



مدل سازی عددی پخش و انتقال فسفر در بدنه های آبی (مطالعه موردی: رودخانه سفیدرود)

شروین فقیهی‌راد^{۱*}، مهسا خدایاری^۲، فواد کیلانه ئی^۲

۱- پژوهشکده مهندسی هیدرولیک و محیط های آبی، موسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران
۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۸
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۶/۰۳
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۰/۰۶

کلمات کلیدی:

فسفر
رودخانه سفیدرود
HEC-RAS
شبیه‌سازی عددی
تغذیه‌گرایی

خلاصه: فسفر یک ماده مغذی حیاتی برای رشد گیاهان و جلبک‌ها است. انحلال‌پذیری کم ترکیبات فسفر در آب نسبت به سایر مواد مغذی باعث شده است که فسفر به عنوان ماده محدود کننده رشد جلبک در بیشتر منابع آبی شناخته شود. بنابراین حضور بی‌رویه فسفر در آب می‌تواند باعث افزایش بیش از حد جمعیت جلبک‌ها به مقداری بیش از حد مصرف آبیان، وقوع پدیده تغذیه‌گرایی، کاهش کیفیت آب و ایجاد شرایط نامطلوب برای زیست آبیان گردد. از این رو شناسایی منابع اصلی ورود فسفر به داخل رودخانه‌ها و مکانیسم انتقال و نشر آن‌ها و بررسی شرایط کیفی رودخانه پس از نشر ترکیبات فسفر در آب حائز اهمیت است. در این پژوهش پس از شناخت منابع اصلی ورود فسفر به رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود، نحوه انتقال و پخش فسفر داخل این رودخانه‌ها با کمک داده‌های میدانی و نرم‌افزار HEC-RAS شبیه‌سازی و پیامدهای آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه جهت بررسی تاثیر برنامه‌های توسعه آبی استان‌های حوضه آبریز سفیدرود و تغییرات شرایط آب و هوایی بر غلظت فسفر رودخانه سفیدرود (و تجمع آن در مخزن سد سفیدرود)، پنج سناریو مبتنی بر این برنامه‌ها در سال‌های آتی طراحی گردید. متعاقب آن موضوع انتقال و پخش فسفر در رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود بر اساس سناریوهای مزبور به کمک نرم‌افزار مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد کنترل فسفر ورودی ناشی از فعالیت‌های انسانی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود، موثرترین راه جهت کنترل فسفر رودخانه سفیدرود است و توده زنده جلبک در این رودخانه‌ها تنها بر اثر افزایش دمای هوا و افزایش دبی افزایش و با کاهش دبی کاهش یافته است.

۱- مقدمه

سال یک بار رخ می‌دهد اما عارضه مصنوعی این فرآیند، که انسان‌ها در آن دخیل هستند، تنها بعد از چند دهه قابل رویت است. نیتروژن، فسفر، سلیس و کربن‌دی‌اکسید، مواد مغذی‌ای هستند که عامل اصلی تغذیه‌گرایی رودخانه‌ها شناخته شده‌اند [۳]. فسفر یک ماده مغذی کلیدی در رشد گیاهان آبی، جلبک‌ها و بسیاری از میکرو ارگانیسم‌ها است و به عنوان یک عنصر حیاتی برای تبدیل نور خورشید به انرژی قابل استفاده برای گیاه شناخته می‌شود [۳]. شکل ۱ نمایی از چرخه مصرف ترکیبات فسفر توسط جلبک‌ها در رودخانه‌ها را نشان می‌دهد.

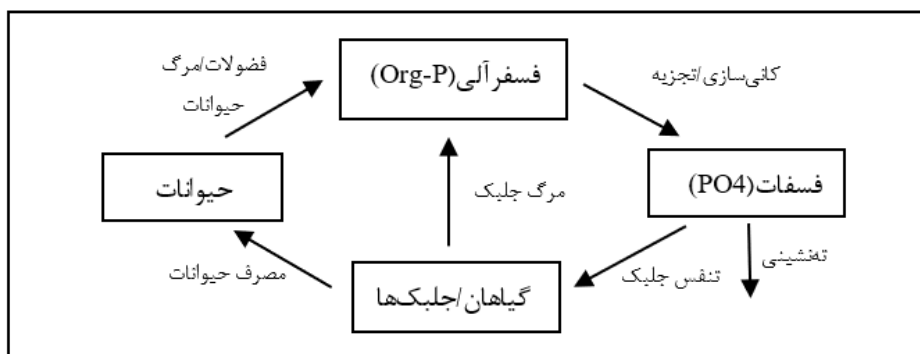
ترکیبات فسفر از انحلال‌پذیری کمی در آب برخوردار هستند و بیشتر تمایل به اتصال به ذرات رسوب و جامدات معلق در آب را دارند و این انحلال‌پذیری اندک فسفر نسبت به نیتروژن موجب شده است که ترکیبات فسفر به عنوان ماده دور از دسترس برای گیاهان آبی و جلبک‌ها و عامل محدود کننده رشد آن‌ها در بیشتر آب‌های شیرین شناخته شوند. جلبک‌های موجود در آب شامل سیانوباکترها (جلبک‌های سبز-آبی)، دیاتومه‌ها،

رودخانه‌ها یکی از منابع اصلی تامین آب آشامیدنی، کشاورزی و صنعتی هستند که در قرن حاضر به دلیل عواملی همچون رشد بیش از حد جمعیت انسانی، دخل و تصرف انسان‌ها در طبیعت، افزایش تقاضا برای مواد غذایی، گسترش صنایع و تولیدات کشاورزی دچار تغییراتی به لحاظ کیفیت آب شده‌اند [۱]، به گونه‌ای که در حال حاضر آلودگی آب به یکی از مهم‌ترین مشکلات محیط‌زیستی در سرتا سر دنیا تبدیل شده است. ورود بی‌رویه مواد آلاینده به داخل رودخانه‌ها، تاثیرات سوئی بر اکوسیستم آبی و کیفیت آب رودخانه‌ها گذاشته است. یکی از این تاثیرات که امروزه از گسترده‌ترین مسائل کیفیت آب به شمار می‌رود، یوتروفیکاسیون^۱ و یا تغذیه‌گرایی زیستی رودخانه‌ها است [۲]. یوتروفیکاسیون فرآیندی است که در اثر وجود مواد مغذی بیش از حد در رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد. این فرآیند به صورت طبیعی هر ۱۰۰۰

1 Eutrophication

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: sh.faghihi@wri.ac.ir





شکل ۱. چرخه فسفر در آب [۳]

Fig. 1. Phosphorus Cycle in Water

مالاتیون^۱، فنتیون^۲ و دیازینیون^۳ را نام برد. مالاتیون یکی از حشره‌کش‌های پر مصرف در ایران است، که از طریق مهار آنزیم استیل کولین استراز^۴ موجب اختلال در سیستم عصبی انسان می‌شود [۴]. با توجه به موارد ذکر شده و مشکلات کیفی به وجود آمده برای منابع آب سطحی علی‌الخصوص رودخانه‌ها، ناشی از حضور ترکیبات فسفر در آب، مطالعات بسیاری در زمینه شناخت منابع اصلی حضور فسفر بر روی کره زمین و داخل منابع آبی، شکل‌های مختلف حضور فسفر در طبیعت و ترکیبات آن و مکانیزم انتقال فسفر در آب‌های سطحی در قالب پژوهش‌های میدانی، تحلیل و بررسی تئوریک و مدل‌سازی عددی صورت گرفته است. طبق پژوهش صورت گرفته توسط فیلیپی در سال ۲۰۰۲، منبع اولیه حضور فسفر در طبیعت، (که غالباً شکل معدنی آن را شامل می‌شود) هوازدگی کانی‌های آپاتیت‌دار^۵ در طول فرآیند توسعه خاک بیان شده است. با ثبات فرآیند توسعه خاک، افزایش جمعیت انسانی و در پی آن، گسترش فعالیت‌های کشاورزی، آبرزی پروری، دامداری، صنایع مبل‌سازی، نساجی، تولید فاضلاب و زباله انسانی، فاضلاب‌های صنعت مواد شوینده، انتشار فسفر علی‌الخصوص فسفر آلی افزایش یافت [۱]. جی جان در کتاب خود که در سال ۲۰۰۷ بیان می‌کند که؛ ترکیبات فسفر به دو شکل ذره‌ای و محلول در آب وجود دارند که ارگانوفسفر ذره‌ای (OrgP) و فسفات محلول اصلی‌ترین شکل‌های فسفر در آب هستند.

جلبک‌های سبز و پلانکتون‌ها هستند که پلانکتون‌ها خود به دو شکل فیتوپلانکتون و زئوپلانکتون در رودخانه‌ها دیده می‌شوند. فیتوپلانکتون‌ها که غالباً بیش‌ترین جمعیت جلبک‌ها در آب شیرین را تشکیل می‌دهند به عنوان اولین تصفیه‌کننده‌های رودخانه‌ها شناخته می‌شوند. این دسته از جلبک‌ها، مواد مغذی موجود در آب را دریافت نموده و خود به عنوان غذای جانوران کوچک آبی مورد استفاده قرار می‌گیرند اما افزایش بی‌رویه غلظت ترکیبات فسفر در آب‌هایی که این ماده نقش محدود کننده در رشد جلبک‌ها را ایفا می‌کند، افزایش بی‌رویه جمعیت فیتوپلانکتون‌ها و سایر جلبک‌ها به مقداری بیش از حد مصرف جانداران آبی و وقوع پدیده تغذیه‌گرایی زیستی رودخانه را در پی خواهد داشت [۳] و از آن پس می‌توان از فسفر به عنوان یک آلاینده آب رودخانه یاد کرد. دلیل آن هم این است که؛ حضور جلبک و گیاهان آبرزی بیش از حد در داخل بدنه‌های آبی سبب وقوع مشکلات عدیده‌ای از جمله؛ کمبود اکسیژن محلول (DO) علی‌الخصوص در لایه‌های زیرین آب، افزایش جامدات معلق، افزایش غلظت مواد مغذی، کاهش شفافیت آب، نفوذ اندک نور خورشید، بوی نامطبوع ناشی از تنفس جلبک و تغییر در گونه‌های زیستی ساکن در آب می‌شود [۳]. شکل دیگر ترکیبات فسفر، ترکیبات فسفر موجود در کودهای شیمیایی و سموم آفت‌کش فسفره مورد استفاده در باغ‌ها و مزارع کشاورزی است که موجب به خطر افتادن سلامت آبریان ساکن رودخانه می‌شود. این ترکیبات توسط رواناب‌های عبوری از مزارع وارد رودخانه‌ها می‌شوند. عناصر تشکیل دهنده آفت‌کش‌های فسفره عبارتند از: کربن، هیدروژن، اکسیژن، فسفر. از حشره‌کش‌های فسفره می‌توان

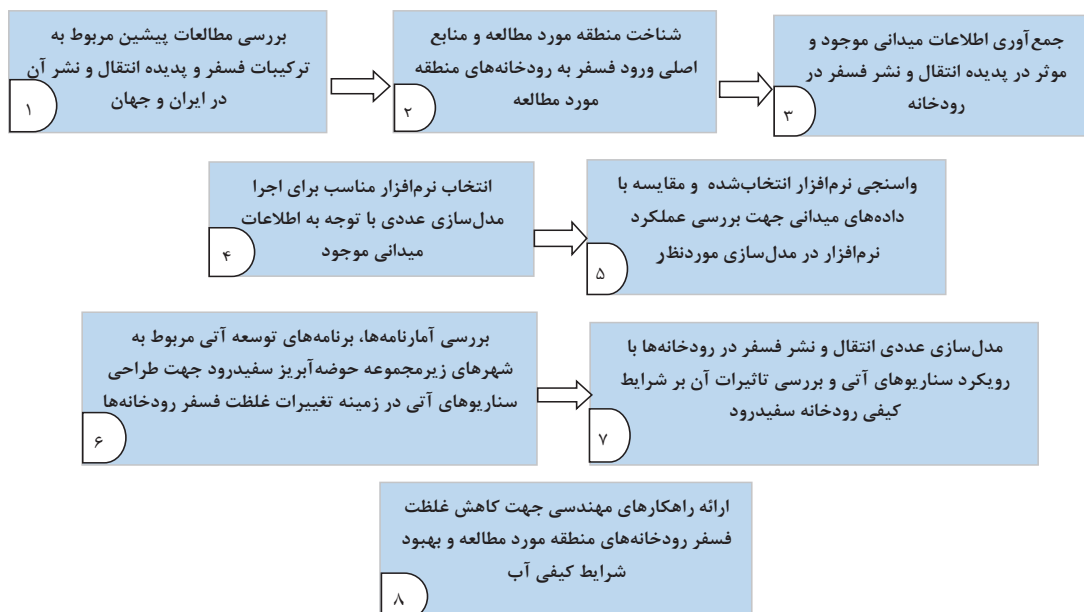
- 1 Malathion
- 2 Fenthion
- 3 Diazinon
- 4 Acetylcholinesterase
- 5 Apatite mineral group

آماري و اندازه‌گيري شده کيفي آب از ۴ ايستگاه در طول رودخانه چالوس و استانداردهاي موجود، کيفيت آب اين رودخانه را از ديدگاه غلظت ترکيبات فسفر و نيتروژن بررسي نموده‌اند و با به کارگيري اطلاعات آماري موجود و نرم‌افزار بررسي کيفيت آب QUAL2K، مدل خودپالايي رودخانه را در دو فصل کم‌آب و پرآب ايجاد کرده‌اند [۸]. بدرزاده و همکارانش در سال ۱۳۹۵، به بررسي تاثير زهاب کشاورزي بر پارامترهاي کيفي رودخانه ارس با استفاده از مدل عددي MIKE11، پرداختند. هدف اين پژوهش، بررسي تاثير زهاب‌هاي کشاورزي داراي کودهاي نيتراته و فسفات متداول و مورد استفاده در اراضي زراعي منطقه، بر کيفيت آب رودخانه بود [۹]. ميرمشتاقی و همکاران در سال ۱۳۹۰، مرودوست و همکاران در سال ۱۳۹۴، هر يك با نمونه‌برداري ميداني از آب رودخانه سفيدرود در فواصل طولی مشخص و بررسي‌هاي آزمایشگاهی به مقايسه پارامترهاي کيفيت آب رودخانه سفيدرود با استانداردهاي جهاني پرداخته‌اند. در سال ۱۳۹۶، هادي بخشي با به کارگيري نرم‌افزار HEC-RAS مکانيزم انتقال و پخش نيتروژن در رودخانه‌هاي قزل‌اوزن و شاهرود (بالادست سد سفيدرود) بررسي نموده است و با اجرائی سناريوهایی فرضی در محیط نرم‌افزار HEC-RAS، شرايط کيفي ايجاد شده برای رودخانه سفيدرود ناشی از افزايش غلظت ۱/۵ و ۲ برابری ترکيبات نيتروژن در رودخانه‌هاي بالادست (قزل‌اوزن و شاهرود) را بررسي کرده است [۱۰].

پژوهش حاضر با در نظر داشتن واقعيت‌ها و شناخت عوامل مهم و تاثيرگذار در ورود و نشر فسفر در رودخانه سفيدرود و سرشاخه‌هاي آن (قزل‌اوزن و شاهرود) و با به کارگيري ابزار عددي، سعی در شبیه‌سازی فرآیند ورود آلاینده فسفر به رودخانه از منابع اصلی این آلاینده و بررسي پخش آن در رودخانه‌هاي مذکور را دارد. از اهداف مهم اين پژوهش می‌توان شناخت منابع مهم آلاینده فسفر در محدوده مطالعه، عوامل مهم تاثيرگذار بر آلاینده فسفر و بررسي اثرات متقابل آن بر محیط، شبیه‌سازی پخش فسفر در رودخانه سفيدرود و بررسي تاثير توسعه آبی بر موضوع فسفر ورودی به رودخانه در محدوده مورد مطالعه را نام برد. اين مطالعات در نهايت نشان داد که کنترل پساب‌هاي خانگی، کشاورزي و دامداری علی‌الخصوص دامداری سنتی و توجه به شرايط محیط زیستی در طرح‌هاي توسعه‌ای، می‌تواند غلظت ترکيبات فسفر را در داخل رودخانه‌هاي حوضه آبريز سفيدرود بزرگ در سطح مطلوبی کاهش دهد.

فسفات محلول اولين شکل از ترکيبات فسفر است که به صورت مستقيم مورد استفاده جلبک‌ها قرار می‌گیرد. او همچنین در کتاب خود اشاره نمود که فسفات‌ها خود به سه دسته اورتوفسفات، متافسفات و ارگانوفسفات تقسيم می‌شوند که اورتوفسفات‌ها (PO4) شکل عمده فسفات‌ها هستند [۳]. در سال ۲۰۰۴، واداس و همکارانش، به بررسي رابطه بين خاک فسفردار و فسفر محلول در رواناب جهت تخمین ضريب استخراج فسفر از هر نوع خاک به داخل رواناب و انعکاس آن به مدل‌هاي رياضي پرداختند و در اين مسیر ۳۱ نوع خاک را تحت شرايط آزمایشگاهی مورد بررسي قرار دادند، نتايج اين پژوهش نشان داد ميزان جذب فسفر از خاک اشباع شده از فسفر توسط رواناب در انواع مختلف خاک (به جز خاک آهکی) یکسان بوده و می‌توان از ضريب استخراجی ثابت در مدل‌هاي کيفيت آب برای تخمین تقریبی فسفر محلول رها شده از خاک به داخل رواناب استفاده نمود [۵]. در سال ۲۰۰۷، جيمز و همکارانش جهت برآورد بار مواد مغذی و ايجاد یک سيستم پشيبیانی تصميم‌گيري برای ارزیابی ريسک جاری شدن رواناب دارای مواد مغذی، شناسایی منابع مواد مغذی بحرانی (CSA^۱) و مناطق حساس هیدرولوژی (HSA^۲) و دارای پتانسیل تشکیل رواناب، از دو نرم‌افزار SWAT^۳ و GSSHA^۴ به طور همزمان استفاده نمودند. هدف مدل‌سازی صورت گرفته توسط اين محققان، انجام شبیه‌سازی مبتنی بر شبکه توزیع^۵ و ارزیابی کمی سهم فسفر موجود در رواناب به صورت سلول به سلول در حوضه‌هاي آبريز بوده است [۶]. در سال ۲۰۱۸، ژانگ و همکارانش مدل کيفيت آب رودخانه مينه‌سوتا را با کمک داده‌هاي ميداني موجود ساختند، هدف از اين مدل‌سازی و انسجی نرم‌افزار HEC-RAS بوده است و در نهايت مقايسه نتايج شبیه‌سازی با داده‌هاي ميداني دقت مناسب اين نرم‌افزار در شبیه‌سازی کيفيت آب را نشان داد [۲]. در ايران نیز محققان بسیاری در زمینه انتقال و نشر مواد مغذی، ترکيبات فسفر در رودخانه‌ها و انباشت آن‌ها در مخازن سدها به روش‌هاي ميداني، تئوريک و به کارگيري نرم‌افزارهاي تحليل کيفيت آب پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش عیسی‌زاده و همکارانش در سال ۱۳۸۳ بر روی مخزن سد لتیان اشاره نمود که به بررسي غلظت فسفر مخزن سد به کمک مدل تئوری اسندگرس-املیاء^۶ پرداختند [۷]. ميرباقری و همکاران در سال ۱۳۸۷ با مقايسه داده‌هاي

- 1 Critical Source Areas
- 2 Hydrological runoff and Source Area
- 3 Soil & Water Assessment Tool
- 4 Gridded Surface/Subsurface Hydrologic Analysis
- 5 Grid-Base
- 6 Snodgroos -O'Mellia



شکل ۲. مراحل انجام پروژه شبیه‌سازی عددی انتقال-پخش فسفر

Fig. 2. Steps to Implement Phosphorus Advection Diffusion Numerical Simulation Project



شکل ۳. نقشه موقعیت رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود و سفیدرود

Fig. 3. Location Map of Qezel Ozan, Shahroud and Sefidroud Rivers

۲- تبیین گامهای پژوهش

یک نیروی پشتیبان برای مدیریت کیفیت آب و ابزاری قوی برای تصمیم‌گیری و تصمیم‌سازی، مورد استفاده قرار گیرد. در این پژوهش مراحل صورت گرفته جهت ایجاد بستری مناسب برای انجام شبیه‌سازی عددی انتقال و پخش فسفر در رودخانه‌های سفیدرود، قزل‌اوزن و شاهرود در شکل ۲ آورده شده است.

۲-۱- مشخصات محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه مربوط به رودخانه سفیدرود و سرشاخه‌های آن در محدوده بالادست سد سفیدرود، قابل مشاهده در شکل ۳ است. سفیدرود

مدیریت کیفی منابع آب سطحی برای جلوگیری از به خطر افتادن سلامت انسانها، اکوسیستم و رشد و توسعه اقتصادی-اجتماعی ضروری است. مدیریت جامع، مبتنی بر علوم فیزیکی، زیستی، ریاضی و اجتماعی است. سه ابزار مهم در حمایت از مدیریت کیفیت آب عبارتند از: مشاهده، تحلیل و بررسی تئوریک، مدل‌سازی عددی. دو دلیل اصلی برای به کار بردن مدل‌سازی در مطالعات مختلف عبارت است از: درک بهتر فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و به نمایش در آوردن تصویری واقع‌بینانه از پیامدهای ایجاد شده، به شکلی که مدل‌سازی صورت گرفته، بتواند به عنوان

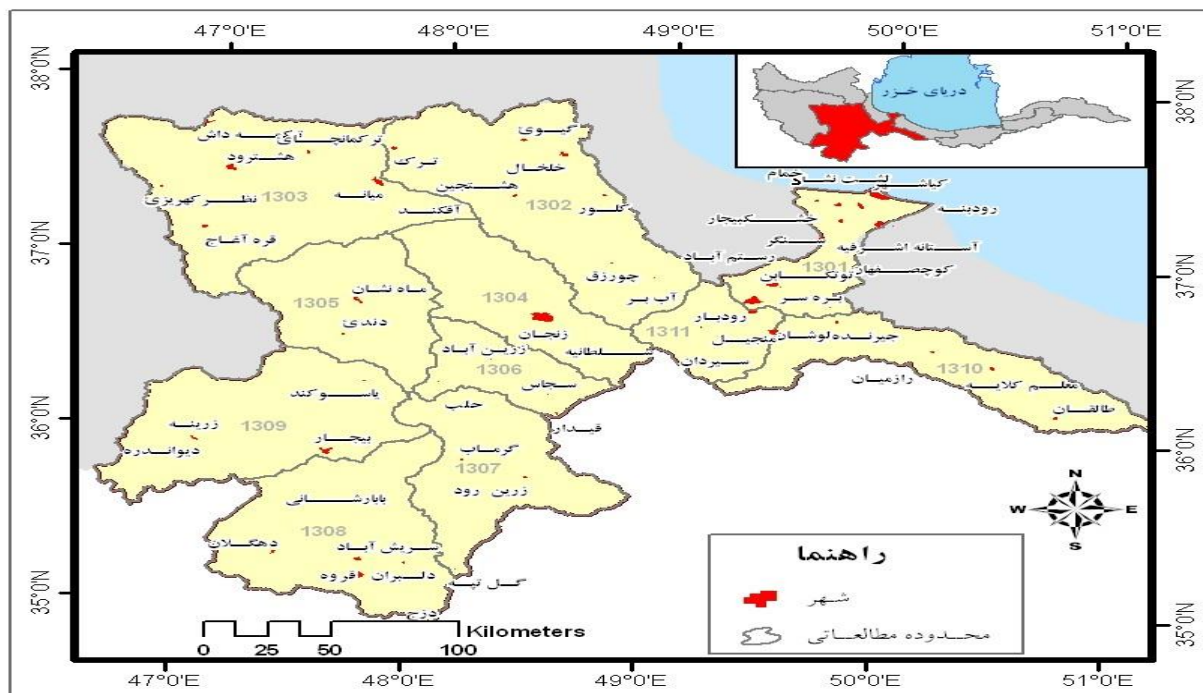


Fig. 4. The 11 Study Areas of the Great Sefidrood Catchment

شکل ۴. نمایی از ۱۱ محدوده مطالعاتی حوضه آبریز سفیدرود بزرگ [۱۱]

انواع کاربری اراضی (کشت دیم، آبی، مرتع و...)، مراکز جمعیتی شهری و روستایی، فعالیت‌های دام پروری و شیرابه زباله‌های دفع شده و کشتارگاه‌ها هستند که از این میان، اراضی با پوشش مرتع با ۳۷٪ سهم بار آلودگی فسفر و پس از آن فعالیت‌های دام پروری با ۲۲٪، فعالیت‌های کشاورزی به خصوص کشت دیم و مراکز جمعیتی شهری و روستایی با ۱۴٪ سهم، بیش‌ترین سهم از ورود فسفر به شاخه‌های قزل اوزن-شاهرود-سفید رود داشتند [۱۱]. مطالعات صورت گرفته، نشان می‌دهد که در محدوده این حوضه آبریز متوسط بارندگی سالانه بین ۲۵۰ تا ۱۶۵۰ میلی‌متر متغیر است. همچنین در این ناحیه متوسط سالانه دما بین کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد تا بیش از ۱۸ درجه سانتی‌گراد است. زیر حوضه سفیدرود بزرگ، با توجه به گستره وسیع خود دارای تنوع قابل توجهی از خرد اکوسیستم‌ها و میکروکلیم‌های مختلف است و قرارگیری این حوضه در محل اتصال اکولوژی‌های مختلف، باعث ایجاد یک ناحیه ویژه زیستی برای برخی از گونه‌ها شده است [۱۱]. تخریب و محدودیت زیستگاه‌ها با از بین رفتن شرایط پایه زیستگاهی عملی می‌گردد. شرایطی که منجر به کاهش توان اکولوژیک و کاهش توان منطقه در نگهداری و حفاظت از زیستگاه‌های گونه‌های خاص شود، نگران کننده است، بنابراین تأثیرات صورت گرفته، بر روی مناطق حفاظت شده در ارزیابی

اصلی‌ترین رودخانه حوضه آبریز سفیدرود بزرگ به شمار می‌رود که از دو شاخه اصلی قزل‌اوزن و شاهرود تشکیل شده است. حوضه آبریز سفیدرود بزرگ در تقسیم‌بندی کلی هیدرولوژی ایران، بخشی از حوضه آبریز دریای خزر محسوب می‌شود و در محدوده تلاقی رشته کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی قرار دارد. مساحت این حوضه برابر با ۵۹۱۹۶ کیلومتر مربع بوده که ۴/۷۵٪ آن را مناطق کوهستانی و ۲۴/۶٪ آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل داده است. بخش‌هایی از ۱۱ استان کشور در محدوده حوضه آبریز سفیدرود بزرگ قرار می‌گیرد. استان زنجان با ۳۱٪، کردستان با ۲۳٪، آذربایجان شرقی با ۱۹٪ بیش‌ترین سهم از مساحت حوضه و استان‌های مازندران با ۰/۳٪، کرمانشاه با ۰/۰۰۲٪، کمترین سهم از مساحت این حوضه را شامل می‌شوند. حوضه آبریز سفیدرود بزرگ، حوضه‌ای با جمعیت ۲۰۸۶۰۶۹ نفر است که از این جمعیت، ۴۵٪ در مناطق شهری و ۵۵٪ در مناطق روستایی جای دارند. این حوضه دارای ۱۱ محدوده مطالعاتی با کدهای ۱۳۰۱ تا ۱۳۱۱ مطابق شکل ۴ است. طبق مطالعات صورت گرفته در سال ۸۵-۱۳۸۴ توسط شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس در قالب مطالعات به هنگام‌سازی طرح جامع آب کشور در حوضه سفیدرود بزرگ، منابع اصلی تولید کننده فسفر در این حوضه، فاضلاب ناشی از آبریز پروری،

طرح‌های توسعه و فعالیت‌های انسانی باید مورد توجه قرار گیرد.

۲-۲ توسعه معادلات و معرفی نرم‌افزار HEC-RAS

سیستم تحلیل رودخانه انجمن مهندسين ارتش آمریکا (HEC-RAS)، نرم‌افزاری است که به کاربر امکان انجام محاسبات هیدرولیک رودخانه در حالت جریان ماندگار و غیرماندگار یک بعدی، مدل‌سازی انتقال رسوب/مرز متحرک، تحلیل دما و کیفیت آب را می‌دهد. یکی از شاخصه‌های مهم این نرم‌افزار این است، که به اطلاعات ورودی اندکی برای شبیه‌سازی احتیاج دارد و به طبع هزینه‌های کمتری را به پروژه اعمال می‌کند [۱۲] و در مناطقی که اطلاعات میدانی محدودی وجود دارد می‌تواند بسیار کارآمد باشد. گروه مهندسی ارتش آمریکا در راستای توسعه مدل‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی خود و توجه به نگرانی‌های مربوط به کیفیت آب علی‌الخصوص تغذیه‌گرایی که یکی از مشکلات شایع رودخانه‌های این کشور است، ماژولی تحت عنوان 'NSMI'، به نرم‌افزار (HEC-RAS)، برای انجام شبیه‌سازی مواد مغذی در کنار شبیه‌سازی دما^۱، اضافه کرد [۱۲]. در طراحی این ماژول سعی بر این بوده است که کاستی‌ها و نقص‌های نرم‌افزار (QUAL2K) برطرف شده و مدلی پیشرفته‌تر از این نرم‌افزار ارائه شود، همچنین برتری این نرم‌افزار نسبت به غالب نرم‌افزارهای کیفیت آب که به بررسی شرایط مخزن می‌پردازند، این است که، توانایی بررسی غلظت مواد مغذی را در طول رودخانه و در هر مقطع دلخواه دارد و این امکان را به کاربر می‌دهد که شرایط تغذیه‌گرایی را در هر مقطع دلخواه در طول رودخانه بررسی کند [۱۳]. شبیه‌سازی جریان ماندگار در این نرم‌افزار بر اساس روش عددی گام به گام استاندارد صورت می‌گیرد و از معادله‌های مومنوم، انرژی، پیوستگی برای انجام محاسبات استفاده می‌شود [۱۲]. جهت حل معادله یک بعدی انتقال و پخش^۲ مواد مغذی و دما (معادله ۱) در این نرم‌افزار، در مدل کیفیت آب از الگوی عددی صریح QUICKSET_ULTIMATE [۱۲] به شکل معادله (۲) استفاده می‌شود.

$$\frac{\delta(v\phi)}{\delta t} = -\frac{\delta(Q\phi)}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta}{\delta x} \left[\Gamma A \frac{\delta\phi}{\delta x} \right] \Delta x \pm S \quad (1)$$

که در آن v حجم سلول کیفیت آب (m^3)، ϕ غلظت (kg/m^3)، Q دبی جریان (m^3/s)، Γ ضریب پخشیدگی تعریف شده توسط کاربر (m^2/s)، A سطح مقطع عرضی سلول (m^2) و S منبع و مصرف مواد مغذی (kg/s)، x فاصله از محل تزریق آلاینده (m) است.

$$\phi_i^{n+1} = \phi_i^n + c \left(\frac{1}{8} \phi_{i-2}^n - \frac{7}{8} \phi_{i-1}^n + \frac{3}{8} \phi_i^n + \frac{3}{8} \phi_{i+1}^n \right) + \alpha (\phi_{i-1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i+1}^n) + \frac{\delta\phi}{\delta t} SS \quad (2)$$

عبارات بودجه انرژی سلول ($C/m^3/s$) یا عبارات مواد مغذی سلول ($kg/m^3/s$)، ϕ_i^{n+1} غلظت در نقطه مرکزی سلول (i) در زمان کنونی (n+1) (kg/m^3)، ϕ_i^n غلظت در نقطه مرکزی سلول (i) در گام زمانی قبلی (n) (kg/m^3)، ϕ_{i-2}^n غلظت در نقطه بالادست به اندازه دو گام مکانی (i-2) در زمان قبلی (n) (kg/m^3)، ϕ_{i-1}^n غلظت در نقطه بالادستی (i-1) و در زمان قبلی (n) (kg/m^3)، ϕ_{i+1}^n غلظت در نقطه پایین دستی (i+1) و در زمان قبلی (n) (kg/m^3) است. طبق روش آنالیز پایداری آقای فن نیومن^۴، پایداری روش QUICKSET-ULTIMATE، در گرو برقراری دو شرط کورانت^۵ (رابطه ۳) و پکلت^۶ (رابطه ۴) به صورت روابط ذیل است [۱۲]:

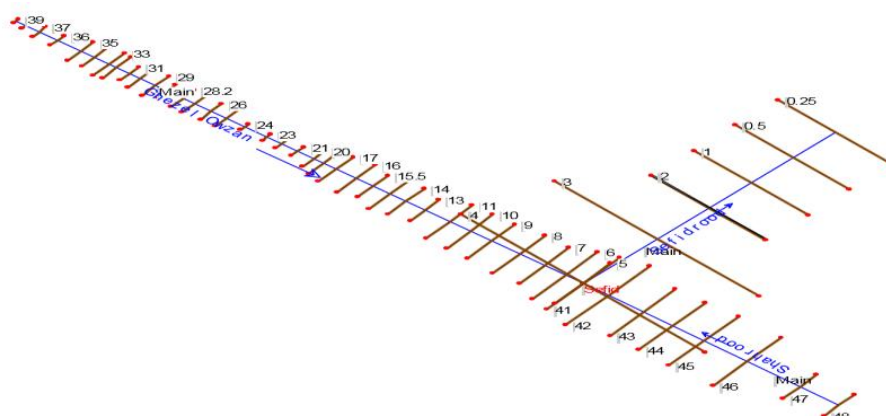
$$c = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 0/9 \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\Gamma \Delta t}{\Delta x^2} \leq 0/4 \quad (4)$$

بنابراین همانطور که مشخص است به دلیل به کارگیری روش عددی صریح در حل معادله انتقال و نشر مواد مغذی نرم‌افزار HEC-RAS، انتخاب گام زمانی و گام مکانی مناسب توسط کاربر به جهت تاثیر بر خروجی مطلوب و واسنجی مدل اهمیت بالایی دارد. منابع و مصارف مجزا و غلظت‌های محاسباتی، خروجی مدل هستند [۱۲].

4 Von Neumann Stability Analysis
5 Courant
6 Peclet

1 Nutrient Simulation Modeling I
2 Temperature Modeling
3 Advection-Diffusion



شکل ۵. نقشه ژئومتریک رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود و سفیدرود

Fig. 5. Geometric Plan of Qezel Ozan, Shahroud and Sefidrood Rivers

۳- سناریو واسنجی

کالیبراسیون و یا واسنجی مدل، فرآیندی است که در آن محاسبات و برآوردهای مدل با داده‌های مشاهداتی منطقه مورد مطالعه، مقایسه می‌شود. در این فرآیند سعی بر این است که شرایط و فرض‌های در نظر گرفته شده برای شبیه‌سازی با شرایط موجود در منطقه مطالعاتی مورد نظر یکسان و برابر باشد [۱۴].

اجرا یک مدل شبیه‌سازی کیفیت آب، نیازمند یک مدل جریان ماندگار یا غیرماندگار واسنجی شده است. اطلاعات ورودی مدل جریان در حالت ماندگار شامل: داده‌های ژئومتری، ضریب زبری مانینگ n ، ضریب افت ناشی از تنگ‌شدگی و بازشدگی (C_e, C_c) اطلاعات مربوط به سازه‌های مسیر (پل‌ها و کالورت‌ها) بوده و خصوصیات جریان شامل: شرایط اولیه رژیم جریان و انتخاب شرایط مرزی در بالادست و پاییندست می‌باشد. در سناریو واسنجی اطلاعات مربوط به مقاطع عرضی رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود از مطالعات صورت گرفته توسط موسسه تحقیقات آب دریافت و مطابق با شکل ۵ به مدل داده شد.

در سناریو واسنجی، دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود، بر مبنای اطلاعات دبی جریان در دو ایستگاه هیدرومتری گیلوان (بالادست رودخانه قزل‌اوزن)، لوشان (بالادست رودخانه شاهرود) در ماه‌های خرداد-تیر-مرداد-شهریور سال ۲۰۰۵ میلادی (۱۳۸۴ شمسی) مطابق جدول ۱، به نرم‌افزار معرفی شده است. بنابراین ۴ پروفیل جریان در مدل هیدرولیکی ساخته شده است. داده‌های شرایط مرزی به دلیل وجود جریان مختلط هم در بالادست و هم در پایین‌دست جریان رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود و سفیدرود (قبل از سد) به صورت شیب انرژی (S) به مدل داده شده است.

واسنجی مدل هیدرولیکی جریان ماندگار رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود به وسیله، مقایسه تراز آب پشت سد سفیدرود محاسبه شده توسط نرم‌افزار و تراز سطح آب اندازه‌گیری شده توسط موسسه تحقیقات آب در موقعیت مزبور مربوط به ماه‌های خرداد-تیر-مرداد-شهریور سال ۲۰۰۵، صورت گرفت. با انجام سعی و خطا و تغییر بازشدگی دریاچه‌های سد سفیدرود مطابق با شرایط واقعی به نتایجی با درصد خطای کمتر از ۵٪ دست یافته شد.

ساخت یک مدل شبیه‌سازی کیفیت آب نیازمند ورود اطلاعات کیفیت آب شامل: داده‌های سلول کیفیت آب، داده‌های مرزی آب، داده‌های اولیه کیفیت آب، ضریب پخشیدگی، اطلاعات هواشناسی و پارامترهای منبع-مصرف است.

انتخاب طول سلول کیفیت آب به جهت تاثیر آن بر عدد کورانت (رابطه ۳) و پکلت (رابطه ۴) بسیار اهمیت دارد. طول سلول کیفیت آب در مدل ساخته شده برای رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود برابر با کمترین فاصله میان مقاطع عرضی موجود در رودخانه‌ها در نظر گرفته شد.

مشخصات کیفی آب شامل دما، غلظت ترکیبات نیتروژن محلول (org-N) $(\text{N}, \text{NH}_4\text{-N}, \text{NO}_2\text{-N}, \text{NO}_3\text{-N})$ ، ترکیبات فسفر محلول شامل فسفر آلی و اورتوفسفات $(\text{org-P}, \text{PO}_4\text{-P})$ ، اکسیژن خواهی بیولوژیکی مواد کربن دار (CBOD)، غلظت توده زنده جلبک (فیتوپلانکتون)، اکسیژن محلول (DO) است، که از اطلاعات موجود در مطالعات موسسه تحقیقات آب استخراج شده و به صورت شرایط مرزی و اولیه به مدل داده شده است.

1 در نرم‌افزار HEC-RAS شکل ذره‌ای ترکیبات فسفر و نیتروژن مدل نمی‌شود

جدول ۱. دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در ماه‌های سال ۲۰۰۵ (m³/s)

Table 1. Discharge (m³/s) of Qezel Ozan and Shahroud Rivers in the Months of 2005

ایستگاه	گیلوان (قزل‌اوزن)	لوشان (شاهرود)
ماه	دبی (m ³ /s)	دبی (m ³ /s)
خرداد	۲۰۶/۶۲	۷۸/۰۳
تیر	۲۰۴/۳۲	۶۳/۷۷
مرداد	۱۵۴/۴۵	۶۵/۱۴
شهریور	۵۵/۶۹	۲۷/۱۷

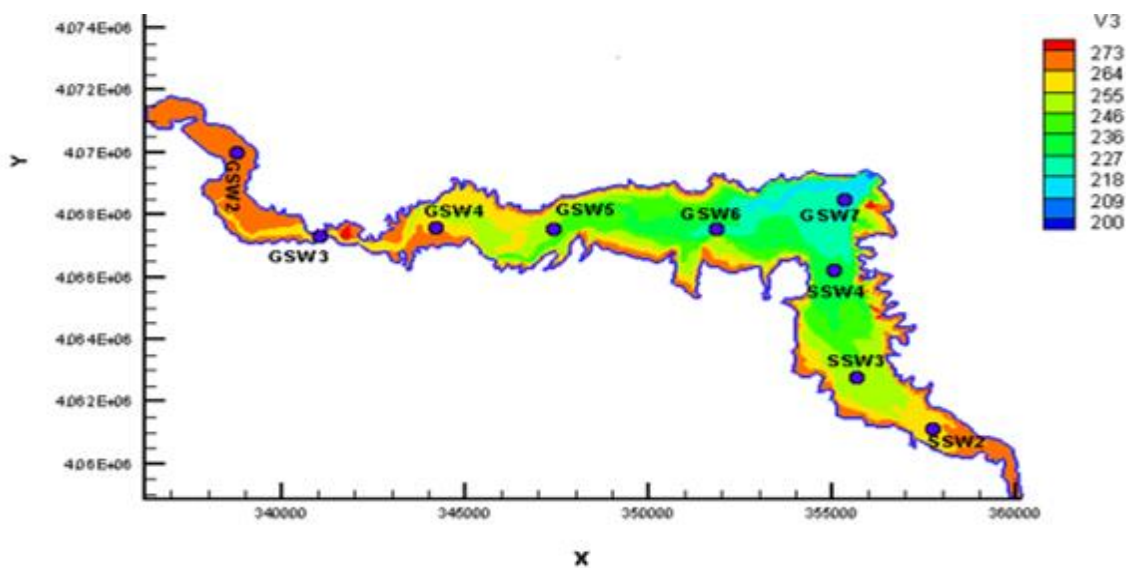


Fig. 6. Map of Sampling Stations Implementing by Water Research Institute

شکل ۶. نقشه ایستگاه‌های نمونه برداری موسسه تحقیقات آب

سری‌های زمانی ۳ ساعته در طول ۳۰ روز مصادف با ۱۲ جولای ۲۰۰۵ لغایت ۱۲ آگوست ۲۰۰۵، به مدل داده شده است. همانطور که در شکل ۶ قابل مشاهده است، اطلاعات کیفی مربوط به ایستگاه (GSW3) به عنوان اطلاعات کیفیت آب مرز بالادست رودخانه قزل‌اوزن، ایستگاه (SSW2) به عنوان مرز بالادست رودخانه شاهرود قابل استفاده است.

ضریب پخشیدگی به ۳ صورت ضریب پخشیدگی طولی^۱، عرضی^۲ و

این اطلاعات (به استثناء دما) مربوط به نمونه‌برداری میدانی صورت گرفته توسط این موسسه از رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود در روز ۱۲ ام از ماه جولای سال ۲۰۰۵ میلادی (خرداد ۱۳۸۴ شمسی) در ساعت ۹-۱۲ صبح، به صورت مقادیری ثابت است. بنابراین در این مطالعه غلظت‌های اندازه‌گیری شده به عنوان مقادیر غلظت‌های متوسط مواد مغذی، مربوط به رودخانه‌های در حال مطالعه، در نظر گرفته شده است. شکل ۶ نمایی از ایستگاه‌های نمونه‌برداری موسسه تحقیقات آب را نشان می‌دهد. در این پژوهش دمای آب به شکل ضریبی از دمای هوا در محدوده رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود، دریافت شده از ایستگاه هواشناسی منجیل، به صورت

- 1 Longitudinal dispersion coefficient
- 2 Lateral dispersion

جدول ۲. نتایج واسنجی مدل کیفیت آب HEC-RAS

Table 2. Results of Calibration Scenario by HEC-RAS Water Quality Model

DO (mg/l)			PO ₄ (mg/l)			دمای آب (C°)			پارامتر
سفيدرود	شاهرود	قزل اوزن	سفيدرود	شاهرود	قزل اوزن	سفيدرود	شاهرود	قزل اوزن	رودخانه
۶/۷	۷	۶/۹	۰/۳۴	۰/۲۰	۰/۲۶	۲۲/۹	۲۲/۱۰	۲۴/۴	نمونه برداری میدانی
۷/۰۱	۶/۹۸۸	۶/۸	۰/۳۳۹	۰/۲۰	۰/۲۶۰۲	۲۱/۹۵	۲۲/۲۶	۲۵/۳۶	شبیه سازی نرم افزار HEC-RAS
-۴/۴	۰/۲	۱/۵	۰/۳	۰	۰/۰۷	-۴/۱	-۳/۷	۳/۹	خطا (درصد)

اطلاعات هواشناسی از گزارش سازمان هواشناسی شامل، فشار اتمسفریک، دمای هوا، سرعت باد، ساعات ابرناکی و نور خورشید است که به صورت سری های زمانی ۳ ساعته در طول دوره ۳۰ روزه شبیه سازی به نرم افزار داده شد. پارامترهای منبع و مصرف به مصرف چرخه داخلی مواد مغذی اشاره دارد که در مدل ساخته شده برای رودخانه های قزل اوزن، شاهرود و سفیدرود با اندکی تغییر نسبت به مقدار پیش فرض نرم افزار واسنجی شده است. مسئله قابل ذکر در خصوص پارامترهای منبع و مصرف، وابستگی برخی از آن ها به تغییرات دمای آب است.

شبیه سازی کیفیت آب در این سناریو در یک دوره ۳۰ روزه از ۱۲ جولای سال ۲۰۰۵ تا ۱۲ آگوست سال ۲۰۰۵ صورت گرفته است. واسنجی مدل کیفیت آب رودخانه های منطقه مورد مطالعه این سناریو با مقایسه مشخصات کیفی رودخانه اعم از غلظت اورتوفسفات (PO₄)، دما و غلظت اکسیژن محلول (DO) محاسبه شده توسط نرم افزار و مشخصات کیفی حاصل از پایش میدانی موسسه تحقیقات آب در مقاطع عرضی مقارن با ایستگاه های نمونه برداری (GSW5) برای رودخانه قزل اوزن، (SSW4) برای رودخانه شاهرود و (GSW7) برای رودخانه سفیدرود در روز ۱۲ جولای سال ۲۰۰۵ ساعت ۹-۱۲ صبح، صورت گرفته است. نتایج این مقایسه در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین خطا مربوط به اکسیژن محلول (DO) در رودخانه سفیدرود، برابر با ۴/۴٪ است. در نتیجه می توان گفت مدل ساخته شده در نرم افزار HEC-RAS از دقت خوبی برای شبیه سازی انتقال و پخش فسفر در رودخانه های قزل اوزن، شاهرود، سفیدرود برخوردار است.

قائم^۱ در جریان آب تعریف می شود که از این میان ضریب پخشیدگی طولی اثرگذاری و اهمیت بیشتری در پخش آلاینده ها دارد و در برخی موارد، می توان از دو ضریب دیگر صرف نظر کرد چرا که اختلاط در جهت عرضی و قائم خیلی سریع صورت می گیرد اما پخش در جهت جریان رودخانه همچنان ادامه دارد [۱۵]. در نرم افزار HEC-RAS ضریب پخشیدگی طولی می تواند توسط کاربر، به صورت عددی ثابت برای هر بازه از رودخانه در نظر گرفته شود و یا با انتخاب گزینه، محاسبه مقدار، محاسبه ضریب پخشیدگی بر عهده خود نرم افزار گذاشته شود. در این صورت نرم افزار با استفاده از رابطه ۵ که برگرفته از فرمول Fishers است [۱۲]، این ضریب را محاسبه خواهد کرد:

$$D = m \times 0.011 \times \frac{u^2 w^2}{yu^*} \quad (5)$$

در رابطه فوق؛ D ، m ، u ، w ، y ، u^* به ترتیب، ضریب پخشیدگی (m²/s)، ضریب ثابت، سرعت جریان (m/s)، عرض متوسط کانال (m)، عمق متوسط کانال (m)، سرعت برشی (m/s) است. m ضریبی است که کاربر به مدل می دهد و این مقدار باید برای رسیدن به نتیجه مناسب، مورد واسنجی قرار گیرد. اگر این مقدار برابر با ۱، در نظر گرفته شود، فرمول دقیقاً فرمول Fishers خواهد بود. در این پژوهش ضریب پخشیدگی توسط خود نرم افزار برای هر مقطع به صورت جداگانه محاسبه شده و ضریب m برای رسیدن به خروجی های منطبق با مقادیر نمونه برداری میدانی برابر با ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است.

2 Computed value

1 Vertical dispersion

جدول ۳. سناریوهای آبی با رویکرد تغییرات عوامل طبیعی موثر در انتقال-نشر فسفر

Table 3. Attitudes of Future Scenarios with the Approach of Changes in Natural Factors Affecting Phosphorus Advection-Diffusion

توضیحات	ویژگی‌ها	نام سناریو	عامل تاثیرگذار در انتقال-نشر فسفر
افزایش $0.3^{\circ}C$ متوسط دمای هوا در هر دهه از سال ۱۳۸۵ تا ۱۴۲۰*	افزایش $1^{\circ}C$ دمای هوا	یک	
افزایش حجم بارندگی در طول سال‌های ۱۳۸۵-۱۴۲۰ نسبت به سال ۱۳۸۵**	افزایش ۳۰٪ دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود	(۱-۲)	
کاهش حجم بارندگی در طول سال‌های ۱۳۸۵-۱۴۲۰ نسبت به سال ۱۳۸۵	کاهش ۳۰٪ دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن-شاهرود	(۲-۲)	عامل طبیعی

* طبق سالنامه‌های آماری استان‌های حوضه آبریز سفیدرود مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵، متوسط دمای هوا در غالب استان‌ها در این دوره به میزان $0.3^{\circ}C$ افزایش داشته است. با فرض ثابت بودن روند افزایش دما در هر دهه، متوسط دمای هوا در سال ۱۴۲۰ به میزان $1^{\circ}C$ نسبت به سال ۱۳۸۵ افزایش خواهد یافت. ** دبی خروجی رودخانه‌ها به عوامل متعددی از جمله: شرایط آب و هوایی، حجم بارندگی، مورفولوژی حوضه آبریز، پوشش گیاهی و... بستگی دارد که مقدار حجم بارندگی از مهم‌ترین آن‌ها است. فرض افزایش و کاهش ۳۰٪ دبی بر اساس واقعیات موجود در نظر گرفته شده است.

۴- توسعه سناریوهای مبتنی بر برنامه توسعه آبی حوضه

همانطور که پیش‌تر گفته شد، طبق مطالعات شرکت مهندسی مه‌باب قدس در سال ۱۳۸۵، در محدوده حوضه آبریز سفیدرود، کاربری‌های اراضی (مراتع، کشت دیم، کشت آبی و...)، پرورش دام (به ویژه شیوه سنتی)، فاضلاب جوامع شهری-روستایی از عوامل اصلی ورود فسفر به رودخانه‌های این حوضه مطالعاتی بودند. بنابراین طراحی سناریوهای آبی بر اساس عوامل اصلی ورود فسفر به رودخانه‌ها، روند تغییرات آن‌ها در طی سال‌های ۱۳۹۵-۱۳۸۵ در سالنامه‌های آماری، طرح‌های برنامه چهارم توسعه‌ی شهرها و استان‌های واقع در ناحیه ۱۳۰۲ تا ۱۳۱۱ حوضه آبریز سفیدرود بزرگ صورت گرفته است. لازم به ذکر است تقسیم‌بندی محدوده‌های مطالعاتی ۱۱ گانه حوضه آبریز سفیدرود بزرگ در شکل ۳ آمده است. در طراحی سناریوهای آبی، ضمن بررسی تغییرات فعالیت‌های انسانی تاثیرگذار در ورود فسفر به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سال افق طرح (۱۴۲۰) نسبت به سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۵)، تغییرات پارامترهای آب و هوایی و جریان ماندگار، موثر در چرخه فسفر در آب نیز بررسی شده است. ویژگی سناریوهای تعریف شده برای سال افق طرح به صورت جدول‌های ۳ و ۴ است.

اساس برنامه چهارم توسعه استان‌های حوضه آبریز سفیدرود بزرگ به به میزان ۵۰٪ افزایش خواهد بود. کاهش اراضی با کشت آبی که در سناریو ۵ قابل مشاهده است. همچنین بررسی سالنامه‌های آماری مربوط به سال‌های ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۵ نشان از کاهش تعداد دام در کل استان‌های حوضه و افزایش چشمگیر تولید ماهی در استان‌های مجاور رودخانه قزل‌اوزن را دارد. در سناریو سه و چهار فرض بر این است که روند کاهش تولید دام متوقف و تولید دام با شیب ثابتی در هر دهه افزایش ولی سناریو پنج بر اساس کاهش تولید دام طراحی شده است. در طراحی سناریوهای مربوط به سال افق طرح (۱۴۲۰) برای تمام ۱۱ محدوده مطالعاتی تصفیه‌خانه‌هایی با عملکرد تا تصفیه ثانویه در نظر گرفته شده است.

جدول ۵ مقدار فسفر تولید شده ناشی از فعالیت‌های کشاورزی، دام پروری، پساب فاضلاب شهری-روستایی و آبی‌پروری در سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۵) و در سال افق طرح (۱۴۲۰) و درصد تغییر نسبت به سال پایه مطالعات را نشان می‌دهد.

مدل کیفیت آب سناریوهای سه، چهار و پنج با بازتاب درصد تغییرات فسفر ورودی، در غلظت اورتوفسفات مرز بالادست رودخانه قزل‌اوزن (ایستگاه نمونه برداری GSW3) و مرز بالادست رودخانه شاهرود (ایستگاه نمونه برداری SSW2) مطابق با مقادیر جدول ۶ برپا گردید. در ادامه بحث نتایج مدل واسنجی برای منطقه مورد مطالعه به عنوان سناریو شاهد در شبیه

جدول ۴. نتایج واسنجی مدل کیفیت آب HEC-RAS

Table 4. Results of Calibration Scenario by HEC-RAS Water Quality Model

عامل انسانی موثر در ورود فسفر		کشت آبی**		دام پروری***		پساب شهری-روستایی****		آبزی پروری	
محدوده*	۱۳۰۲الی ۱۳۰۹	۱۳۱۰الی ۱۳۱۰	۱۳۰۲الی ۱۳۰۲	۱۳۱۰الی ۱۳۱۰	۱۳۰۲الی ۱۳۰۲	۱۳۱۰الی ۱۳۱۰	۱۳۰۹الی ۱۳۰۹	۱۳۱۰الی ۱۳۱۰	۱۳۱۱الی ۱۳۱۱
سه	افزایش ۵۰٪	افزایش ۵۰٪	افزایش ۱۰٪	افزایش ۱۰٪	افزایش ۲۴٪	افزایش ۶٪	افزایش ۸ برابری	ثابت	ثابت
چهار	افزایش ۵۰٪	افزایش ۵۰٪	افزایش ۳۰٪	افزایش ۳۰٪	افزایش ۴۳٪	افزایش ۷٪	افزایش ۸ برابری	ثابت	ثابت
نام سناریو	پنج	کاهش ۵۰٪	کاهش ۵۰٪	کاهش ۴۰٪	کاهش ۴۰٪	افزایش ۱۸٪	کاهش ۷٪	ثابت	ثابت

* نواحی با کد مطالعاتی (۱۳۰۲ الی ۱۳۰۹) مربوط به استان‌های مجاور قزل‌اوزن و (۱۳۱۰ و ۱۳۱۱) مربوط به استان‌های مجاور رودخانه شاهرود هستند.
 ** منظور از اراضی کشت آبی است. فسفر موجود در هر هکتار از این کاربری به ترتیب برابر است با ۳/۵ تن در سال [۱۱].
 *** تعداد دام در سال ۱۳۸۵ و ۱۳۹۵ در این پژوهش به دام معادل گوسفندی تبدیل شده و تغییرات تعداد دام به شکل یکپارچه بررسی شده است. فسفر موجود در فضولات هر راس دام گوسفندی ۰/۰۰۶۶ پوند در روز برابر با ۰/۰۰۱۰۹۵ تن در سال است [۱۶].
 **** منظور از حجم پساب شهری-روستایی، پساب واریزی به رودخانه‌ها است. فسفر خروجی از حجم پساب به طور میانگین ۰/۱۴۹ ton/m³ در سال در نظر گرفته شده است [۱۱].

جدول ۵. فسفر ورودی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود ناشی از فعالیت‌های انسانی در سال پایه (۱۳۸۵-۱۳۸۴) و سال افق طرح (۱۴۲۰)

Table 5. Phosphorus to Qezel Ozan and Shahroud Rivers due to Human Activities in the Base Year (2005) and the Futre Year (2040)

محدوده	فسفر در سال پایه (تن در سال)	فسفر سناریو سه (تن در سال)	فسفر سناریو چهار (تن در سال)	فسفر سناریو پنج (تن در سال)	درصد تغییر فسفر		
					سه	چهار	پنج
۱۳۰۹ الی ۱۳۰۲ (قزل‌اوزن)	۷۱۶۶/۳۲	۸۰۹۰/۵۲۰	۸۳۸۸/۷۳۳	۶۳۳۸/۴۷۵	۱۳٪	۱۷٪	-۱۱٪
۱۳۱۱ و ۱۳۱۰ (شاهرود)	۵۳۳/۵۱	۵۶۱/۸۵	۶۲۶/۶۷	۴۰۱/۹۱	۵٪	۱۷٪	-۲۴٪

جدول ۶. متوسط غلظت اورتوفسفات مرزبالادست رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سناریو شاهد و سناریوهای مربوط به سال افق طرح (۱۴۲۰)

Table 6. Mean Orthophosphate Concentration uUpstream of Qezel Ozan and Shahroud Rivers in Witness Scenario and Scenarios Related to the Futre Year (2040)

ایستگاه نمونه برداری - رودخانه	متوسط غلظت فسفر سناریو شاهد (mg/l)	متوسط غلظت فسفر سناریو سه (mg/l)	متوسط غلظت فسفر سناریو چهار (mg/l)	متوسط غلظت فسفر سناریو پنج (mg/l)
GSW3 - قزل‌اوزن	۰/۲۶	۰/۲۹	۰/۳۱	۰/۲۳
SSW2 - شاهرود	۰/۲	۰/۲۱۹	۰/۲۳۵	۰/۱۵۱

جدول ۷. مشخصه‌های موجود در نمودارها

Table 7. Characteristics in the Diagrams

مفهوم	علامت	مفهوم	علامت	مفهوم	علامت
سناریو سه	SE3	سناریو یک	SE1	اورتوفسفات محلول	PO ₄
سناریو چهار	SE4	سناریو دو-کاهش دبی	SE2-1	جلبک محلول	Algea
سناریو پنج	SE5	سناریو دو-افزایش دبی	SE2-2	سناریو شاهد	SE SHAHED

سازیه‌ها در نظر گرفته شده است.

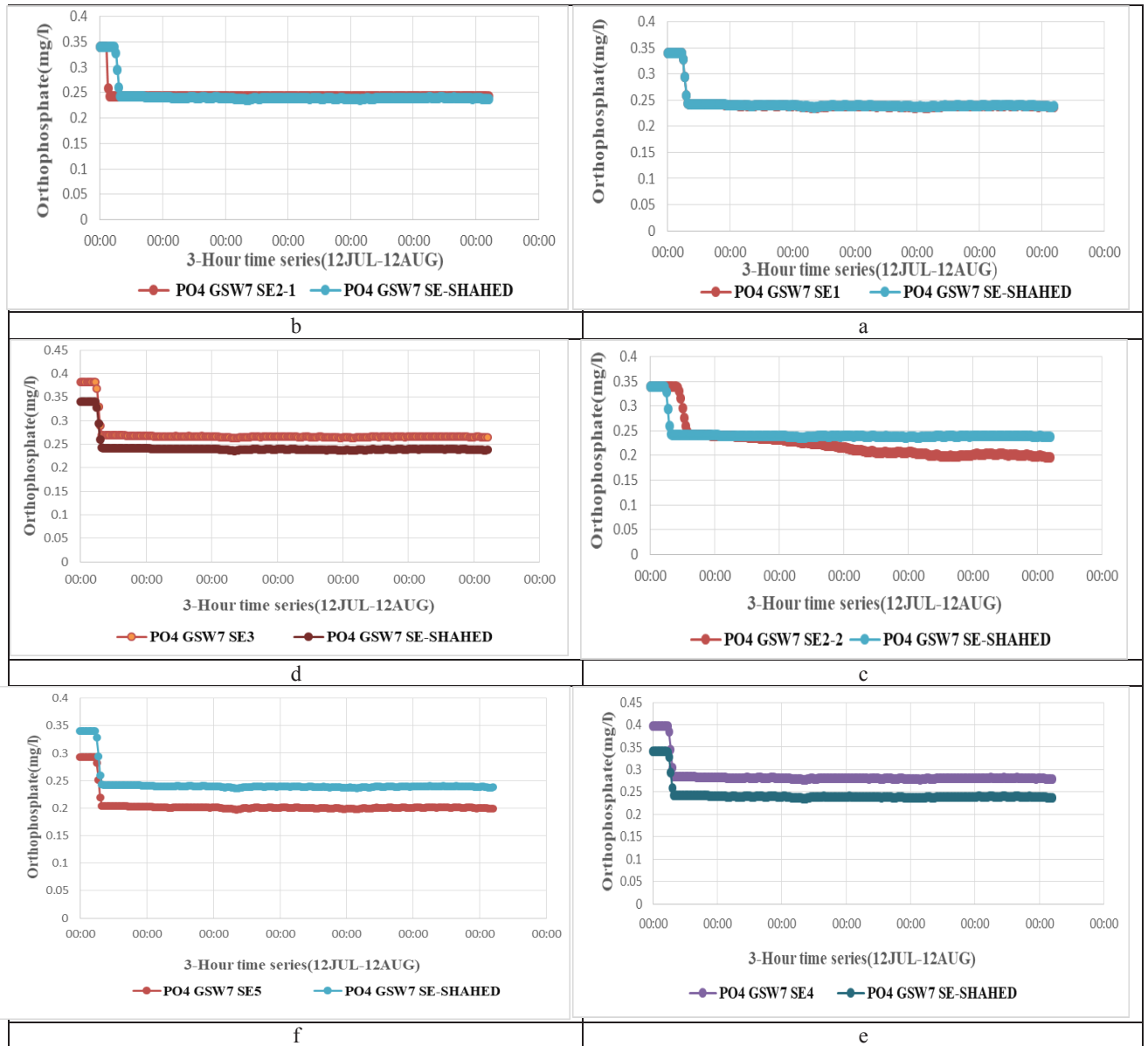
۵- ارائه نتایج

شبیه‌سازی انتقال-پخش فسفر سناریوهای آتی در نرم‌افزار HEC-RAS در طی دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای الی ۱۲ آگوست سال (۲۰۴۰ میلادی)-(۱۴۲۰ شمسی) صورت گرفت و نتایج این شبیه‌سازی با نتایج شبیه‌سازی دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای الی ۱۲ آگوست سال (۲۰۰۵ میلادی)-(۱۳۸۴ شمسی) از نقطه نظر متوسط غلظت اورتوفسفات و غلظت توده زنده جلبک (فیتوپلانکتون‌ها) در رودخانه سفیدرود مقایسه شده است. نمودارهای شکل ۷ و شکل ۸ مربوط به غلظت اورتوفسفات و توده زنده جلبک رودخانه سفیدرود در مقطع عرضی مربوط به ایستگاه نمونه برداری (GSW7) در سناریوهای یک تا پنج است. جدول ۷ راهنمایی برای فهم بهتر نمودارها است.

بررسی نمودارهای شکل ۷ نشان می‌دهد که افزایش $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ متوسط دمای هوای حوضه آبریز سفیدرود در سناریوی یک، موجب کاهش اندک متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به متوسط غلظت اورتوفسفات آن در سناریو شاهد شده است. کاهش 30% دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سناریو دو موجب افزایش اندک غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به نتایج سناریو شاهد شده است. همچنین افزایش 30% دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سناریو دو موجب کاهش $5/0\text{ mg/l}$ متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به نتایج سناریو شاهد شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت تغییرات شرایط آب و هوایی در سال‌های آتی تاثیر چشمگیری بر روی متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به سال پایه مطالعات نخواهد گذارد. در حالی که افزایش 12% غلظت اورتوفسفات در مرز بالادست رودخانه قزل‌اوزن و 5% آن در

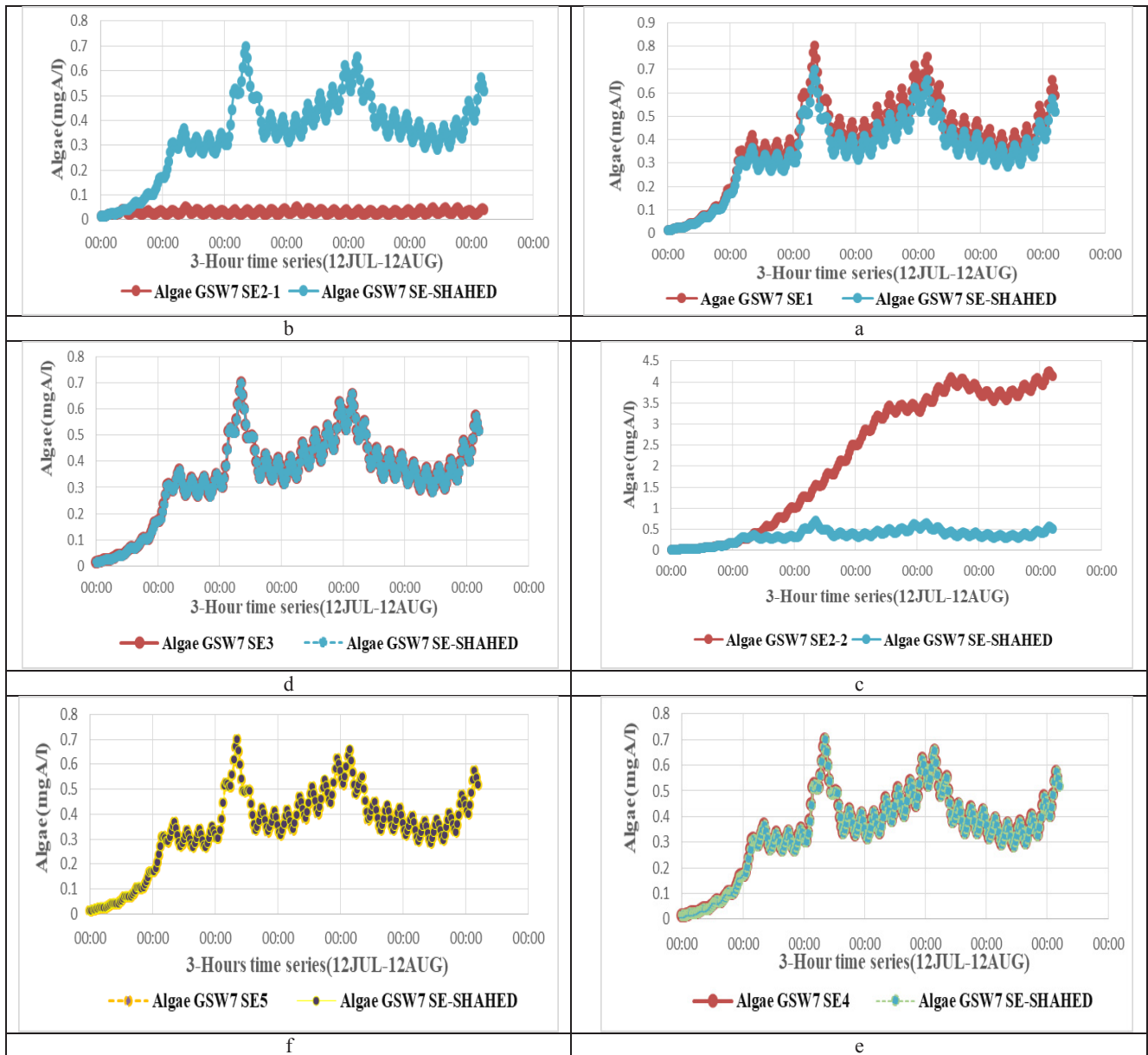
رودخانه شاهرود ناشی از افزایش فسفر ورودی به رودخانه‌ها با رویکرد سناریو سه، موجب افزایش 12% متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود شده است. افزایش 17% متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود (سناریو چهار) موجب افزایش 17% متوسط غلظت فسفر رودخانه سفیدرود و کاهش 11% متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه قزل‌اوزن و 24% آن در رودخانه شاهرود ناشی (سناریو پنج) موجب کاهش 12% متوسط غلظت اورتوفسفات در رودخانه سفیدرود شده است. بنابر نتایج فوق، متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود به میزان قابل توجهی از مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌های بالادست خود علی‌الخصوص رودخانه قزل‌اوزن تاثیر می‌پذیرد. در ادامه جهت بررسی دقیق چرخه فسفر در رودخانه سفیدرود در طی سال‌های آتی، تغییرات غلظت جلبک این رودخانه (به عنوان یکی از اولین علائم نشان دهنده وقوع پدیده تغذیه‌گرایی)، در اثر تغییر شرایط آب و هوایی و تغییر در مقدار فسفر ورودی بررسی شده است.

همانطور که از شکل ۸ قابل مشاهده است، نتایج نشان داد که افزایش $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ متوسط دمای هوا به جهت تاثیر بر پارامترهای منبع و مصرف جلبک که به دما وابسته هستند به مقدار اندکی موجب افزایش غلظت جلبک محلول رودخانه سفیدرود شده است. همچنین افزایش و کاهش دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود با رویکرد سناریو دو به میزان زیادی در غلظت توده زنده جلبک رودخانه سفیدرود اثرگذار بوده است و با کاهش دبی رودخانه‌ها غلظت جلبک در نتایج مربوط به سناریو دو نسبت به نتایج سناریو شاهد کاهش داشته است و با افزایش دبی رودخانه‌ها غلظت جلبک افزایش یافته است که این موضوع با بررسی عوامل موثر در رشد فیتوپلانکتون‌ها قابل توجیه است. چرا که منظور از غلظت توده زنده جلبک در نرم‌افزار HEC-RAS همان غلظت فیتوپلانکتون‌ها است که افزایش ارتفاع آب، کاهش سرعت جریان و وجود نور و مواد مغذی کافی از جمله شرایط مطلوب



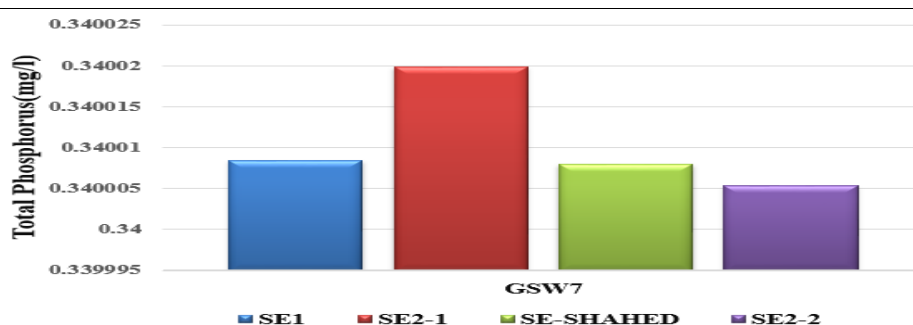
شکل ۷. سری نمودارهای غلظت اورتوفسفات محلول (mg/l) ایستگاه نمونه برداری (GSW7) رودخانه سفیدرود مربوط به سناریوهای یک تا پنج طراحی شده برای سال افق طرح (۲۰۴۰ میلادی)-(۱۴۲۰ شمسی) و مقایسه با سناریو شاهد مربوط به سال (۲۰۰۵ میلادی)-(تیر ماه سال ۱۳۸۴)

Fig. 7. Series of Diagrams of Orthophosphate Concentration (mg / l) for the Station (GSW7) of Sefidrood River for Scenarios One to Five (Year 2040) and Comparison with Witness Scenario (Year 2005)



شکل ۸. سری نمودارهای غلظت توده زنده جلبک (mg/l) ایستگاه نمونه برداری (GSW7) رودخانه سفیدرود مربوط به سناریوهای یک تا پنج طراحی شده برای سال افق طرح (۲۰۴۰ میلادی) - (۱۴۲۰ شمسی) و سناریو شاهد مربوط به سال (۲۰۰۵ میلادی) - (تیرماه سال ۱۳۸۴)

Fig. 8. Series of Diagrams of Algae Biomass Concentration (mg / l) for the Station (GSW7) of Sefidrood River for Scenarios One to Five (Year 2040) and Comparison with Witness Scenario (Year 2005)



شکل ۹. حداکثر غلظت فسفر کل (mg/l) رودخانه سفیدرود به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سناریو یک، دو و شاهد

Fig. 9. Maximum Phosphorus Concentration (mg / l) of Sefidrood River Obtained from Simulation Results of Scenario One, Two and Witness

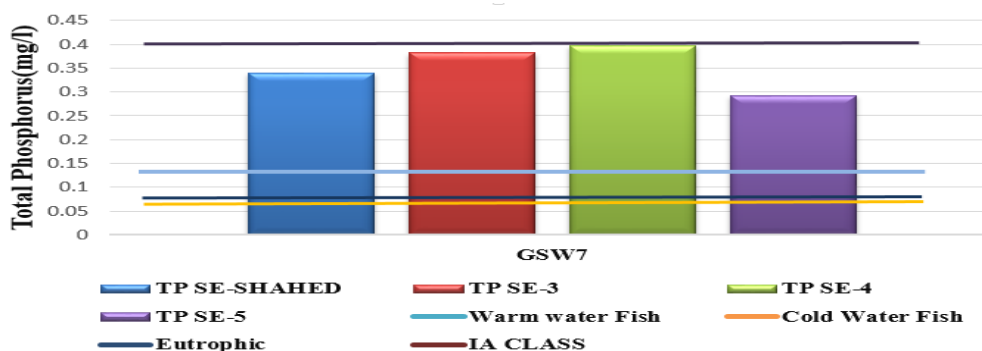
سفيدرود به خود اختصاص داده و پس از آن ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي فسفر كمترين مقدار نسبت به ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي نيتروژن را دارد، بنابراین در رودخانه سفیدرود به دلیل غلظت بالای فسفر و نیتروژن هم در سال پایه مطالعات و هم در سال افق طرح، نور نقش محدود کنندگی رشد توده زنده جلبک را بر عهده دارد. پس از نور، از بین مواد مغذی محدود کننده رشد توده زنده جلبک، اورتوفسفات (تنها ماده غیرآلی فسفر) به دلیل داشتن غلظتی کمتر از غلظت ترکیبات نیتروژن غیرآلی به عنوان کمترین ماده در دسترس جلبک در رودخانه سفیدرود شناخته شد.

با بررسی سری نمودارهای شکل‌های ۷ و ۸ (a,b,c)، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات دما و حجم آب ورودی به رودخانه سفیدرود با فرض عدم ورود فسفر از منابع خارجی، تاثیر چندانی در افزایش و یا کاهش غلظت اورتوفسفات این رودخانه نداشته اما در مقابل غلظت توده زنده جلبک تغییر کرده است. این موضوع نشان دهنده این است که تغییرات دمایی و افزایش-کاهش دبی تنها بر پارامترهای منبع و مصرف جلبک تاثیر گذاشته و با تغییر در شرایط مطلوب برای رشد جلبک موجب افزایش جمعیت جلبک‌ها (فیتوپلانکتون‌ها) و یا کاهش آن می‌شوند و مقدار فسفر کل محلول (اورتوفسفات+ فسفر آلی) به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سناریو یک و دو مطابق با شکل ۹، تغییر ناچیزی نسبت به مقدار فسفر کل سناریو شاهد داشته و چرخه داخلی فسفر در تعادل است.

همچنین بررسی سری نمودارهای (d و e و f) شکل ۷ و ۸ نشان داده است که تغییر در مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود ناشی از عوامل انسانی تنها عامل تغییر غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود

برای رشد آن‌ها است و بالعکس کاهش ارتفاع آب و افزایش سرعت جریان شرایط نامطلوبی برای رشد آن‌ها به حساب می‌آید. حال آن که بررسی مدل هیدرولیکی سناریو دو، نشان داده است که به دلیل حاکمیت رژیم جریان زیر بحرانی در طول رودخانه سفیدرود در محدوده پشت سد سفیدرود، کاهش ۳۰٪ دبی باعث کاهش ارتفاع آب رودخانه و افزایش سرعت آن و افزایش دبی ۳۰٪ موجب افزایش ارتفاع آب و کاهش سرعت جریان رودخانه شده است.

بررسی شکل‌های (d-۷)، (e-۷)، (f-۷) مربوط به نمودارهای سری زمانی سه ساعته غلظت توده زنده جلبک در دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای تا ۱۲ آگوست سال (۲۰۴۰ میلادی)-(۱۴۲۰ شمسی)، به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سناریوهای سه، چهار و پنج نشان داده است که، غلظت توده زنده جلبک رودخانه سفیدرود در اثر تغییر در مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود نسبت به سناریو شاهد تغییری نداشته است و این موضوع نشان دهنده این است که غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود هم در سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۴) و هم در سال افق طرح (۱۴۲۰ شمسی) از مقدار کافی برای رشد جلبک بیشتر بوده و این ماده دیگر نقش عامل محدود کننده رشد جلبک را ایفا نمی‌کند. جهت اثبات این مدعا، ضريب محدوديت نور (FL)، ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي فسفر (FP) و ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي نيتروژن (FN) در محدوده رودخانه سفیدرود از سری نتایج خروجی نرم‌افزار HEC-RAS مربوط به شبیه‌سازی سناریوهای سه، چهار، پنج و شاهد برداشت شده و با یکدیگر مقایسه شد که ضريب محدوديت نور كمترين مقدار را در طول رودخانه



شکل ۱۰. حداکثر غلظت فسفر کل (mg/l) رودخانه سفیدرود به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سناریو سه، چهار، پنج و شاهد

Fig. 10. Maximum Phosphorus Concentration (mg / l) of Sefidrood River Obtained from Simulation Results of Scenario Three, Four, Five and Witness

پدیده تغذیه‌گرایی در رودخانه شناخته می‌شود. شرایط کیفی آب این رودخانه از نقطه نظر غلظت فسفر کل طبق طبقه‌بندی آب آشامیدنی کرینکل^۴ در طبقه کلاس IA، یعنی آبی با غلظت فسفر کل کمتر از ۴/۰ mg/l و کیفیتی مناسب برای آشامیدن، کشاورزی و سایر مصارف عمومی قرار دارد. بنابر نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی انتقال و پخش فسفر در رودخانه سفیدرود در سال افق طرح (۲۰۴۰ میلادی) - (۱۴۲۰ شمسی) با رویکرد سناریوهای یک تا پنج، موثرترین راه جهت کنترل غلظت فسفر رودخانه سفیدرود پیشگیری از ورود بی‌رویه فسفر ناشی از فعالیت‌های انسانی به رودخانه‌های بالادست رودخانه سفیدرود یعنی قزل‌اوزن و شاهرود است. بر همین اساس در این پژوهش سناریوای پیشگیرانه با نام سناریو ایده‌آل طراحی شده است با این فرض که در تمام مناطق ۱۱ گانه بالادست رودخانه سفیدرود تصفیه‌خانه احداث گردیده و تمام تصفیه‌خانه‌ها مجهز به سیستم‌های تصفیه پیشرفته فاضلاب بوده و فسفر ناشی از پساب انسانی مربوط به سال افق طرح با رویکرد سناریو سه (محتمل‌ترین سناریو) با به کارگیری تجهیزات تصفیه پیشرفته فاضلاب، از بین رفته و حداکثر میزان فسفر در هر لیتر حجم پساب واریزی به رودخانه مطابق با استاندارد سازمان حفاظت محیط زیست ۰/۲ mg در نظر گرفته شده است. همچنین پرورش دام به شیوه سنتی به میزان ۹۵٪ کاهش پیدا کرده و بالطبع فاضلاب ناشی از فضولات حیوانی کاهش یافته است. اراضی با کاربری کشت آبی نیز با انجام تمهیداتی جهت جلوگیری از مصرف بی‌رویه منابع آبی به میزان ۲۰٪ کاهش یافته است. مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و

است و تغییر غلظت اورتوفسفات رودخانه به دلیل غلظت بالای این ماده در رودخانه، تأثیری بر چرخه داخلی تولید و مصرف فسفر و افزایش یا کاهش غلظت توده زنده جلبک نگذاشته است. بنابر نتایج فوق جهت بررسی شرایط کیفی رودخانه سفیدرود از نقطه نظر غلظت فسفر کل محلول رودخانه در سال افق طرح (۱۴۲۰ شمسی)، حداکثر غلظت فسفر کل به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی سناریوهای سه، چهار، پنج و شاهد با استانداردهای آب آشامیدنی، حداکثر غلظت فسفر کل مناسب برای ماهی‌های گرمابی و سرد آبی، حداکثر میزان فسفر کل مطلوب برای وقوع پدیده تغذیه‌گرایی مطابق شکل ۱۰ مقایسه شده است.

همانطور که از شکل ۱۰ نیز قابل رویت است، نتایج نشان داده است که حداکثر غلظت فسفر کل محاسبه شده برای رودخانه سفیدرود توسط نرم‌افزار در دوره یک ماهه شبیه‌سازی انتقال و پخش فسفر در سناریوهای سه، چهار، پنج و شاهد از حداکثر فسفر کل مطلوب برای حیات ماهی‌های گرم آبی (۰/۱۳ mg/l) و سرد آبی (۰/۰۱۶ mg/l) بیشتر بوده و از حداکثر فسفر کل مطلوب برای ایجاد شرایط تغذیه‌گرایی رودخانه (۰/۰۷۵ mg/l)^۲ تجاوز کرده است، با این حال قضاوت دقیق در مورد وقوع پدیده تغذیه‌گرایی در رودخانه سفیدرود نیازمند بررسی و اندازه‌گیری مولفه‌هایی دیگر از جمله غلظت کلروفیل آ جلبک‌های کفزی و ثابت^۳ است و غلظت فیتوپلانکتون‌ها که جلبک‌هایی شناور هستند نمی‌تواند معیار مناسبی برای سنجش پدیده تغذیه‌گرایی در این رودخانه باشد [۲] و تنها به عنوان یکی از علائم وقوع

۱ اعلام شده توسط سازمان حفاظت محیط زیست ایران

۲ USEPA2000

۳ Benthic Algae

۴ Kerenkel,Novotony

جدول ۸. مقدار فسفر ورودی به رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود در سال پایه مطالعات (۸۵-۱۳۸۴) و سال افق طرح (۱۴۲۰) در سناریو ایده‌آل

Table 8. Amount of Phosphorus Entering Qezel Ozan and Shahroud Rivers in the Year 2005 and the Year 2040

درصد تغییرات	فسفر ناشی از کنترل فعالیت‌های انسانی در سال افق طرح (تن / سال)	فسفر ناشی از فعالیت‌های انسانی در سال پایه مطالعات (تن / سال)	محدوده مطالعاتی
۱۶٪ -	۶۰۶۴/۹۹	۷۱۶۶/۳۲	۱۳۰۲ الی ۱۳۰۹ (قزل‌اوزن)
۵۸٪ -	۲۲۲/۸۳	۵۳۳/۵۱	۱۳۱۰ و ۱۳۱۱ (شاهرود)

جدول ۹. مقایسه متوسط غلظت اورتوفسفات محلول رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود، سناریو شاهد و سال افق طرح (۱۴۲۰) در سناریو ایده‌آل

Table 9. Comparison of Average Orthophosphate Concentration of Qezel Ozan and Shahroud Rivers, Witness Scenario and Ideal Scenario

غلظت فسفر سناریو ایده‌آل (mg/l)	غلظت فسفر سناریو شاهد (mg/l)	محدوده مطالعاتی
۰/۲۲	۰/۲۶	قزل‌اوزن-GSW3
۰/۰۸	۰/۲	شاهرود-SSW2

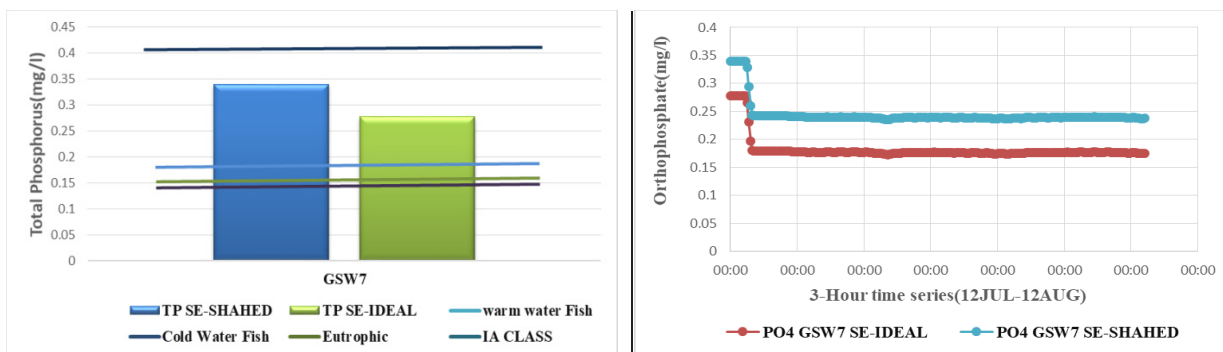
سناریو شاهد کاهش خواهد یافت اما همچنان غلظت فسفر کل محلول از مقدار فسفر کل مطلوب برای حیات ماهی‌های گرم آبی و سرد آبی و فسفر کل مناسب برای وقوع پدیده تغذیه‌گرایی بیشتر بوده و کنترل غلظت فسفر کل این رودخانه نیازمند مطالعات بیشتر و دقیق‌تر و اجرای برنامه‌هایی با رویکرد جلوگیری از ورود فسفر بیش از حد به رودخانه‌ها است.

۶- نتیجه‌گیری

رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود، یکی از منابع اصلی تامین آب مورد نیاز جوامع انسانی و حیوانات موجود در حوضه آبریز سفیدرود و همچنین محل زندگی گونه‌های مختلف از آبزیان هستند اما ورود بی‌رویه مواد مغذی به ویژه فسفر به داخل این رودخانه‌ها می‌تواند شرایط کیفی رودخانه را به شکل نامطلوبی تغییر داده و استفاده از آب این رودخانه‌ها را برای مصارف عمومی و تفریحی و سکونت جانداران آبی محدود سازد. هدف از این بررسیها تبیین اثرات مستقیم و غیرمستقیم ورود فسفر از سرشاخه

شاهرود با در نظر گرفتن فرضیات ذکر شده مطابق جدول ۸ نسبت به سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۵) کاهش یافته و غلظت اورتوفسفات محلول به عنوان اصلی‌ترین شکل از ترکیبات فسفر مطابق جدول ۹ در مدل شبیه‌سازی انتقال و نشر فسفر سناریو شاهد در مرز بالادست رودخانه قزل‌اوزن (مقطع عرضی واقع بر ایستگاه نمونه برداری GSW3) و شاهرود (مقطع عرضی واقع بر ایستگاه نمونه برداری SSW2) تغییر یافته است.

غلظت اورتوفسفات و حداکثر فسفر کل محلول به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی انتقال و پخش فسفر سناریو ایده‌آل در طی دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای لغایت ۱۲ آگوست سال افق طرح (۱۴۲۰ میلادی) با نتایج شبیه‌سازی انتقال و پخش فسفر سناریو شاهد (تیر ۱۳۸۴) در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق با شکل ۱۱، با کنترل مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود ناشی از فعالیت‌های انسانی و با اجرای تمهیدات در نظر گرفته شده در سناریو ایده‌آل این پژوهش، غلظت اورتوفسفات و حداکثر فسفر کل رودخانه سفیدرود به میزان ۱۸٪ نسبت به غلظت اورتوفسفات



شکل ۱۱. مقایسه نتایج غلظت اورتوفسفات و حداکثر غلظت فسفر کل ایستگاه نمونه برداری (GSW7) رودخانه سفیدرود در سناریو شاهد و سناریو ایده آل مربوط به سال افق طرح (۱۴۲۰ شمسی)

Fig. 11. Comparison of Orthophosphate Concentration Results and Maximum Phosphorus Concentration of the Station (GSW7) of Sefidrood River for Scenarios Ideal (Year 2040) and Witness (Year 2005)

خواهد ماند و رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود شرایط کیفی بهتری را تجربه خواهند کرد.

مطابق با نتایج سناریو ایده آل کنترل فعالیت‌های انسانی تولید کننده فسفر با اجرای تمهیداتی همچون: احداث تصفیه‌خانه‌های دارای سیستم تصفیه پیشرفته فاضلاب انسانی در تمام مناطق ۱۱ گانه حوضه آبریز سفیدرود، تبدیل واحدهای دامداری سنتی به واحدهای صنعتی و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام در مراتع، جلوگیری از افزایش بی‌رویه زمین‌هایی با کاربری کشت آبی و کشت محصولات آبی با نیاز آبی بالا، به میزان قابل ملاحظه‌ای در کاهش غلظت فسفر کل رودخانه‌های قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود موثر بوده و با وجود افزایش جمعیت انسانی، افزایش اراضی کشاورزی و افزایش تعداد دام، غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود در سال افق طرح (۱۴۲۰) نسبت به سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۵) به میزان ۱۸٪ کاهش داشته است.

حداکثر غلظت فسفر کل رودخانه سفیدرود به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی مربوط به سناریو سال پایه مطالعات و نتایج شبیه‌سازی مربوط به سناریوهای آتی، از حداکثر غلظت فسفر کل مطلوب برای ماهی‌های گرم آبی و سرد آبی بیشتر بوده و ایجاد محیط سکونت سالم برای ماهی‌ها نیازمند اجرای طرح‌های دقیق و مدون در جهت کاهش غلظت مواد مغذی و توسعه هدفمند و اصولی این صنعت (در صدور مجوزها برای احداث واحدهای جدید پرورش ماهی) در مجاورت سرشاخه‌های رودخانه سفیدرود هست.

حداکثر غلظت فسفر کل رودخانه سفیدرود از مقدار مورد نیاز برای ایجاد شرایط تغذیه‌گرایی در تمام سناریوهای مربوط به سال پایه مطالعات و سال

های رودخانه سفیدرود بر مخزن سد سفیدرود می باشد. مقایسه آگاهانه به منظور آشکارسازی اثرات متقابل پارامترهای تاثیرگذار همچون انتقال و پخش فسفر در اشکال مختلف بر رشد و تکثیر جلبکها تحت عوامل محیطی متفاوت از گامهای مهم این پژوهش است. در این راستا، شبیه‌سازی انتقال و نشر فسفر در این سه رودخانه (قزل‌اوزن، شاهرود و سفیدرود) در دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای تا ۱۲ آگوست سال ۲۰۰۵ میلادی مصادف با تیرماه سال ۱۳۸۴ شمسی صورت گرفت و نتایج آن با پایش میدانی در همان زمان مقایسه گردید. توانایی مدل در شبیه‌سازی بالا ارزیابی گردید. سپس فرآیند توسعه سناریوها بر اساس آمار و مطالعات مهندسی جهت پیش‌بینی غلظت فسفر رودخانه‌ها در اثر افزایش دمای هوا، تغییرات دبی رودخانه‌ها ناشی خشکسالی و ترسالی، رشد جمعیت انسانی و توسعه شبکه‌های آبیاری در سال افق طرح (۲۰۴۰ میلادی) - (۱۴۲۰ شمسی) طراحی گردید. نتایج شبیه‌سازی بر مبنای توسعه سناریوهای آتی در دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای تا ۱۲ آگوست سال ۲۰۴۰ میلادی - تیرماه سال ۱۴۲۰ نشان داد که:

افزایش دمای هوا به میزان 1°C و افزایش - کاهش ۳۰٪ دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود با فرض عدم ورود فسفر از منابع انسانی تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر غلظت فسفر کل و اورتوفسفات محلول رودخانه سفیدرود نسبت به سال پایه مطالعات (تیر ۱۳۸۴ لغایت تیر ۱۳۸۵) نگذارد و تنها بر چرخه داخلی فسفر در آب موثر بوده و باعث تغییر در غلظت توده زنده جلبک در رودخانه سفیدرود خواهد شد.

با کاهش فسفر ورودی به رودخانه‌ها، افزایش دمای هوا و افزایش ۳۰٪ دبی، مقدار اورتوفسفات غیرآلی محلول (mg/l) کمتری در رودخانه‌ها باقی

منابع

- [1] G.M. Filippelli, The Global Phosphorus Cycle, Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 48(1) (2002) 391-425.
- [2] Z. Zhang, B.E. Johnson, Application and Evaluation of the HEC-RAS-Nutrient Simulation Module (NSM I), US Army Engineer Research and Development Center [Environmental Laboratory], 2014.
- [3] Z.-G. Ji, Hydrodynamics and Water Quality: Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries, John Wiley & Sons, 2017.
- [4] H. Ghafari Farsani, H. Poorbagher, H. Farahmand, Effects of Malathion on DNA Breakage in the Liver and Gill of Rainbow Trout (*Oncorhynchus Mykiss*) Using Weighted Averaging, Journal of Fisheries, 69(1) (2016) 89-99.
- [5] P. Vadas, P.J. Kleinman, A. Sharpley, B. Turner, Relating Soil Phosphorus to Dissolved Phosphorus in Runoff, Journal of Environmental Quality, 34(2) (2005) 572-580.
- [6] W.F. James, B.E. Johnson, Algorithm Considerations for Evaluating Phosphorus Transport and Environmental Management Strategies Using a Grid-Based Spatial Watershed Model, Engineer Research and Development Center Vicksburg Ms Structures Lab, 2007.
- [7] S. Isazadeh, M. Tajrishi, A. Abrishamchi, M. Ahmadi, Application of Phosphorus Simulation Models to Latian Reservoir, Water and Wastewater, 16(2 (54)) (2005).
- [8] S.A. Mirbagheri, S. Mahmoodi, S.M. Khezri, Modeling Nitrogen and Phosphorus Chang during Challus River in year 2008-2009 Using Software QUAL2K., Journal of Civil and Environment Engineering, 40(3) (2012).
- [9] N. Badrzadeh, J. Mohammad Vali Samani, M. Mazaheri, B. Fakori, Simulation Of Water Level In The Aras River Using One Dimensional Hydrodynamic Model, in: First International Conference Water, Environment and Sustainable Development, University of Mohaghegh Ardabili, 2015. (In Persian)
- [10] H. Bakhshi, Simulation Nitrogen Dispersion in River Case-study: Sefidrood River, Amirkabir University of Tehran, 2018. (In Persian)
- [11] M.G.C.E. Co., Updating the Country's Water Master

افق طرح بیشتر بوده است. با این حال قضاوت صحیح در مورد وقوع این پدیده نیازمند انجام نمونه برداری‌هایی دقیق‌تر و کامل‌تر از غلظت توده زنده جلبک‌های کفزی است. بررسی این موضوع نیازمند در اختیار داشتن اطلاعات میدانی در چند دوره بازه زمانی (فصول سرد و گرم)، اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر زیست محیطی و انجام یک پژوهش مجزا در شناخت جلبک‌های مخزن سد سفیدرود است.

بنابر نتایج به دست آمده از این پژوهش توصیه می‌گردد که در هنگام مطالعه طرح‌های توسعه‌ای استان‌های مجاور محدوده مورد مطالعه به موضوع افزایش بار ورودی فسفر به بدنه‌های آبی توجه و مولفه‌های کیفی آب رودخانه‌ها به صورت دقیق با انجام نمونه‌برداری‌های مدون دوره‌های مورد نظارت قرارگیرد. همچنین پیشنهاد می‌گردد در مطالعات آبی در این منطقه به جهت افزایش دقت و به دلیل وقوع شرایط مخزنی (وجود سد سفیدرود در انتهای بازه) از مدل‌های ترکیبی یک بعدی و دو بعدی شبیه‌سازی پارامترهای کیفیت آب استفاده شود که این امر نیازمند تحلیل و وجود اندازه‌گیری بیشتر میدانی در ماه‌های مختلف سال (ماه‌های تر-نرمال-خشک) است. بررسی اثرات متقابل فسفر و دیگر مولفه‌های کیفی آب (مانند نیتروژن و فلزات سنگین) بر فرآیند انتقال رسوب و ته نشینی آن نیز می‌تواند یکی از محورهای ادامه راه تحقیق در این عرصه معرفی گردد.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

Q	دبی جریان، (m ³ /s)
V	حجم سلول کیفیت آب، (m ³)
A	مساحت سطح سلول کیفیت آب، (m ²)
S	نرخ منبع-مصرف مواد مغذی/دما، (kg/s)
t	زمان، (s)
x	مکان، (m)
u	سرعت جریان، (m/s)
D	ضریب پخشیدگی، (m ² /s)
m	ضریب ثابت
w	عرض متوسط کانال، (m)
u*	سرعت برشی، (m/s)

علائم یونانی

Γ	ضریب پخشیدگی، (m ² /s)
φ	غلظت، (mg/l)(kg/m ³)
C	عدد کورانت، (بی‌بعد)
α	عدد پکلت، (بی‌بعد)

- [14] D.N. Moriasi, J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Bingner, R.D. Harmel, T.L. Veith, Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, Transactions of the ASABE, 50(3) (2007) 885-900.
- [15] C. Leibundgut, P. Maloszewski, C. Külls, Tracers in Hydrology, John Wiley & Sons, 2011.
- [16] J.A. Moore, M.J. Gamroth, Calculating the Fertilizer Value of Manure from Livestock Operations, (1991).
- Plan, Water Research Institute (WRI), Iran, 2004. (In Persian)
- [12] G.W. Burnner, Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, Users Manual Version 5.0, US Army Corps of Engineers, 2016
- [13] Z. Zhang, B.E. Johnson, Aquatic Nutrient Simulation Modules (NSMs) Developed for Hydrologic and Hydraulic Models, US Army Engineer Research and Development Center Vicksburg United States, 2016.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Sh. Faghihrad , M. Khodayary, F. Kilanehei, Numerical Modeling of Phosphorus Advection and Diffusion in Water Bodies (Case study: Sefidrood River) , Amirkabir J. Civil Eng., 53(12) (2022) 5219-5238.

DOI: 10.22060/ceej.2020.18745.6947

