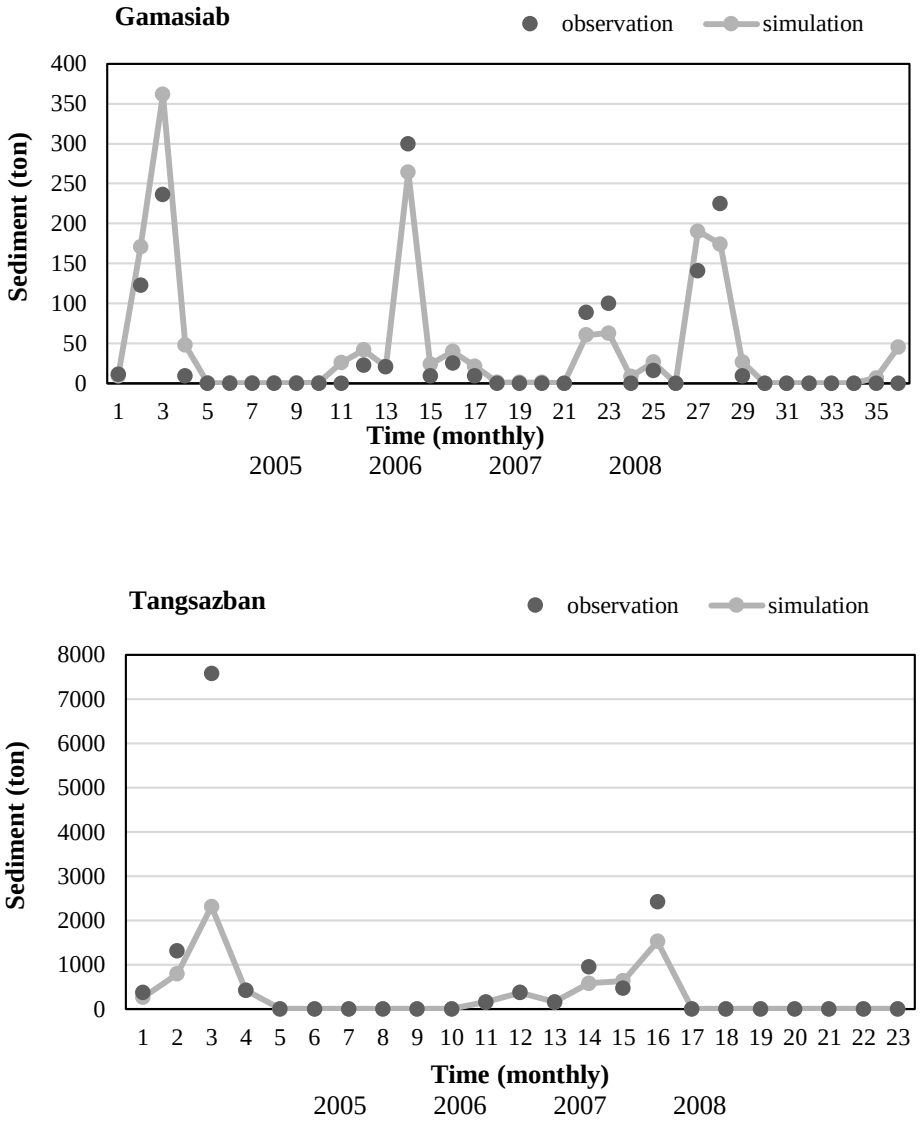


Fig. 6- Comparison of simulated and observed monthly sediment in hydrometric stations; Calibration period 2005-2008

شکل ۶- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی رسوب ماهانه در ایستگاه هیدرومتری؛ دوره واسنجی ۲۰۰۸-۲۰۰۵

شاخص‌های آماری به دست آمده از واسنجی مدل برای شاخص آماری NS در ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن به ترتیب برابر ۰/۶۱ و ۰/۶۹ و برای شاخص آماری R^2 برابر ۰/۸۲ و ۰/۸۹ به دست آمده است. فسفر کل نیز برای سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ واسنجی شده است که نتیجه آن در نمودارهای شکل ۸ نشان داده شده است.

شاخص‌های آماری مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های میدانی در دوره واسنجی فسفر کل مدل در زیرحوضه‌های مختلف برای ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن برای شاخص NS به ترتیب برابر ۰/۷۸ و ۰/۷۳ و برای شاخص R^2 برابر ۰/۸۲ و ۰/۸۷ به دست آمده است.

در ادامه، مدل SWAT برای دبی جریان و رسوب اعتبارسنجی شده است. برای دبی جریان از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۳ و اعتبارسنجی رسوب برای سال ۲۰۰۹ انجام شده است. شاخص‌های آماری مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های میدانی در دوره اعتبارسنجی دبی شبیه‌سازی شده توسط مدل SWAT در ایستگاه‌های گاماسیاب و تنگ سازبن برای شاخص NS به ترتیب برابر ۰/۸۶ و ۰/۷۸ و برای شاخص R^2 برابر ۰/۸۵ و ۰/۸۵ به دست آمده است.

هم‌چنین برای اعتبارسنجی رسوب، شاخص آماری NS برای ایستگاه‌های مذکور به ترتیب برابر ۰/۷۲ و ۰/۷۷ و برای شاخص R^2 برابر ۰/۸۱ و ۰/۸۷ به دست آمده است.

۴-۲- بررسی نقش واحدهای آلاینده در زوال کیفیت منابع آب حوضه

با هدف بررسی نقش واحدهای آلاینده در اضمحلال کیفیت پیکره آبی پایاب (مخزن سد سیمره)، اثر حذف کاهش غلظت فسفر در واحدهای آلاینده نقطه‌ای مورد بررسی قرار گرفت. بررسی اثرگذاری حذف آلایندگی فسفر در محدوده تحت مطالعه به دلیل نقش کنترل کنندگی این پارامتر بر رویداد تغذیه‌گرایی منابع آب پایاب در حوضه آبریز تحت مطالعه است. واحدهای آلاینده نقطه‌ای ۱- آبزی‌پروری صحنه-کنگاور، ۲- فاضلاب شهری دیناور-صحنه-هرسین، ۳- فاضلاب شهری ملایر، ۴- فاضلاب شهری کرمانشاه و ۵- فاضلاب شهری و واحد آبزی‌پروری اسلام آباد غرب در ارزیابی اثرگذاری به دلیل شار آلایندگی بالاتر، بر کیفیت جریان خروجی از محدوده تحت مطالعه مورد توجه قرار گرفتند. در شکل ۹، نقش حذف کامل هر یک از واحدهای آلاینده مذکور بر غلظت متوسط ماهانه فسفر در نقطه کنترل حوضه ارائه شده است.

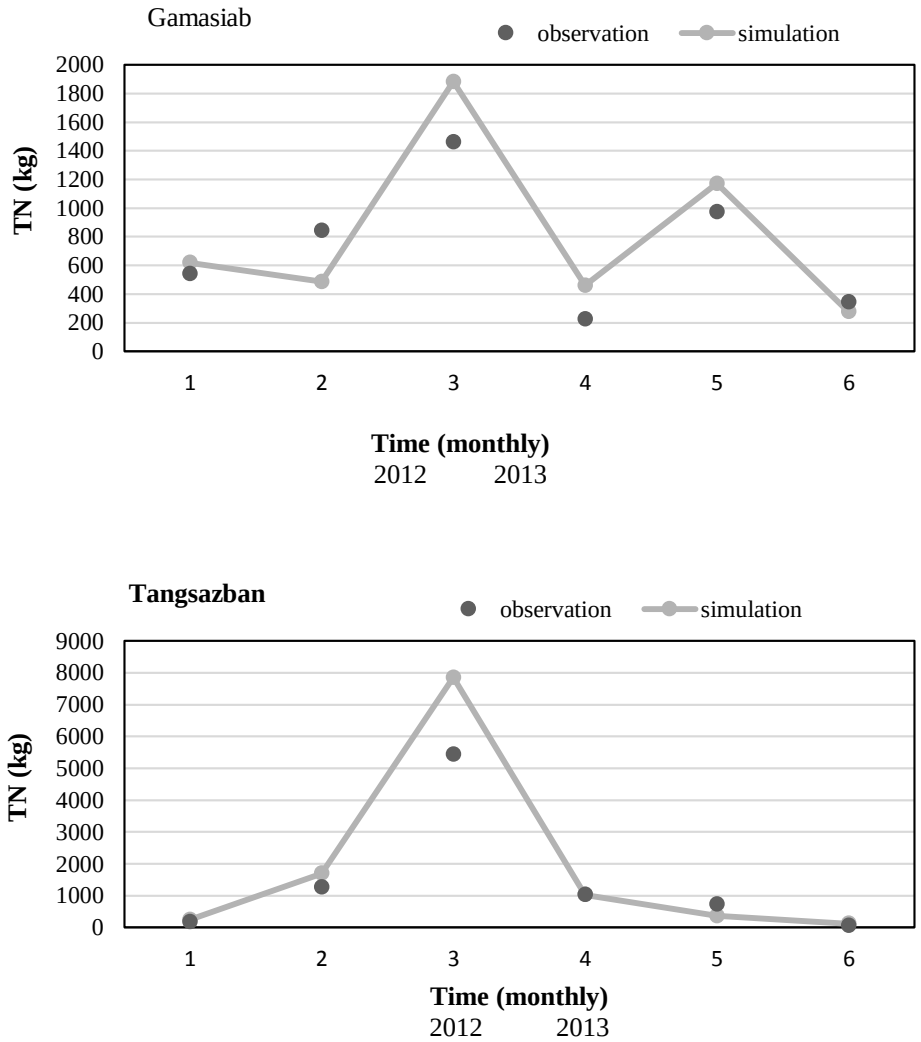


Fig. 7- Comparison of simulated and observed total nitrogen in monitoring stations; Calibration period 2012-2013

شکل ۷- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی نیتروژن کل ماهانه در ایستگاههای پایش؛ دوره واسنجی۲۰۱۳-۲۰۱۲

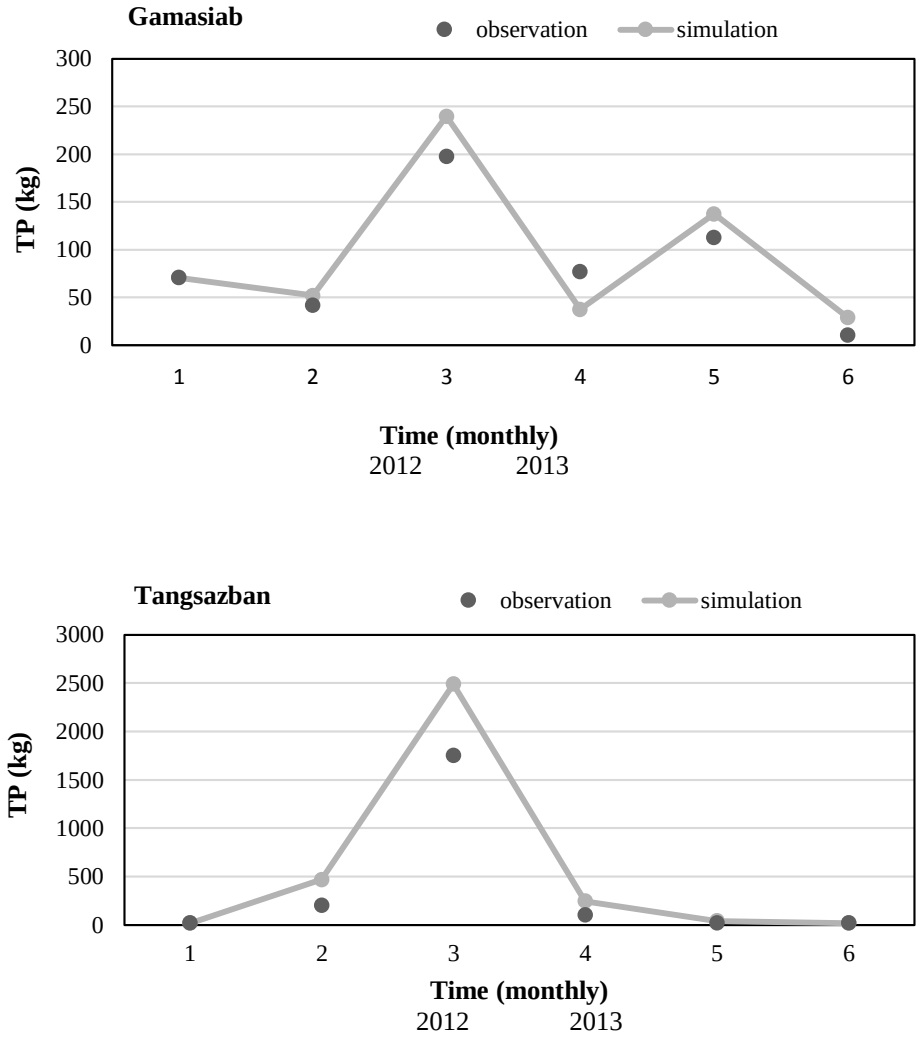


Fig. 8- Comparison of simulated and observed total phosphorus in monitoring stations; Calibration period 2012-2013

شکل ۸- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی فسفر کل ماهانه در ایستگاههای پایش؛ دوره واسنجی۲۰۱۳-۲۰۱۲

بر اساس نتایج ارائه شده نقش فاضلاب شهری کرمانشاه نسبت به سایر واحدهای آلاینده نقطه‌ای پررنگ و اثرگذارتر از سایر واحدهای آلاینده نقطه‌ای در سطح حوضه آبریز است. حجم و غلظت بالای دبی و آلاینده‌های نیتروژن و فسفر در این واحد آلاینده و نزدیکی بیشتر آن نسبت به نقطه کنترل نسبت به برخی دیگر از واحدهای آلاینده نقطه‌ای عنوان شده اخیر (با نسبت کمتر)، از مهمترین عوامل اثرگذار بر کیفیت فسفر خروجی از حوضه است. با این حال، بررسی نقش واحدهای آلاینده نقطه‌ای نشان می‌دهد، حتی با حذف کامل تعداد قابل توجهی از این واحدهای اثرگذار (۵ مورد عنوان شده اخیر)، دستیابی به کیفیت مطلوب و/یا حتی نزدیک به قابل قبول در حوضه میسر نیست. دلیل این مهم نقش اثرگذار فعالیت‌های کشاورزی و دامپروری در حوضه و عوامل طبیعی و انسانی فرسایش خاک نسبت به منابع آلاینده نقطه‌ای در این حوضه است. به‌عبارتی می‌باید اقدامات کنترل مصرف کود، سموم و سایر فرآورده‌های شیمیایی مورد استفاده در فعالیت‌های کشاورزی (منابع آلاینده غیرنقطه‌ای) مورد توجه قرار گیرند و همچنین فعالیت‌های دامپروری سطح حوضه و فضولات دامی و کشاورزی ناشی از آن، به گونه‌ای مناسب برنامه‌ریزی و کنترل شود.

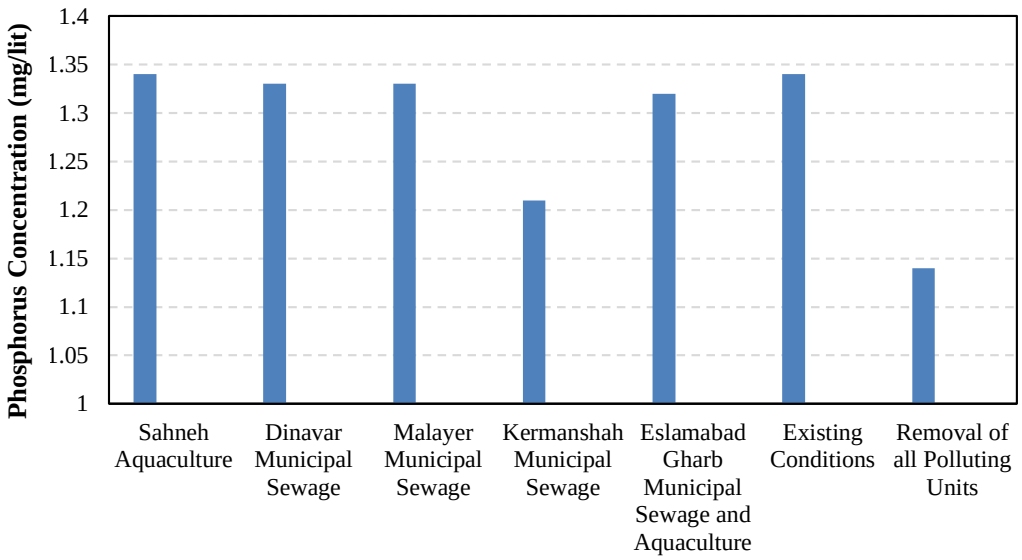


Fig. 9- The effects of different waste load allocation scenarios on effective point pollutant sources on the average monthly phosphorus concentration in basin outflow (control point)

شکل ۹- تأثیر سناریوهای مختلف تخصیص بار آلودگی بر میانگین ماهانه غلظت فسفر در نقطه خروجی حوضه آبریز (نقطه کنترل)

۵- جمع‌بندی

کیفیت آب‌های سطحی تأثیر زیادی بر روی سلامتی انسان و اکوسیستم‌های آبی دارد. ورود حجم زیاد از مواد مغذی و رسوبات ناشی از فرسایش اراضی به آب می‌تواند باعث به وجود آمدن مشکلاتی و متعاقب آن، نامناسب شدن آب برای مصارف روزانه و تولیدات صنعتی و کشاورزی شود. در این پژوهش مدل‌سازی کمیت و کیفیت حوضه آبریز سیمره با نرم‌افزار SWAT انجام شده و مدل مورد واسنجی و اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس نقش هریک از آلاینده‌های نقطه‌ای در کیفیت آب خروجی از حوضه مورد بررسی قرار گرفته است.

واسنجی مدل هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آب محدوده تحت مطالعه در محیط SWAT به ترتیب مبتنی بر داده‌های ماهانه دبی جریان، رسوب و پارامترهای مغذی کیفیت منابع آبی (فسفر کل و نیتروژن کل) بوده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای مشاهداتی از شرکت مدیریت منابع آب و سازمان حفاظت محیط زیست ایران گردآوری و معیار مقایسه عملکرد مدل در ترسیم وضعیت هیدرولوژیکی و کیفیت منابع آبی شرایط موجود در حوضه آبریز سیمره قرار گرفته است. آماده‌سازی و تنظیم مدل SWAT با استفاده از ابزار SWAT-CUP و الگوریتم SUFI2 و مبتنی بر شاخصه‌های آماری خطا از تقریب پارامترهای دبی جریان و رسوب در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاههای هیدرومتری محدوده مطالعه بوده است. به دلیل محدودیت دسترسی به داده‌های پایش پارامترهای کیفیت مواد مغذی، تنها واسنجی مدل SWAT برای پارامترهای نیتروژن کل و فسفر کل در ایستگاههای پایش مورد مطالعه قرار گرفت. پس از آماده‌سازی مدل هیدرولوژی و کیفیت منابع آب، SWAT، در سطح حوضه آبریز بالادست مخزن سیمره، کنترل و مدیریت آلاینده فسفر در منابع آلاینده نقطه‌ای مورد توجه و مطالعه قرار گرفت.

بر اساس نتایج حاصل از مدل‌سازی و بررسی میان منابع آلاینده نقطه‌ای ، حذف کامل بار فسفر کل واحدهای آلاینده نقطه‌ای مهم (فاضلاب شهری ملایر، کرمانشاه، دیناور–صحنه و آبزی پروری اسلام آباد غرب و صحنه–کنگاور) سبب کاهش ۱۵درصدی متوسط غلظت فسفر کل خروجی از حوضه شده است. همچنین، فاضلاب شهری کرمانشاه نقش به مراتب حائز اهمیتی در میان منابع آلاینده نقطه‌ای در تخریب کیفیت آب حوضه دارد به طوری که تصفیه کامل فسفر فاضلاب آن سبب کاهش ده درصدی غلظت فسفر کل در جریان خروجی از حوضه می‌شود. مطالعات و بررسی‌های انجام شده در وضعیت کیفی حوضه نشان می‌دهند که بارهای آلاینده غیرنقطه‌ای (کشاورزی و دامپروری) و فرسایش خاک، نقش قابل توجهی در زوال کیفیت منابع آب حوضه در مقایسه با واحدهای آلاینده نقطه‌ای دارند و لذا اعمال سناریوهای تخصیص بار آلودگی مبتنی بر صرفاً منابع آلاینده نقطه‌ای، در بهبود کیفیت منابع آب حوضه اثرگذار نخواهد بود. علاوه بر این بررسی‌ها نشان می‌دهد که حذف کامل آلودگی واحدهای

آلاینده بزرگ (۵ واحد آلاینده) به تنهایی سبب قرارگیری حوضه در شرایط استانداردهای کیفیت آب نمی‌شود. لذا بارهای آلودگی غیرنقطه‌ای کشاورزی و دامپروری نیز می‌باید در دستور کار اعمال برنامه‌های مدیریت و کنترل بار آلودگی قرار گیرند. با توجه به کمبود فراوانی دسترسی به داده‌های کیفیت مواد مغذی و رسوب در سطح حوضه آبریز، اولویت‌بخشی به پایش این پارامترها در منابع آبی محدوده تحت مطالعه و/یا استفاده از نرم‌افزارهای تخمین بار آلایندگی (برای مثال Loadest) برای تکمیل این مطالعات، پیشنهاد می‌شود. مدیریت کمیت و کیفیت منابع آبی در مسائلی مانند بهره‌برداری از آب، ارزش و قیمت آب با لحاظ نمودن کیفیت‌های مختلف؛ لحاظ نمودن شاخص‌های رد پای آبی[۹] یا رد پای اکولوژیکی[۱۰] در تخصیص بار آلودگی از جمله مواردی هستند که می‌توانند در تحقیقات آتی مدیریت منابع آبی مورد توجه قرار گیرند.

پی‌نوشت‌ها

1- Soil and Water Assessment Tool
2- Ken Basin
3- Lake Erie
4- Old Woman Creek
5- Total Dissolved Solids
6- Latin Hypercube
7- Sub Basin
8- Hydrologic Response Unit
9- Water Footprint
10- Ecological Footprint

۶- مراجع

Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghefi S, Srinivasan R, Yang H and Kløve B (2015) A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, Elsevier B.V., 524:733–752

Addab H and Bailey RT (2022) Simulating the effect of subsurface tile drainage on watershed salinity using SWAT. Agricultural Water Management 262:107431

Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1. Journal of the American Water Resources Association. 1998 Feb; 34(1):73-89.

Ashrafi S, Pourmighim P, Behboudian M, and Motlaghzadeh K (2022) Evaluating and improving the sustainability of ecosystem services in river basins under climate change. Science of The Total Environment 806:150702

Castillo CR, Güneralp I, and Güneralp B (2014) Influence of changes in developed land and precipitation on hydrology of a coastal Texas watershed. Applied Geography 47(4):154–167

Duan Z, Song X, and Liu J (2009) Application of SWAT for sediment yield estimation in a mountainous agricultural basin. Proceedings of 17th International Conference on Geoinformatics

IRDoE (IRAN Department of Environmental) (2009) Final report of Karkheh River pollution prevention, control and reduction plan. (In Persian)

Goodwin SA (2011) Excess nutrients and cultural eutrophication of the Cache La Poudre River□: A Study of the Occurrence and Transport of Phosphorus. MSc Thesis, Colorado State University, Colorado, USA

Hanief A and Laursen AE (2017) SWAT modeling of hydrology, sediment and nutrients from the grand river, Ontario. Water Quality Research Journal 52(4):243–257

Himanshu SK, Pandey A, and Shrestha P (2017) Application of SWAT in an Indian river basin for modeling runoff, sediment and water balance. Environmental Earth Sciences 76(3):1-18

IWRMC (Iran Water Resources Management Company) (2003) Geological report of Seymareh Dam reservoir. (In Persian)

Meshesha TW, Wang J, Melaku ND, and McClain CN (2021) Modelling groundwater quality of the Athabasca River Basin in the subarctic region using a modified SWAT model. Scientific Reports 11

Molina-Navarro E, Trolle D, Martínez-Pérez S, Sastre-Merlín A, and Jeppesen E (2014) Hydrological and water quality impact assessment of a Mediterranean limno-reservoir under climate change and land use management scenarios. Journal of Hydrology 509:354–366

Nazari-Sharabian M, Taheriyoun M, Ahmad S, Karakouzian M, and Ahmadi A (2019) Water quality modeling of Mahabad Dam watershed-reservoir system under climate change conditions, using SWAT and system dynamics. Water 11(2):394

Olaoye IA, Confesor RB, and Ortiz JD (2021) Impact of seasonal variation in climate on water quality of Old Woman Creek Watershed Ohio using SWAT. Climate 9(3):50

Ouyang W, Skidmore AK, Toxopeus AG, and Hao F (2010) Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin. Journal of Hydrology 389(3-4):373-380

Raja O, Parsinejad M, Tajrishi M (2022) Multipurpose calibration of SWAT model in estimating runoff, evapotranspiration, and crop yield (A case study: Mahabad Plain). Iran-Water Resources Research 17(4):11-34(In Persian)

Salimirad H, Dehvari A, Galavi H, Ebrahimian M (2020) Identification and uncertainty analysis of sensitive parameter of SWAT model in Kardeh streamflow simulation. Iran-Water Resources Research (In Persian) 16(3):212-221

Spruill CA, Workman SR, and Taraba JL (2000) Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model, Biosystems and Agricultural Engineering Faculty Publications.43(6):1431-1439

Wu Y and Chen J (2013) Investigating the effects of point source and nonpoint source pollution on the water quality of the East River (Dongjiang) in South China. Ecological Indicators 32:294–304