

مدل سازی روند تغییرات کیفیت آب سطحی با استفاده از مدل SWAT در حوضه

آبریز ارداک مشهد

مرتضی نیک اختر^۱

سیده هدی رحمتی^{۲*}

rahmati@srbiau.ac.ir

علیرضا مساح بوانی^۳

ایمان بابائیان^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۸

چکیده

زمینه و هدف: در سال‌های اخیر با توجه به گسترش آلودگی منابع آب و با وجود گزارشات و تکنیک‌های مختلف، مدل‌های هیدرولوژیکی به واسطه توانمندی بسیار زیاد آنها در تجزیه و تحلیل اطلاعات و صرفه جویی‌های اقتصادی ناشی از آنها به ابزارهای مناسبی برای مدیریت برنامه‌ریزی منابع آب تبدیل شده‌اند. در این مطالعه با استفاده از مدل نیمه‌توزیعی SWAT^۵، که بر اساس پدیده‌های فیزیکی و غیر فیزیکی حاکم بر محیط آب عمل می‌نماید، نسبت به مدل سازی کمی و کیفی آب رودخانه ارداک مشهد که بخش قابل توجهی از آب مورد نیاز در بخش‌های شرب و کشاورزی این کلان شهر را تامین می نماید اقدام گردیده و وسیله مناسبی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های آتی را فراهم می‌نماید.

روش بررسی: پس از ورود اطلاعات و ساخت مدل در فضای Swat، برای واسنجی و صحت سنجی کمیت‌های دبی، NO₃، MINP، TSS، DO و CBOD در مدل SWAT-CUP، عمل نمونه‌برداری و آزمایش پارامترهای مختلف کیفی آب در ۱۲ دوره یک ماهه در طول سال آبی ۹۸-۹۹ انجام شد.

یافته‌ها: نتایج نشان داد که به غیر از نیترات میزان سایر پارامترهای کیفی آب مانند فسفر، رسوب و مواد آلی در فصول پرآب سال بیشتر است.

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

۲- استاد یار، گروه مهندسی محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران.* (مسئول مکاتبات)

۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۴- استادیار، پژوهشکده اقلیم شناسی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، مشهد، ایران.

بحث و نتیجه‌گیری: مدل ساخته شده توانایی مناسبی در شبیه‌سازی وضعیت واقعی رودخانه دارد و می‌توان از آن برای تعریف و اجرای انواع سناریوهای موثر بر کیفیت آب استفاده و با آزمون گزینه‌های مختلف بهترین شیوه‌ها را شناسایی نمود.

واژه‌های کلیدی: رودخانه ارداک، مدل‌سازی، SWAT، نمونه‌برداری.

Surface water Quality modeling using SWAT for ARDAk Basin of Mashhad

Morteza Nikakhtar¹

Seyedeh Hoda Rahmati^{2*}

rahmati@srbiau.ac.ir

Ali reza Massah Bavani³

Iman Babaeian⁴

Admission Date: January 23, 2022

Date Received: November 29, 2021

Abstract

Background and Objective: During last decades, despite developing various reports and techniques, due to over expansion of water pollution, hydrological models have become sophisticated tools for water resources management and planning because of their remarkable ability to analyze information and economic savings resulting from their application. In this study, using the SWAT semi-distributed model, which operates on the basis of physical and non-physical processes governing the water environment, quantitative and qualitative modeling was developed for Ardak River which supplies a significant part of water demand in drinking and agricultural sectors of Mashhad mega city. So, this research is going to provide a right tool for future planning and design making.

Material and Methodology: After entering the information and constructing the model in Swat, for calibration and verification of stream flow, NO₃, MINP, TSS, DO and CBOD in SWAT-CUP model, sampling and testing of different water quality parameters were performed in 12 monthly periods from march 2019 to February 2020.

Findings: The results showed that except for nitrate, the amount of other water quality parameters such as phosphorus, sediment and carbonaceous organic matter is higher in wet seasons.

Discussion and Conclusion: The developed model has a considerable ability to simulate the actual condition of the river and it can be applied to define and implement a variety of scenarios affecting water quality for identifying the best practices by testing different options.

Keywords: Ardak River, modeling, SWAT, sampling.

1- PhD student, Environmental Engineering Department, Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University.

2- Assistant Professor, Environmental Engineering Department Tehran Science and Research Branch, Islamic Azad University. *(Corresponding Author)

3- Associate professor, Abooreyhan compound of Tehran university, Department of water engineering, Tehran, Iran.

4- Assistant Professor, climate Research Institute, Atmospheric Science and meteorological Research Center, Mashhad, Iran.

مقدمه

دبی، رسوب و مواد مغذی نمودند. در انتها نتایج حاکی از قابلیت خوب مدل در شبیه‌سازی دبی و نیترات و همچنین توانایی قابل قبول آن برای رسوب و فسفر بود. بو سکیدیس و همکاران (۲) در حوضه آبریز رودخانه وزوزیس واقع در شمال یونان نسبت به واسنجی و صحت‌سنجی دبی، نیتروژن و فسفر در مدل SWAT اقدام نمودند. مقایسه مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل و مقادیر مشاهداتی انطباق خوبی را نشان داد که از آن برای آزمایش سناریوهای کشت مختلف و موثر در فرآیندهای حاکم بر حوضه آبریز استفاده شد. دوتا و همکاران (۳) با هدف ارزیابی هیدرولوژیکی رودخانه براهماپوترا که حوضه آبریز آن مشترک بین کشورهای چین، هند و بنگلادش می‌باشد نسبت به صحت‌سنجی دبی جریان اقدام نمودند. آنها در این حوضه آبریز فاقد آمار، با بکارگیری منابع محدود و مختلف اطلاعات آب و هوایی، نسخه‌های مختلفی از مدل SWAT را ساخته و سرانجام پس از صحت‌سنجی، مناسب‌ترین سری آب و هوایی را شناسایی و مدل منتخب را ابزاری مناسب برای طراحی‌های کمی و همچنین تحلیل مسایل مربوط به کیفیت آب معرفی کردند. محمدی و همکاران (۴) در حوضه آبریز تالار مازندران، دبی رواناب و نیترات را در مدل SWAT صحت‌سنجی نمودند. مطالعه کنندگان در این پژوهش با تهیه نقشه دبی و نیترات هر زیرحوضه نشان دادند که نتایج نهایی صحت‌سنجی بیان‌گر تطبیق مناسب مدل با شرایط واقعی رودخانه در میزان جریان و غلظت نیترات است. آبابابی و همکاران (۵) به منظور ارزیابی توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی عوامل حاکم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز زاینده‌رود، دبی جریان رودخانه را صحت‌سنجی نمودند. نامبردگان با استفاده از شاخص‌های آماری مختلف و نتایج بدست آمده در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی، مدل توسعه‌یافته را ابزاری مناسب برای مدیریت کمی و کیفی منابع آب‌سطحی حوضه مطالعاتی فوق گزارش کردند. کاویان و همکاران (۶) برای بررسی شرایط مدل SWAT در حوضه آبریز هراز واقع در استان مازندران، دبی جریان و میزان رسوبات موجود در آب سطحی را شبیه‌سازی نمودند. سپس مقایسه

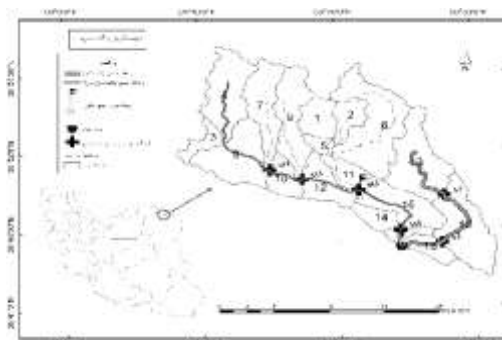
آب همیشه به عنوان یک ضرورت حیاتی در تمام فعالیت‌های بشر از جمله کشاورزی، تولید نیرو، بهداشت و غیره مطرح بوده است. کیفیت آبی که وارد بدن انسان می‌شود همانند کیفیت آب دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و دیگر جریان‌های آبی موجود در محیط زندگی ما، معیاری بسیار مهم از کیفیت کلی زندگی ماست. امروزه بسیاری از رودخانه‌ها بوسیله فعالیت‌های انسانی در معرض خطر قرار گرفته‌اند و بطور کلی محیط طبیعی یک رودخانه متأثر از مواردی همچون کاربری‌های نامناسب، دفع زباله و فاضلاب از منابع مختلف، سموم و کودهای مورد استفاده در کشاورزی می‌باشد. اگر چه در سال‌های اخیر مطالعات زیادی درخصوص مباحث کمی آب صورت گرفته است، توجه و تمرکز کمتری بر مسایل و جنبه‌های کیفی آب بوده است. آگاهی از روند تغییرات کیفی آب در زمان‌های مختلف و نحوه استقرار منابع پخش و انتشار آلودگی‌ها و بررسی هم‌پوشانی‌ها تأثیر بسزایی در ارزیابی‌های دقیق و اقدامات بهتر سازمان‌ها و متخصصان و ذی‌نفعان مربوط دارد. از آنجاییکه نمونه‌برداری و آنالیز پارامترهای کیفیت آب در یک برنامه بلندمدت دارای هزینه‌های زیادی است و مستلزم تخصیص منابع و امکانات فراوان است، رویکردی که در سال‌های اخیر به صورت گسترده مورد توجه و استفاده قرار گرفته، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی می‌باشد. مدل SWAT یک مدل نیمه‌توزیعی است که قادر است متغیرهای مکانی موثر بر آلودگی آب مانند منابع آلاینده نقطه‌ای و گسترده و یا فرسایش را به اطلاعات جغرافیایی حوضه آبریز مرتبط نموده و توانایی پیش‌بینی تأثیرات شیوه‌ها و روش‌های مختلف اداره منابع خاک، آب و کشاورزی را تحت شرایط مختلف کاربری اراضی و خاک فراهم می‌کند. این مدل در سال‌های اخیر مورد توجه بسیار زیادی قرار گرفته و در مطالعات زیادی که در بخش آب و با اهداف مختلف صورت گرفته، از آن استفاده شده است. در ادامه به شرح تعدادی از مطالعات انجام شده قبلی خواهیم پرداخت. عباسپور و همکاران (۱) در حوضه آبریزی در شمال غربی سویس با استفاده از مدل مذکور و با هدف سنجش عملکرد مدل اقدام به شبیه‌سازی پارامترهای کمی و کیفی آب مانند

شهرستان مشهد و با مساحتی در حدود ۴۷۹/۲۴ کیلومتر مربع در حوضه آبخیز کشف رود و از نظر سیاسی در محدوده دو شهرستان مشهد و چناران در بخش مرکزی واقع شده است (شکل ۱). رودخانه ارداک یکی از سرشاخه‌های کشف رود است که از سمت چپ (شمال) به این رودخانه می‌پیوندد. کشف رود پس از عبور از دشت مشهد و رشته کوه‌های مزدوران به هریز پيوسته و وارد دشت قره‌قوم می‌شود. رودخانه ارداک خود از دو شاخه اصلی به نام‌های میان‌مرغ به طول ۲۴ کیلومتر از سمت شمال غرب و آبقد به طول ۱۰ کیلومتر از سمت شمال شرق تشکیل یافته، این دو تقریباً در منتهی‌الیه جنوب شرقی حوضه بهم پیوسته و پس از طی حدود ۳ کیلومتر وارد دشت می‌شوند (شکل ۱). در سال‌های اخیر در محل بهم پیوستن دو شاخه اصلی رودخانه، سد ارداک احداث و به بهره‌برداری رسیده است که تامین کننده بخشی از آب شرب شهر مشهد و اراضی کشاورزی مناطق پایین دست می‌باشد. کاربری اراضی در محدوده مطالعاتی مذکور بیشتر از نوع باغداری و کشاورزی بوده و منابع معدنی و صنعتی در این منطقه وجود ندارد. همچنین خاک موجود در این حوضه، بیشتر از جنس سنگ‌های آهکی و شیل است.

نتایج تولید شده بو سیله مدل و آمار مشاهداتی چهار ایستگاه مختلف در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی نشان داد که شبیه‌سازی دبی جریان از دقت بالایی برخوردار است. در پژوهش حاضر، از مدل SWAT در طول هر دو شاخه اصلی رودخانه ارداک که یکی از منابع تامین آب شرب شهر مشهد مقدس می‌باشد استفاده شده است. همچنین منابع آلاینده نقطه‌ای و گسترده مانند دفع پساب‌های روستایی، باغداری و کشاورزی موجود در منطقه مورد شناسایی و ارزیابی قرار گرفته و به همراه اطلاعات کاربری اراضی، خاک و کشاورزی حوضه مطالعاتی وارد مدل شده‌اند. در ادامه پارامترهای مختلف کمی و کیفی آب این رودخانه با استفاده از مدل SWAT-CUP مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفته‌اند که می‌توان از آن برای تدوین و تحلیل سناریوهای مدیریتی حوضه آبریز و اتخاذ بهترین تدابیر و رویکردهای آتی استفاده نمود.

۱- معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز ارداک چناران در عرض جغرافیایی $36^{\circ}43'$ تا $36^{\circ}59'$ و طول جغرافیایی $59^{\circ}31'$ تا $59^{\circ}8'$ واقع گردیده و ارتفاع نقاط آن در محدوده ۱۳۳۱ تا ۳۰۹۶ متر از سطح دریا می‌باشد. این حوضه تقریباً در فاصله ۴۵ کیلومتری شمال غرب



شکل ۱- رودخانه ارداک و انشعابات فرعی آن

Figure 1. Ardak river and its different tributaries

۲- معرفی مدل SWAT

آلاینده در مقیاس حوضه‌های آبریز متوسط تا بزرگ توسعه یافته است (۷). نسخه ابتدایی آن (CREAMS) برای اولین بار توسط سازمان خدمات و تحقیقات کشاورزی ایالات متحده در

ابزار ارزیابی آب و خاک (SWAT) یک مدل پیوسته، نیمه توزیعی (۷) و مبتنی بر فرآیندهای حاکم بر محیط آب است که برای بررسی تاثیرات روش‌های مختلف مدیریت منابع آب و

روزانه ایستگاه تلغور از شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی که مربوط به بازه زمانی ۱۳۶۸ تا ۱۴۰۰ است دریافت و برای مدل سازی ماهانه استفاده شد.

۲-۱-۳- اطلاعات کیفیت آب

برای واسنجی و صحت‌سنجی مدل تولید شده در فضای SWAT به داده‌های واقعی کیفیت آب یا داده‌های مشاهداتی نیاز است. بدین منظور عملیات سنجش دبی توسط دستگاه مولینه، نمونه‌برداری و آنالیز شاخص‌های کیفی آب به صورت ماهانه و در ۱۲ دوره در سال آبی ۹۹-۹۸ در طول دو شاخه اصلی رودخانه ارداک انجام شد. مکان ایستگاه‌های نمونه‌برداری بوسیله روش ساندرس^(۹) محاسبه و تعیین گردیده و سپس ایستگاه‌هایی که منطبق بر محل خروجی زیرحوضه‌ها نبودند حذف و عملیات نمونه‌برداری در ۶ ایستگاه باقی‌مانده انجام شد. همانطور که در شکل ۱ مشخص است نقاط A1 و A2 ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شاخه آبد و نقاط M1، M2، M3 و M4 ایستگاه‌های نمونه‌برداری در شاخه میان‌مرغ می‌باشند.

۲-۲- رواناب سطحی

رواناب هنگامی جریان می‌یابد که نرخ یا میزان آبی که به سطح زمین می‌رسد از مقدار آبی که به درون زمین نفوذ می‌کند بیشتر باشد (۱۰). میزان شاخص‌های کیفی آب مانند نیتروژن، فسفر و مواد معلق به مولفه‌های موثر در تشکیل جریان سطحی و همچنین به نوسانات و تغییرات زمانی و مکانی آنها وابسته است. هنگامی که شدت بارش از میزان آبی که قادر به نفوذ است بیشتر می‌شود، به خاطر جریان یافتن آب بر روی سطح زمین انتقال مواد و آلاینده‌ها به آب سطحی و دریاچه‌ها افزایش می‌یابد. میزان رواناب حاصل از بارندگی در مدل SWAT در هر زیرحوضه از روش پیشنهادی سازمان حفاظت خاک آمریکا SCS محاسبه می‌شود (۷) که بر اساس رابطه (۱) به شرح زیر است:

$$Q_{surf} = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad (1)$$

اواسط دهه ۷۰ میلادی توسعه یافت (۸) و متشکل از چند مدل بود که مجموعاً اثرات کاربری اراضی، کشاورزی و اقدامات مدیریتی را بر آب‌های شیرین، رسوبات و مواد مغذی موجود در آب شبیه‌سازی می‌کردند (۸). در اوایل دهه نود، جف آرنولد برای فایق آمدن بر محدودیت‌های مدل‌های مذکور و دستیابی به یک مدل جامع اقدام به ترکیب و توسعه مدل کنونی SWAT نمود (۸). از آن زمان نسخه‌های متعددی از این نرم افزار منتشر گردیده که در این مطالعه از نسخه ۲۰۱۲ آن که مبتنی بر محیط GIS می‌باشد استفاده شده است. این مدل حوضه را به تعدادی زیرحوضه و اجزاء کوچک‌تری به نام واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم کرده و قادر است که مقادیر کمیت‌های مختلفی مانند دبی، رسوب، مواد مغذی، آفت‌کش‌ها، رشد محصولات و شیوه‌های مختلف اداره زمین و کشاورزی را بر اساس فرآیندها و روابط هریک، در ورودی و خروجی زیر حوضه‌ها و نیز در مقیاس HRU و در بازه‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه محاسبه نماید (۷) (۸). همانطور که در شکل ۱ مشخص است، حوضه آبریز ارداک در مدل SWAT به ۱۹ زیر حوضه تقسیم شده است.

۲-۱-۲- ورودی های مدل SWAT

۲-۱-۲-۱- مدل رستری

مدل رقومی ارتفاع یا DEM مدلی دیجیتال یا نمایشی سه بعدی از سطح زمین است که معمولاً برای نمایش ناهمواریها و با استفاده از داده‌های ارتفاع از سطح دریا تهیه می‌شود. بدین منظور از مدل ۱۲٫۵ متری رقومی که با استفاده از تصاویر Alos تهیه شده است استفاده شد. این اطلاعات با مراجعه به لینک vertex.daac.asf.alaska.edu برای محدوده مطالعاتی استخراج و وارد مدل گردید.

۲-۱-۲-۲- اطلاعات هواشناسی

مدل swat برای محاسبه میزان رواناب رودخانه از اطلاعات بارش و دمای منطقه استفاده می‌کند. بدین منظور اطلاعات

۲-۴- اکسیژن محلول

گازهای محلول مانند اکسیژن و دی‌اکسیدکربن، هم در آب سطحی و هم در آب زیرزمینی وجود دارند و بطور کلی چنانچه کیفیت آب خوب باشد حاوی مقادیر زیادی از اکسیژن محلول می‌باشد. چنانچه مواد آلی از منابعی مانند ضایعات خام و تصفیه نشده انسانی یا حیوانی وارد آب سطحی شود میزان اکسیژن محلول آب کاهش می‌یابد. این امر به خاطر افزایش رشد میکروارگانیسم‌های موجود در آب است که مواد آلی را به عنوان منبع انرژی مصرف می‌کنند و دی‌اکسیدکربن را وارد می‌نمایند. در مدل SWAT برای محاسبه میزان اکسیژن محلول در رواناب سطحی، اکسیژن جذب شده توسط عوامل اکسیژن‌خواه از غلظت اکسیژن اشباع آب کم می‌شود. مقدار اکسیژن محلول در رواناب سطحی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (۷):

$$OX_{surf} = OX_{sat} - K_1 \cdot cbod_{surq} \cdot \frac{t_{ov}}{24} \quad (4)$$

- که در آن OX_{surf} غلظت اکسیژن محلول در آب سطحی بر حسب (mg O₂/L)، OX_{sat} غلظت اکسیژن اشباع بر حسب (mg O₂/L)، K_1 نرخ اکسیژن‌زدایی CBOD برحسب (day⁻¹)، $cbod_{surq}$ غلظت CBOD در رواناب سطحی بر حسب (mg CBOD/L)، t_{ov} زمان تمرکز برای جریان‌های روی زمینی (جریانی که در سطح زمین پس از بارندگی به‌صورت ورقه ای راه می‌افتد قبل از آنکه به اولین رده آبراهه برسد) است.

که در آن: Q_{surf} ارتفاع رواناب بر حسب میلی‌متر، P ارتفاع بارندگی بر حسب میلی‌متر و S عامل مربوط به نگهداشت رطوبت در خاک است که مقدار آن بر طبق رابطه ۲ برابر است با:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (2)$$

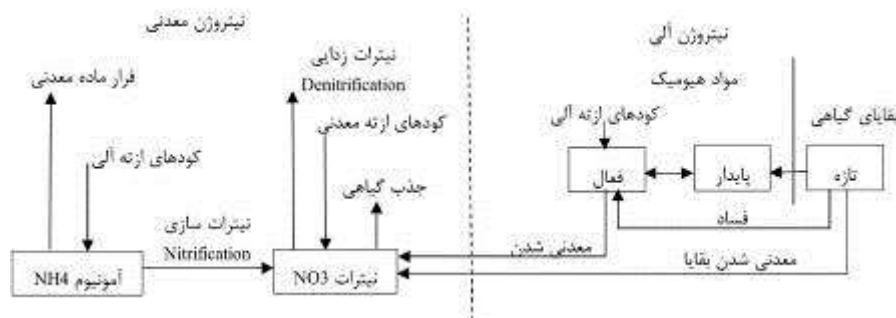
در این معادله CN شماره منحنی مربوط به مقدار نفوذ آب در حوضه می‌باشد.

۲-۳- نرخ مصرف اکسیژن در آب (CBOD)

میزان اکسیژن مورد نیاز برای تجزیه بیولوژیکی مواد آلی است که وارد جریان رودخانه شده‌اند. مدل swat برای بارگزاری CBOD در جریان رودخانه از معادله تامسون و مولر (۱۹۸۷) که به شرح رابطه (۳) است استفاده می‌کند (۷):

$$cbod_{surq} = \frac{2.7 \cdot orgC_{surq}}{Q_{surf} \cdot area_{hru}} \quad (3)$$

که در آن: $cbod_{surq}$ غلظت CBOD در آب سطحی بر حسب (mg CBOD/L)، $orgC_{surq}$ کربن آلی در آب سطحی بر حسب (Kg orgC)، Q_{surf} رواناب سطحی در روز مورد نظر بر حسب (mm H₂O) و $area_{hru}$ مساحت HRU بر حسب (Km²) می‌باشد.



شکل ۲- نیتروزن خاک و فرایندهای حاکم بر آن در مدل swat

Figure 2. Soil Nitrogen and its governing processes in swat model

۲-۵- چرخه نیتروژن

همانطور که در شکل بالا مشخص است سه فرم نیتروژن عبارتند از: نیتروژن آلی که به مواد هیومیک مربوط است، نیتروژن معدنی که به ذرات کلوئیدی خاک مربوط است و دسته سوم نیتروژن معدنی موجود در محلول خاک می باشد. مهم ترین منابع نیتروژن خاک عبارتند از مصرف کودهای کشاورزی، بقایای گیاهی، تثبیت بوسیله باکتری ها و باران (۱۱). نیتروژن دارای مولکول دو اتمی و ساختاری پایدار در طبیعت است و این پایداری بقدری بالا است که موجب کم تحرکی و واکنش پذیری اندک آن شده است و تا زمانیکه نیتروژن با هیدروژن، اکسیژن و یا کربن ترکیب نشود، گیاهان نمی توانند از آن استفاده کنند. در فرآیند معدنی شدن، نیتروژن آلی غیر قابل استفاده برای گیاهان توسط فعالیت های میکروبی به نیتروژن معدنی که قابل استفاده برای گیاهان است تبدیل می شود (۷). محصول فرآیند معدنی شدن آمونیوم است که این ماده در شرایط هوایی به نیتريت و نیترات تبدیل می شوند که به این فرآیند نیترات سازی^۱ گفته می شود. نیتريت و نیترات دوباره می توانند توسط گیاهان، جلبک ها و موجودات دیگر مورد استفاده قرار گیرند. واکنش باکتریایی دیگری نیز وجود دارد که نیتريت و نیترات را به نیتروژن گازی تبدیل می کند که این ماده وارد هوا شده و به این فرآیند نیترات زدایی^۲ گفته می شود. نیتروژن می تواند از طریق پدیده های دیگری مانند بارش مجددا از اتمسفر به خاک فرونشست کند (۷) (۱۱).

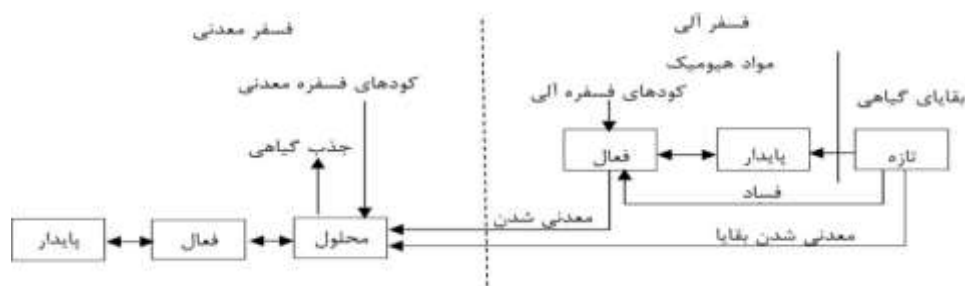
۲-۶- انتقال نیترات

نیترات از سطوح ذرات موجود در خاک، ممکن است بوسیله رواناب سطحی، جریانها یا زهکش های جانبی و یا نفوذ انتقال یابد. در مدل SWAT برای محاسبه مقدار نیتراتی که بوسیله آب جابجا یا منتقل می شود، ابتدا میزان نیترات موجود در آبی که دارای حرکت در یک لایه معین از خاک است محاسبه می شود. سپس این مقدار در حجم آب هر دسته از جریان های منتقل کننده نیترات که در بالا ذکر شد ضرب می گردد. لذا برای محاسبه جرم نیتراتی که از خاک گرفته شده است، از رابطه (۵) استفاده می شود (۷):

$$CONC_{NO3, mobile} = \frac{NO3_{ly} \times \left(\exp \left[\frac{-w_{mobile}}{(1-\theta_e) \cdot SAT_{ly}} \right] \right)}{w_{mobile}} \quad (5)$$

که در آن $CONC_{NO3, mobile}$ غلظت نیترات در آب دارای حرکت در یک لایه معین از خاک بر حسب (Kg N/mm) حرکت در یک لایه معین از خاک بر حسب (Kg H_2O)، $NO3_{ly}$ غلظت نیترات در همان لایه بر حسب (Kg N/ha)، w_{mobile} مقدار آب دارای حرکت در همان لایه از خاک بر حسب (mm H_2O)، θ_e تخلخل قسمتی که فاقد آئینون شده است و SAT_{ly} میزان آب اشباع در همان لایه از خاک بر حسب (mm H_2O)

۲-۷- چرخه فسفر



شکل ۳- فسفر خاک و فرایندهای حاکم بر آن در مدل swat

Figure 3. Soil phosphorus and its governing processes in swat model

می‌شود باعث تبدیل فسفر آلی به فسفر معدنی محلول در خاک می‌شود که تنها فرم قابل جذب و استفاده در گیاهان است.

۲-۸- فسفر در رسوبات رواناب

فسفر آلی و معدنی که بر سطح ذرات خاک قرار دارند ممکن است بوسیله رواناب سطحی جابجا و وارد جریان اصلی رودخانه شوند. در مدل SWAT مقادیر فسفوری که بوسیله رسوبات موجود در رواناب حمل می‌شود از رابطه (۶) محاسبه می‌گردد که در آن $Sed_{P_{surf}}$ مقدار فسفوری که بوسیله رسوبات موجود در رواناب سطحی به زهکش اصلی رودخانه منتقل شده‌اند بر حسب $(Kg P/ha)$ ، $CONC_{sedP}$ غلظت فسفر در رسوبات ۱۰ میلیمتر بالایی خاک بر حسب $(g p/metric ton soil)$ ، sed میزان رسوب در روز مورد نظر بر حسب تن متریک، $area_{hru}$ مساحت hru بر حسب هکتار، ϵ_{sedp} ضریب غنای فسفر است. (۷)

$$SedP_{surf} = 0.001 \times CONC_{sedP} \times \frac{sed}{area_{hru}} \times \epsilon_{p:sed} \quad (6)$$

۲-۹- واسنجی و صحت سنجی مدل SWAT

واسنجی، مقایسه اطلاعات شبیه‌سازی شده و اطلاعات مشاهداتی است که در آن ضرایب موجود در معادلات حاکم بر مدل در محدوده مجاز به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که دو دسته اطلاعات ذکر شده فوق تا حد مطلوبی به یکدیگر نزدیک شوند. برای انجام واسنجی در این تحقیق از ورژن پرمیوم مدل SWAT-CUP استفاده شد (۱، ۱۳، ۱۴). در مدل مذکور با بهره‌گیری از برنامه SPE نسبت به بهینه‌سازی مقادیر اقدام می‌شود. برای انجام این کار در ابتدا آنالیز حساسیت در مورد ضرایب و پارامترهای موثر در معادلات حاکم بر عوامل کمی و کیفی آب انجام و پس از تعیین ضرایب و پارامترهای موثر، عمل واسنجی اتوماتیک انجام می‌شود. این فرآیند با قرار دادن مقادیر مختلف در بازه‌های مجاز هر پارامتر انجام و پس از اجرای متعدد مدل، برای دستیابی به بهترین ضرایب، مقادیر توابع مختلف هدف محاسبه و براساس این مقادیر بهترین

چرخه فسفر در مقایسه با نیتروژن ساده‌تر به نظر می‌رسد زیرا بر خلاف نیتروژن تبادلات جوی ندارد. گردش فسفر در طبیعت از محیط معدنی به محیط گیاهی و جانوری آغاز و با مراجعت این ترکیبات به محیط معدنی ادامه می‌یابد (۱۲). کودهای حیوانی و شیمیایی عمده‌ترین منابع افزایشدهنده فسفر به خاک می‌باشند. مدل SWAT، همان‌طور که در شکل بالا مشخص است، فسفر را به دو شکل آلی و معدنی در خاک در نظر می‌گیرد (۷). یک بخش از فسفر آلی در بقایای گیاهی وجود دارد در حالیکه انواع پایدار و فعال آن به مواد هیومیک خاک مربوط هستند. فسفر معدنی هم در سه شکل پایدار، فعال و محلول در خاک موجود است که فرم محلول آن در توازن سریع با فرم فعال بوده و فرم فعال نیز در توازن آهسته با فرم پایدار است (۷). فرآیند معدنی شدن که توسط واکنش‌های میکروبی انجام

در این تحقیق برای دستیابی به اطلاعات مشاهداتی مورد نیاز، عملیات نمونه‌برداری و سنجش دبی بوسیله دستگاه مولینه در طول هر دو شاخه اصلی رودخانه انجام گردید. نمونه‌های مذکور که در ۱۲ دوره یک ماهه که شروع آن از اسفند ماه ۱۳۹۸ و خاتمه آن در بهمن ماه ۱۳۹۹ بود برداشت گردیده و پس از انتقال به آزمایشگاه مجاز شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی که در شرایط استاندارد انجام شد مورد آنالیز قرار گرفت. اطلاعات مشاهداتی بدست آمده به طریق مذکور در واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد بدین ترتیب که از ۸ دوره در مرحله واسنجی و از ۴ دوره باقیمانده در مرحله صحت‌سنجی استفاده گردید. توضیح آنکه برای واسنجی و صحت‌سنجی دبی رواناب از آمار دبی روزانه ایستگاه‌های هیدرومتری آبد و میان‌مرغ شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی که مربوط به سالهای ۱۳۸۴ تا ۱۳۹۷ می‌باشد استفاده شده است.

توابع هدف در بازه زمانی جدید را، مابین اطلاعات مشاهداتی وارد شده و اطلاعات شبیه‌سازی شده محاسبه و مورد بررسی قرار می‌دهند.

نتایج

با توجه به آنالیز حساسیت انجام شده در مدل SWAT-CUP و تشخیص پارامترهای موثر بر میزان معیارهای کمی و کیفی آب، عملیات واسنجی در طول هر دو شاخه اصلی رودخانه از بالادست به طرف پایین‌دست و در خروجی زیرحوضه‌های موجود در هر دو مسیر انجام شد. نتایج مربوط به آنالیز حساسیت و مقادیر حاصل شده برای پارامترهای مختلف در دوره واسنجی در هر دو شاخه اصلی رودخانه به شرح جدول ۱ می‌باشند:

ضرایب انتخاب می‌گردند. در این تحقیق که فرآیند واسنجی در مورد پارامترهای دی‌رواناب، TSS، MinP، NO₃، CBOD و DO انجام شد از توابع هدف R² و نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. مقدار تابع R² بین صفر تا یک می‌باشد و اگر از ۰/۶ بیشتر باشد نشان‌دهنده آن است که اطلاعات تولید شده بوسیله مدل توانسته‌اند که تغییرات اطلاعات مشاهداتی را تبیین یا پیش‌بینی نمایند. در معیار نش-ساتکلیف مقادیر بین ۰/۳۵ تا ۰/۵ نشان‌دهنده انطباق خوب داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی هستند و مقادیر بیشتر و وضعیت خوب تا عالی را بیان می‌کنند.

در مرحله صحت سنجی با استفاده از ضرایب بدست آمده در مرحله واسنجی و بدون تغییر آنها، دوره دیگری از اطلاعات مشاهداتی را وارد مدل می‌نمایند. سپس با اجرای مدل، مقادیر

جدول ۱- پارامترهای مدل SWAT ناشی از آنالیز حساسیت و مقادیر اصلاح شده آنها در مرحله کالیبراسیون

Table1. Parameters of the SWAT model due to sensitivity analysis and their modified values in the calibration period

مقادیر اصلاح شده	پارامترهای حساس در مدل SWAT	پارامترهای کمی و کیفی آب
۶۲	شماره منحنی در شرایط رطوبتی (CN2)	دبی رواناب
۰/۲۳	ثابت زوال جریان پایه (ALPHA_BF)	
۰/۹	ضریب جبران رطوبت خاک (ESCO)	
۱/۳۲	وزن توده مرطوب لایه خاک (SOL_BD)	
۵۵/۵	درجه تغییر بارش با افزایش ارتفاع (PLAPS)	
۱۷۰	غلظت رسوب در جریان جانبی و در آب زیرزمینی (LAT_SED)	رسوب (TSS)
۰/۰۰۳	ضریب انتقال رسوب (SPCON)	
۱/۱۷	توان در معادله حمل رسوب (SPEXP)	
۰/۱	فاکتور فرسایش کانال (CH_COV)	
۰/۲۳	ضریب جذب فسفر (PSP)	فسفر معدنی (MINP)
۱۳/۱۳	ضریب نفوذ فسفر (PPERCO)	
۴/۳۱	غلظت فسفر محلول در آب زیرزمینی که وارد آب سطحی می شود (GWSOLP)	
۰/۰۷	میزان معدنی شدن فسفر آلی و تبدیل آن به فسفر معدنی محلول (BC4)	
۲۱/۳۷	پارامتر توزیع جذب نیتروژن (N_UPDIS)	نیترات (NO3)
۰/۳۱	آستانه نیترات زدایی آب (SDNCO)	
۳/۶۴	ضریب خلوص نیتروژن آلی (ERORGN)	
۰/۲۹	ضریب نفوذ نیتروژن (NPERCO)	
۳/۲۴	نرخ فروپاشی یا تجزیه BOD (BIO_BD)	اکسیژن خواهی بیوشیمیایی (BOD)
۰/۶۴	ضریب میزان مرگ و میر (COEFF_MRT)	
۰/۶۲	ضریب نرخ تنفس (COEFF_RSP)	
۰/۳	نرخ تبدیل BOD به توده بیولوژیکی (COEFF_BOD_CONV)	
۴۰	تنظیم دما (TMPINC)	اکسیژن محلول (DO)

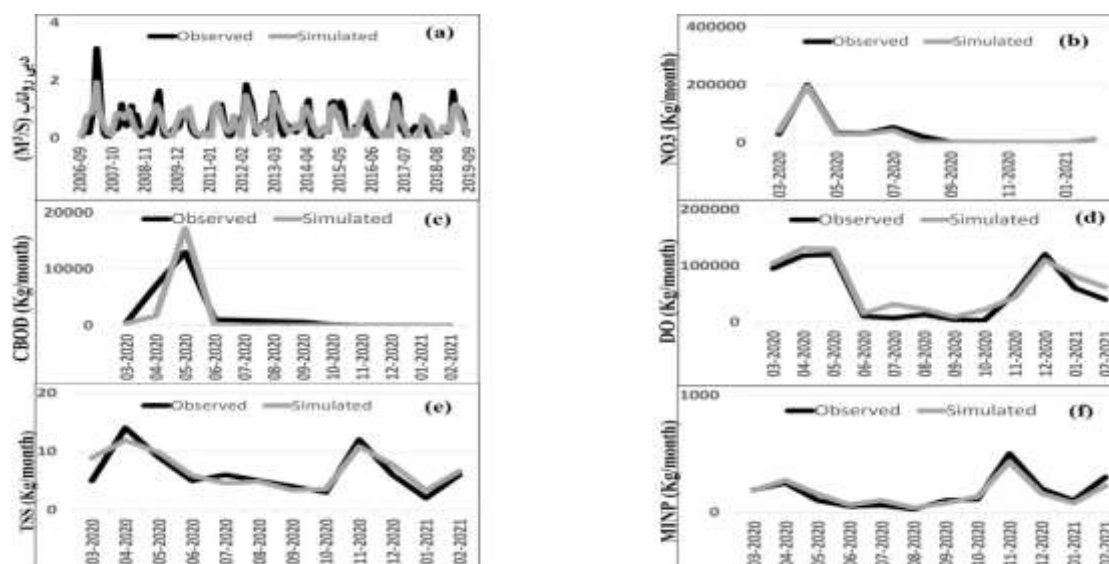
مربوط به خروجی شاخه‌های میان مرغ و آبقد می‌باشند ارایه شده است.

در ادامه نتایج و نمودارهای واسنجی و صحت‌سنجی پارامترهای دبی رواناب، رسوب، NO3، MINP، CBOD و DO که

جدول ۲- مقادیر توابع هدف R^2 و (NSE) مربوط به دوره واسنجی و صحت سنجی در هر دو شاخه اصلی رودخانه

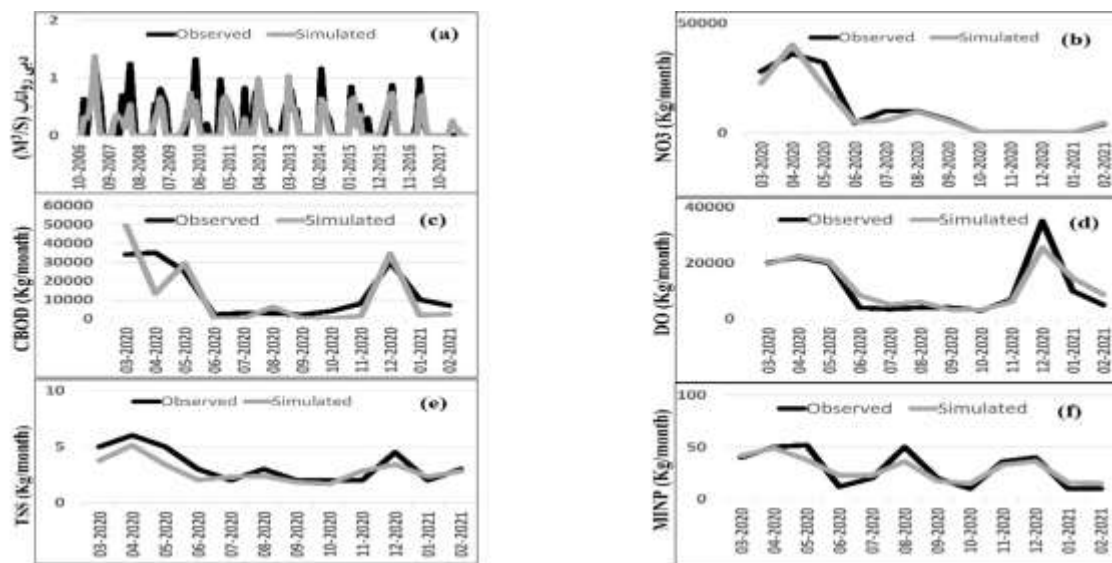
Table 2. The values of the objective functions R^2 and (NSE) related to the calibration and validation period in both main branches of the river

شاخه آبقد				شاخه میان مرغ				پارامترهای کمی و کیفی آب
صحت سنجی		واسنجی		صحت سنجی		واسنجی		
NS	R^2	NS	R^2	NS	R^2	NS	R^2	
۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۴	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۶	۰/۶	۰/۶۲	TSS
۰/۸	۰/۹	۰/۷۶	۰/۸۱	۰/۸۶	۰/۹	۰/۸۴	۰/۹	MINP
۰/۹	۱	۰/۸	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۰/۹	NO3
۰/۵۷	۰/۹۸	۰/۵۱	۰/۶۶	۰/۵۸	۱	۰/۶۷	۱	CBOD
۰/۷۸	۰/۹۴	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۹۵	۰/۹۳	DO



شکل ۴- اطلاعات شبیه سازی شده و مشاهداتی پارامترهای کمی و کیفی آب مربوط به دوران واسنجی و صحت سنجی در شاخه میان مرغ

Figure 4. Simulated and observational information of water parameters in the Mianmargh branch during calibration and verification



شکل ۵- اطلاعات شبیه سازی شده و مشاهداتی پارامترهای کمی و کیفی آب مربوط به دوران واسنجی و صحت سنجی در شاخه آبقد

Figure 5. Simulated and observational information of water parameters in the Abghad branch during calibration and verification

و بهار میزان نیترات بیشتر از ماه های دیگر است. دلیل این مساله به خاطر افزایش بارندگی و رواناب در این فصول می باشد که باعث هجوم نیترات از خاک به رودخانه از طریق قسمت های مختلف حوضه آبریز می شود. در این دوره، گیاهان کارایی کمتری در جذب نیترات از خود نشان می دهند که سبب افزایش ورود نیترات به آب می گردد. این نتیجه در تحقیقات فلاح رستگار و همکاران (۱۵) و محمدی و همکاران (۴) تایید می گردد. بررسی جدول (۱) نشان دهنده پارامترهایی است که در مرحله واسنجی CBOD حساسیت بیشتری را از خود نشان داده اند. پارامترهای مذکور که میزان مواد آلی را از طریق واکنش های میکروبی و نرخ تجزیه مواد آلی تنظیم می کنند با نتایج حاصل از مطالعات فاکسومبون و همکاران (۱۶) مطابقت دارد. همچنین شکل های 4c، 5c و 4d در هر دو شاخه رودخانه نشان می دهند که میزان CBOD در فصول کم آبی عموماً در سطح بسیار پایینی است که این مساله باعث بهبود کیفیت آب می گردد اما در فصل های بهار و زمستان که آب رودخانه در بیشتر مواقع سیلابی است و انتقال مواد آلی و دیگر آلاینده ها از مناطق بالادست اتفاق می افتد، مدل به درستی مقادیر بیشتری را نشان می دهد. نمودارهای رسوبات معلق و

بررسی جدول (۱) نشان می دهد که در بین پارامترهای حساس برای شبیه سازی دبی رواناب، مولفه ی شماره منحنی در شرایط رطوبتی (CN2) در حوضه مطالعه شده از حساسیت زیادی برخوردار بوده است که با نتایج مطالعات کاویان و همکاران (۶)، آبابایی و همکاران (۵) و محمدی و همکاران (۴) مطابقت داشته است. همچنین بوسکیدیس و همکاران (۲) مقادیر پایین CN2 را علاوه بر جنس خاک منطقه ناشی از پوشش کم گیاهی دانسته اند. در محدوده مطالعاتی ارداک به غیر از نوار باریک حاشیه رودخانه، در سایر نقاط پوشش گیاهی چندانی مشاهده نمی شود و جنس خاک بیشتر از نوع سنگ های آهکی و شیل است. بنابراین، محاسبه مقادیر پایین CN2 در مرحله واسنجی با نتایج مطالعات بوسکیدیس و همکاران (۲) هم خوانی دارد. با بررسی شکل های 4a و 5a در هر دو شاخه از رودخانه و مراجعه به جدول ۲ مشخص می شود که مدل در شبیه سازی جریان های کم و زیاد به خوبی عمل نموده و به جز چند مورد که در رابطه با جریان های زیاد است در بقیه موارد عملکرد نسبتاً خوبی در ارتباط با شبیه سازی جریان داشته است. بررسی شکل های 4b و 5b در هر دو شاخه از رودخانه نشان می دهد که در زمستان

گردیده و باعث صرفه‌جویی در زمان، انرژی و هزینه‌های آبی شود. همچنین ورود آب رودخانه ارداک به شبکه آب شرب شهری و محدودیت و حساسیت سیستم‌های تصفیه آب ضرورت انجام این امر را هر چه بیشتر می‌نماید.

استفاده از مدل ساخته شده در این تحقیق برای تعریف و اجرای سناریوهایی مانند: تغییر کاربری اراضی، روش‌های آبخیزداری، تغییر شیوه‌های کشاورزی و مدیریت آلاینده‌ها و بررسی تغییرات اقلیمی در شرایط آینده دور و نزدیک. با توجه به اینکه مدل مذکور رفتاری مشابه و نزدیک به رفتار طبیعی رودخانه داشته است، امکان بررسی شرایط و گزینه‌های مختلف عملیاتی و فنی را فراهم نموده و باعث یافتن بهترین، موثرترین و اقتصادی‌ترین راه‌کارها و شیوه‌های حفاظت از آب سطحی می‌گردد.

References

1. Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, Siber R, Bogner K, Mieleitner J, et al. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 2007;333(2):413-30
2. Boskidis I, Gikas GD, Pisinaras V, Tsihrintzis VA. Spatial and temporal changes of water quality, and SWAT modeling of Vosvozis river basin, North Greece. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*. 2010;45(11):1421-40
3. Dutta P, Sarma AK. Hydrological modeling as a tool for water resources management of the data-scarce Brahmaputra basin. *Journal of Water and Climate Change*. 2020;12(1):152-65
4. Mohammadi M, Kaviani A, Gholami L. Simulation of Discharge and Nitrate in Tallar Basin using SWAT Model. *Journal of Watershed Management Research*. 2017;8(15). (In Persian)
5. Ababei B, Sohrabi T. Assessing the performance of SWAT model in

فسفر در شکل‌های 4f، 5e، 4e و 5f نشان می‌دهند که در ماه‌هایی که میزان رسوبات معلق بیشتر است، میزان فسفر معدنی نیز بیشتر می‌باشد که این رفتار تقریباً در هر دو شاخه از رودخانه مشاهده می‌شود. همچنین در مورد این دو پارامتر مشاهده می‌شود که میزان آنها در اواخر پاییز تا اوایل بهار بیشتر از دیگر زمان‌ها است. علت این امر بدین خاطر است که در حوضه‌های آبریز کوچک تا متوسط پدیده‌های بیولوژیکی جریان رودخانه مانند مرگ جلبک‌ها که در میزان مواد مغذی آب موثر هستند بسیار کمتر از عمل فرسایش است که در مناطق بالادست و یا در بستر رودخانه اتفاق می‌افتد که با نتایج پژوهش بر کمورت و همکاران (۱۷) مشابهت دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج جدول ۲ و نمودارهای موجود در شکل‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهند که مدل ساخته شده انطباق خوبی با شرایط واقعی و مشاهداتی رودخانه دارد. در منطقه مطالعاتی فوق فعالیت‌های زیاد کشاورزی و باغداری و استفاده بی‌رویه از سموم و کودهای کشاورزی سبب افزایش مقادیر مواد آلی، فسفر و نترات در طول رودخانه گردیده که این امر در مناطق پایین‌دست رودخانه مشهودتر است. استفاده غیر اصولی از مراتع باعث ایجاد سیلاب و انتقال بسیاری از آلاینده‌ها خصوصاً از سمت مناطق بالادست می‌گردد. دفع مستقیم و بدون محدودیت زباله‌ها و فاضلاب‌های خام روستایی که از طریق نهرهای کوچک منتهی به رودخانه به وفور مشاهده می‌شود از دیگر علل آلودگی آب سطحی در این منطقه است. همچنین نمودارهای شکل‌های ۴ و ۵ که تغییرات کیفیت آب در طول زمان را نشان می‌دهند حاکی از وجود ارتباط مشخص و همبستگی تغییرات کیفی و شاخص‌های اقلیمی مانند دما و بارش می‌باشند. لذا با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان پیشنهادات زیر را برای انجام مطالعات آبی در این حوضه آبریز انجام داد:

طراحی چهارچوب و برنامه‌ای مشخص برای پایش کمی و کیفی آب سطحی جهت دستیابی به اطلاعات ضروری در حجم کافی و دقت مناسب. این فرآیند می‌تواند باعث سهولت در انجام واسنجی و صحت‌سنجی انواع مدل‌های کاربردی در زمینه آب

- sources and retention of phosphorus nutrient in a coastal river system in China using SWAT. *Journal of Environmental Management*. 2021; 278:111556
13. Abbaspour KC. Swat-cup 2012. SWAT calibration and uncertainty program—A user manual. 2013
 14. Abbaspour KC, Rouholahnejad E, Vaghef S, Srinivasan R, Yang H, Kløve B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*. 2015;524:733-52
 15. Falah Rastegar N, Niksokhan MH. Quantitative Estimation and Qualitative Prediction of Nitrate Parameter of Runoff under Climate Change Situation. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2018; 12(1): 53-62. (In Persian)
 16. Faksomboon B, Bualert S, Dampin N, Thangtham N. Dynamic Modeling of Water Storage Capacity for the Dilution of Waste Water of Land Utilization in the Upper Tha Chin Watershed, Thailand. *EnvironmentAsia*. 2017;10(2)
 17. Bracmort KS, Arabi M, Frankenberger J, Engel BA, Arnold JG. Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Transactions of the ASABE*. 2006; 49(2):367-74
 - Zayandeh Rud watershed. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2009; 16(3). (In Persian)
 6. Kavian A, Golshan M, Rouhani H, Esmali Ouri A. Simulation of Runoff and Sediment Yield in Haraz River Basin in Mazandaran Using SWAT Model. *Physical Geography Research Quarterly*. 2015; 47(2):197-211. (In Persian)
 7. Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute; 2011.
 8. Krysanova V, Arnold JG. Advances in ecohydrological modelling with SWAT—a review. *Hydrological Sciences Journal*. 2008;53(5):939-47
 9. Sanders TG, Ward RC, Loftis JC, Steele TD, Adrian DD, Yevjevich VM. Design of networks for monitoring water quality: Water Resources Publication; 1983.
 10. Singh L, Saravanan S. Simulation of monthly streamflow using the SWAT model of the Ib River watershed, India. *HydroResearch*. 2020;3:95-105
 11. Chen H, Chen J, Liu Y, He J. Study of Nitrogen Pollution Simulation and Management Measures on SWAT Model in Typhoon Period of Shanxi Reservoir Watershed, Zhejiang Province, China. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2021; 30(3): 2499-507
 12. Cheng J, Gong Y, Zhu DZ, Xiao M, Zhang Z, Bi J, et al. Modeling the