



## Numerical Modeling of Phosphorus Advection and Diffusion in Water Bodies (Case study: Sefidrood River)

Sh. Faghihrad<sup>1</sup>, M. Khodayary<sup>2</sup>, F. Kilanehei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hydro- Environment Department, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

### Review History:

Received: Jul. 18, 2020

Revised: Aug. 24, 2020

Accepted: Dec. 14, 2020

Available Online: Dec. 26, 2020

### Keywords:

Phosphorus

Sefidrood River

HEC-RAS

Numerical Simulation

Eutrophication

**ABSTRACT:** Phosphorus is one of the vital nutrients for plants and algae growth. The low solubility of phosphorus compared to other nutrients has caused phosphorus to play a key role in algae growth and its often limiting nutrient in most freshwater. So that excessive phosphorus level in water can produce more algae that cannot be consumed by water body creatures and can cause eutrophication, water quality reduction and harmful condition for the aquatic ecosystem. Therefore, it is important to identify the main sources of entering into rivers, recognizing the mechanism of transport and its distribution as well as the conditions created in rivers due to the advection and diffusion of phosphorus. For this purpose, in this research, after identifying the main sources of phosphorus entry into the river, it investigates and simulates the advection and dispersion of phosphorus in the Qezel-Ozan, Shahrood and Sefidrood Rivers based on field measuring data and using HEC-RAS software. Five scenarios were designed based on statistics and engineering studies to predict the phosphorus concentration of rivers due to rising temperatures, changes in river discharge due to drought and wet season, human population growth and development of irrigation networks in the region for the future. Then, by numerical simulating using HEC-RAS software, the impacts of phosphorus dispersion have been investigated in the region research area. The result presented that controlling human activities that entering phosphorus to Qezel-Ozan and Shahrood rivers can reduce total phosphorus concentration of Sefidrood river, but the mass of algae has been increased only by increasing air temperature and discharge of rivers and decreasing by reduced river discharge. Besides, the results showed that the maximum total phosphorus concentration of Sefidrood River (downstream river) predicted by the numerical simulation related to the developed scenarios was higher than the maximum desired total phosphorus concentration for warm and cold-water fish. For this reason, paying more attention to limit entering phosphorus sources have to be considered for development program in the upstream rivers (Shahrood and Qezel-Ozan) in the region.

### 1- Introduction

Rivers are one of the main sources of drinking, agricultural and industrial water supply in the present century due to factors such as; Overgrowth of population, human intervention in the environment, increase in demand for food, development of industries and agricultural products have undergone changes water quality [1]. The excessive entry of pollutants into rivers has adverse effects on aquatic ecosystems and river water quality. Today, one of the most water quality issues in the river environment is eutrophication [2].

Phosphorus is a key nutrient in the growth of aquatic plants, algae and many microorganisms and is a vital element in producing energy from sunlight that can be used by plants [3]. The uncontrolled increase in the concentration of phosphorus compounds is directly related to the occurrence of eutrophication in rivers. Many researchers

involve to study of advection and diffusion of nutrients, phosphorus compounds in rivers and their accumulation in dam reservoirs by measuring, analytical and numerical modeling [4-7].

The present study investigates the advection and diffusion phenomena of phosphorus in the Sefidrood River and its upper tributaries (Qezel-Ozan and Shahrood) in existing conditions and future development using numerical tools. Besides, environmental issues of excessive entry of phosphorus on alga and other biological indicators are discussed.

### 2- The attitudes of the study area

Sefidrood Bozorg catchment in the general hydrological division of Iran is part of the Caspian Sea catchment and is located at the confluence of the Alborz, Zagros and Markazi mountains ranges. The area of this basin is equal to 59196 square kilometers, of which 75.4% are mountainous areas

\*Corresponding author's email: sh\_faghihrad@yahoo.com



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>.

and 24.6% are plains and foothills. Parts of 11 provinces of the country are located within the Sefidrood Bozorg catchment.

According to studies conducted in 2005-2006, the main sources of phosphorus production in this basin contain wastewater from aquaculture, agriculture (rainfed and irrigated), wastes from urban and rural population centers, livestock activities and industrial slaughterhouses leachate. The studies determine the proportion of activities on entry phosphorous load to Sefidrood, Qezel-Ozan and Shahroud River, 37% for pasture, 22% for livestock and 14% for agriculture and population, respectively.

### 3- Governing Equations

The one-dimensional (1D) HEC-RAS water quality modeling capabilities have been used to support this research. Four water quality modules, including the water temperature simulation module, general constituent simulation module (GCSM), and nutrient simulation modules (NSMI and NSMII), have been integrated into HEC-RAS. NSMI simulates aquatic algae, nutrient cycles, DO, CBOD with simplified processes and minimum state variables. The constituent transport model included in 1-D HEC-RAS is based on an advection and dispersion equation with additional terms to account for inflow boundary and kinetics [8]:

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

where

- v = volume of the water quality cell (m3)
- φ = concentration of a constituent (kg/m3)
- Γ = dispersion coefficient (m2/s)
- S = sink or source (kg/s)

For reasons of accuracy, efficiency, and stability, the QUICKEST-ULTIMATE explicit numerical scheme has been implemented for solving Equation 1. The selection of the time step within the transport model must satisfy Courant and Peclet constraints.

### 4- Results and Discussion

First, simulation of phosphorus advection and diffusion in these three rivers (Qezel-Ozan, Shahroud and Sefidrood) in a 30-day period from 12 July 2005 to 12 August 2005 was carried out by the numerical model and the results were compared with field measuring at the same time. The results of the mathematical model had good accuracy. Then, the scenario development process was designed based on statistics and engineering studies to predict the phosphorus concentration of rivers due to rising temperatures, changes in river discharge due to drought and wet season, human population growth and development of irrigation networks for the future in 2040.

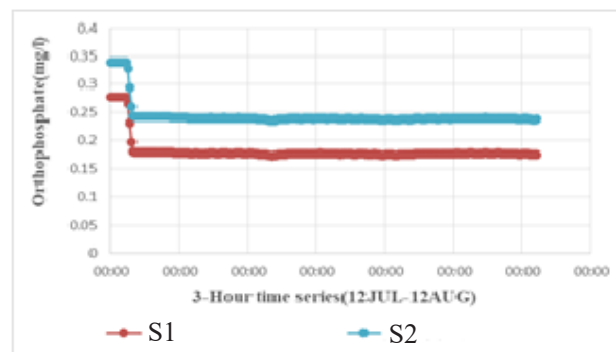
Results show that the increase of 1°C average temperature of Sefidrood catchment in the scenario has caused a slight decrease in the average orthophosphate concentration of Sefidrood River compared to its average orthophosphate concentration in the base scenario (12 July to 12 August 2005). Besides, the average orthophosphate concentration of the Sefidrood River is significantly affected by the amount of phosphorus entering its upstream rivers, especially the Qezel-Ozan River.

Also, numerical results present that the increase and decrease of discharge of Qezel Ozan and Shahroud rivers; are directly related to the concentration of algae mass in the Sefidrood River. According to the results obtained from development scenarios of phosphorus advection and diffusion in the Sefidrood River for the future (in the year 2040), the most effective way to control the concentration of phosphorus in the Sefidrood River is the reduction of phosphorus entry sources from the upstream rivers (Qezel-Ozan and Shahroud). Then, a scenario called ideal scenario has been designed based on decreasing the amount of phosphorus into upper tributaries (Qezel-Ozan -58%, and Shahroud, -16%) via implementing more wastewater treatment plant in urban and rural area, reducing chemical fertilizers and control aquaculture in catchments. Figure 1 shows the result belongs to the ideal scenario.

As can be seen from figure 1, by controlling the amount of phosphorus entering the Qezel-Ozan and Shahroud rivers considered in the ideal scenario of this research, the orthophosphate concentration of the Sefidrood river will be reduced by 18% compared to the orthophosphate concentration of the witness scenario (condition in the year 2005).

### 5- Conclusion

Sefidrood River and upstream tributaries (Qezel-Ozan and Shahroud Rivers) are one of the main sources of water supply for human communities and fauna in the Sefidrood watershed and also the habitat of various aquatic species, but the influx of nutrients, especially phosphorus, into these



S1: PO4 in Sefidrood River for 2040-Ideal Scenario  
S2: PO4 in Sefidrood River for 2005-Witness Scenario

Fig. 1. An example of a figure

rivers can reduce the quality of the river. The purpose of this research is to investigate the direct and indirect effects of phosphorus inflow from the Sefidrood River and tributaries to the Sefidrood dam reservoir.

The results based on the different scenarios in - showed that:

- With decreasing phosphorus entering rivers, increasing air temperature and raising flow discharge by 30%, less dissolved inorganic orthophosphate (mg/l) will remain in rivers and Qezel-Ozan, Shahroud and Sefidrood rivers will meet better quality.

- The maximum phosphorus concentration of Sefidrood River obtained from the simulation results related to the scenario of the year 2005 and the simulation results related to future development was higher than the maximum desired phosphorus concentration for warm and cold-water fish.

- The mitigation and control measures for reducing phosphorus sources into rivers needed in the catchment implementing new wastewater treatment plants in the population area, decreasing consuming chemical fertilizer and restricting excessive growth of aquaculture could be considered for and development program in the area.

- The maximum calculated concentration of phosphorus in the Sefidrood River was higher than the amount required creating nutritional conditions in all scenarios.

## References

- [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] S. Isazadeh, M. Tajrishi, A. Abrishamchi, M. Ahmadi, Application of Phosphorus Simulation Models to Latian Reservoir, *Water and Wastewater*, 16(2 (54)) (2005).
- [5] 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).
- [6] 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)
- [7] H. Bakhshi, Simulation Nitrogen Dispersion in River Case-study: Sefidrood River, Amirkabir University of Tehran, 2018. (In Persian)
- [8] J.A. Moore, M.J. Gamroth, Calculating the Fertilizer Value of Manure from Livestock Operations, (1991).

### HOW TO CITE THIS ARTICLE

Sh. Faghihirad , 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) 1123-1126.*

DOI: 10.22060/ceej.2020.18745.6947







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

شروین فقیهی‌راد<sup>۱\*</sup>، مهسا خدایاری<sup>۲</sup>، فواد کیلانه ئی<sup>۲</sup>

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.

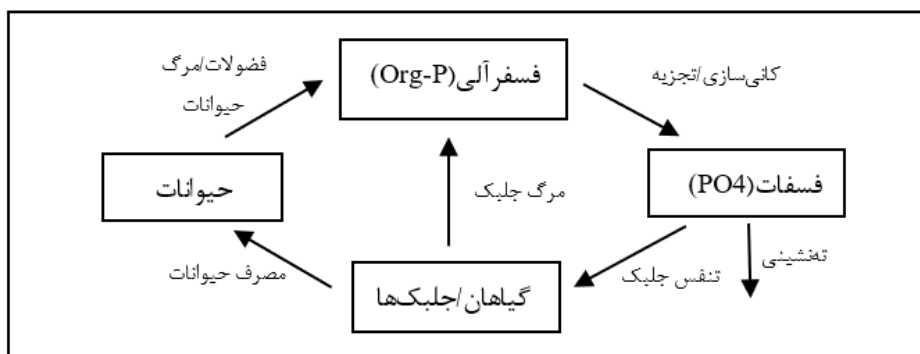
ترکیبات فسفر از انحلال‌پذیری کمی در آب برخوردار هستند و بیشتر تمایل به اتصال به ذرات رسوب و جامدات معلق در آب را دارند و این انحلال‌پذیری اندک فسفر نسبت به نیتروژن موجب شده است که ترکیبات فسفر به عنوان ماده دور از دسترس برای گیاهان آبی و جلبک‌ها و عامل محدود کننده رشد آن‌ها در بیشتر آب‌های شیرین شناخته 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<sup>۱</sup> 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<sup>۱</sup>، فنتیون<sup>۲</sup> و دیازینون<sup>۳</sup> را نام برد. مالاتیون یکی از حشره کش‌های پر مصرف در ایران است، که از طریق مهار آنزیم استیل کولین استراز<sup>۴</sup> 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) هوازگی کانی‌های آپاتیت‌دار<sup>۵</sup> 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 تصفیه کننده‌های 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 حشره کش‌های فسفره می‌توان

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

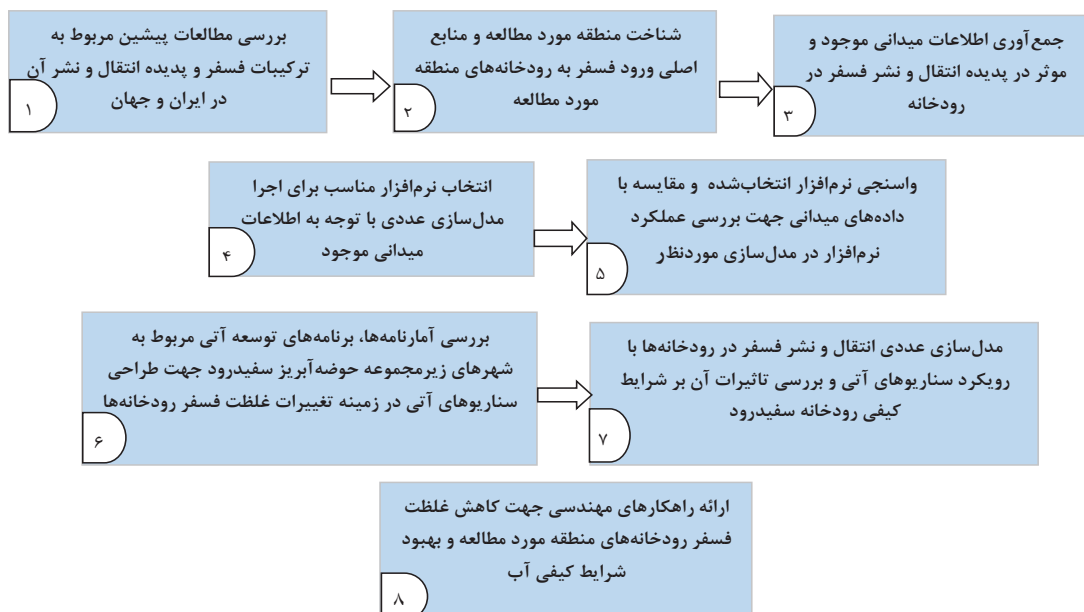


آمارى و اندازه‌گیرى شده کیفیت آب از ۴ ایستگاه در طول رودخانه چالوس و استانداردهای موجود، کیفیت آب این رودخانه را از دیدگاه غلظت ترکیبات فسفر و نیتروژن بررسی نموده‌اند و با به کارگیری اطلاعات آماری موجود و نرم‌افزار بررسی کیفیت آب QUAL2K، مدل خودپالایی رودخانه را در دو فصل کم‌آب و پرآب ایجاد کرده‌اند [۸]. بدرزاده و همکارانش در سال ۱۳۹۵، به بررسی تاثیر زهاب کشاورزی بر پارامترهای کیفیت رودخانه ارس با استفاده از مدل عددی MIKE11، پرداختند. هدف این پژوهش، بررسی تاثیر زهاب‌های کشاورزی دارای کودهای نیتراته و فسفات متداول و مورد استفاده در اراضی زراعی منطقه، بر کیفیت آب رودخانه بود [۹]. میرمشتاقی و همکاران در سال ۱۳۹۰، مرودوست و همکاران در سال ۱۳۹۴، هر یک با نمونه‌برداری میدانی از آب رودخانه سفیدرود در فواصل طولی مشخص و بررسی‌های آزمایشگاهی به مقایسه پارامترهای کیفیت آب رودخانه سفیدرود با استانداردهای جهانی پرداخته‌اند. در سال ۱۳۹۶، هادی بخشی با به کارگیری نرم‌افزار HEC-RAS مکانیزم انتقال و پخش نیتروژن در رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود (بالادست سد سفیدرود) بررسی نموده است و با اجرای سناریوهایی فرضی در محیط نرم‌افزار HEC-RAS، شرایط کیفی ایجاد شده برای رودخانه سفیدرود ناشی از افزایش غلظت ۱/۵ و ۲ برابری ترکیبات نیتروژن در رودخانه‌های بالادست (قزل‌اوزن و شاهرود) را بررسی کرده است [۱۰].

پژوهش حاضر با در نظر داشتن واقعیت‌ها و شناخت عوامل مهم و تاثیرگذار در ورود و نشر فسفر در رودخانه سفیدرود و سرشاخه‌های آن (قزل‌اوزن و شاهرود) و با به کارگیری ابزار عددی، سعی در شبیه‌سازی فرآیند ورود آلاینده فسفر به رودخانه از منابع اصلی این آلاینده و بررسی پخش آن در رودخانه‌های مذکور را دارد. از اهداف مهم این پژوهش می‌توان شناخت منابع مهم آلاینده فسفر در محدوده مطالعه، عوامل مهم تاثیرگذار بر آلاینده فسفر و بررسی اثرات متقابل آن بر محیط، شبیه‌سازی پخش فسفر در رودخانه سفیدرود و بررسی تاثیر توسعه آبی بر موضوع فسفر ورودی به رودخانه در محدوده مورد مطالعه را نام برد. این مطالعات در نهایت نشان داد که کنترل پساب‌های خانگی، کشاورزی و دامداری علی‌الخصوص دامداری سنتی و توجه به شرایط محیط زیستی در طرح‌های توسعه‌ای، می‌تواند غلظت ترکیبات فسفر را در داخل رودخانه‌های حوضه آبریز سفیدرود بزرگ در سطح مطلوبی کاهش دهد.

فسفات محلول اولین شکل از ترکیبات فسفر است که به صورت مستقیم مورد استفاده جلبک‌ها قرار می‌گیرد. او همچنین در کتاب خود اشاره نمود که فسفات‌ها خود به سه دسته اورتوفسفات، متافسفات و ارگانوفسفات تقسیم می‌شوند که اورتوفسفات‌ها (PO4) شکل عمده فسفات‌ها هستند [۳]. در سال ۲۰۰۴، واداس و همکارانش، به بررسی رابطه بین خاک فسفردار و فسفر محلول در رواناب جهت تخمین ضریب استخراج فسفر از هر نوع خاک به داخل رواناب و انعکاس آن به مدل‌های ریاضی پرداختند و در این مسیر ۳۱ نوع خاک را تحت شرایط آزمایشگاهی مورد بررسی قرار دادند، نتایج این پژوهش نشان داد میزان جذب فسفر از خاک اشیاع شده از فسفر توسط رواناب در انواع مختلف خاک (به جز خاک آهکی) یکسان بوده و می‌توان از ضریب استخراجی ثابت در مدل‌های کیفیت آب برای تخمین تقریبی فسفر محلول رها شده از خاک به داخل رواناب استفاده نمود [۵]. در سال ۲۰۰۷، جیمز و همکارانش جهت برآورد بار مواد مغذی و ایجاد یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری برای ارزیابی ریسک جاری شدن رواناب دارای مواد مغذی، شناسایی منابع مواد مغذی بحرانی (CSA<sup>۱</sup>) و مناطق حساس هیدرولوژی (HSA<sup>۲</sup>) و دارای پتانسیل تشکیل رواناب، از دو نرم‌افزار SWAT<sup>۳</sup> و GSSHA<sup>۴</sup> به طور همزمان استفاده نمودند. هدف مدل‌سازی صورت گرفته توسط این محققان، انجام شبیه‌سازی مبتنی بر شبکه توزیع<sup>۵</sup> و ارزیابی کمی سهم فسفر موجود در رواناب به صورت سلول به سلول در حوضه‌های آبریز بوده است [۶]. در سال ۲۰۱۸، ژانگ و همکارانش مدل کیفیت آب رودخانه مینه‌سوتا را با کمک داده‌های میدانی موجود ساختند، هدف از این مدل‌سازی و انسجی نرم‌افزار HEC-RAS بوده است و در نهایت مقایسه نتایج شبیه‌سازی با داده‌های میدانی دقت مناسب این نرم‌افزار در شبیه‌سازی کیفیت آب را نشان داد [۲]. در ایران نیز محققان بسیاری در زمینه انتقال و نشر مواد مغذی، ترکیبات فسفر در رودخانه‌ها و انباشت آن‌ها در مخازن سدها به روش‌های میدانی، تئوریک و به کارگیری نرم‌افزارهای تحلیل کیفیت آب پرداخته‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش عیسی‌زاده و همکارانش در سال ۱۳۸۳ بر روی مخزن سد لتیان اشاره نمود که به بررسی غلظت فسفر مخزن سد به کمک مدل تئوری اسندگرس-املیا<sup>۶</sup> پرداختند [۷]. میرباقری و همکاران در سال ۱۳۸۷ با مقایسه داده‌های

- 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



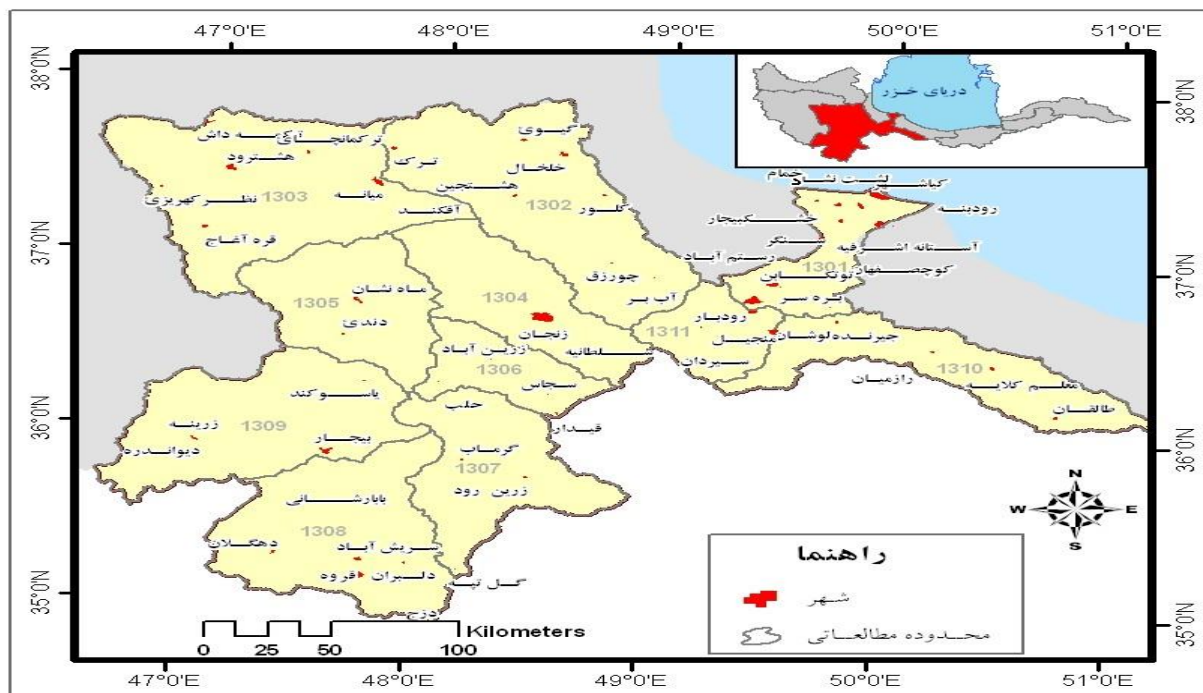


Fig. 4. The 11 Study Areas of the Great Sefidrood Catchment

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 تاثیرات 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<sup>۱</sup>، 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<sup>۲</sup> 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 ( $m^3$ )،  $\phi$  غلظت ( $kg/m^3$ )،  $Q$  دبی جریان ( $m^3/s$ )،  $\Gamma$  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 ( $kg/m^3/s$ )،  $\phi_i^{n+1}$  غلظت در نقطه مرکزی سلول (i) در زمان کنونی (n+1) ( $kg/m^3$ )،  $\phi_i^n$  غلظت در نقطه مرکزی سلول (i) در گام زمانی قبلی (n) ( $kg/m^3$ )،  $\phi_{i-2}^n$  غلظت در نقطه بالادست به اندازه دو گام مکانی (i-2) در زمان قبلی (n) ( $kg/m^3$ )،  $\phi_{i-1}^n$  غلظت در نقطه بالادستی (i-1) و در زمان قبلی (n) ( $kg/m^3$ )،  $\phi_{i+1}^n$  غلظت در نقطه پایین دستی (i+1) و در زمان قبلی (n) ( $kg/m^3$ ) است. طبق روش آنالیز پایداری آقای فن نیومن<sup>۴</sup>، پایداری روش QUICKSET-ULTIMATE، در گرو برقراری دو شرط کورانت<sup>۵</sup> (رابطه ۳) و پکلت<sup>۶</sup> (رابطه ۴) به صورت روابط ذیل است [۱۲]:

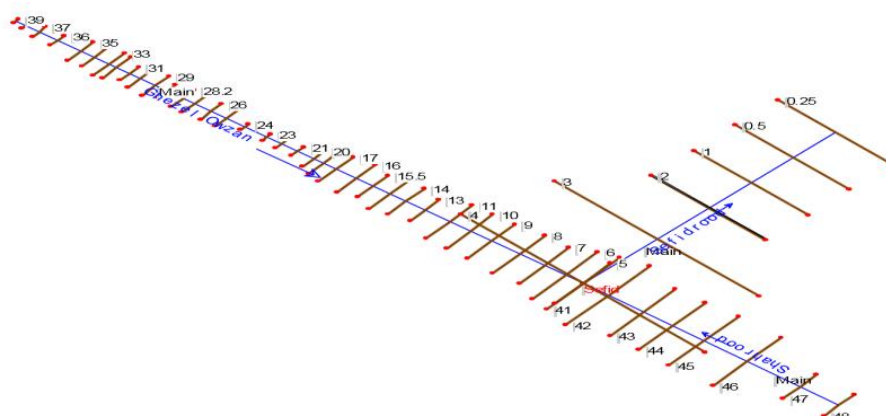
$$c = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 0/9 \quad (3)$$

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

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 ( $\text{org-N}$ )  $(\text{N}, \text{NH}_4\text{-N}, \text{NO}_2\text{-N}, \text{NO}_3\text{-N})$ ، 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 (m<sup>3</sup>/s)

Table 1. Discharge (m<sup>3</sup>/s) of Qezel Ozan and Shahroud Rivers in the Months of 2005

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

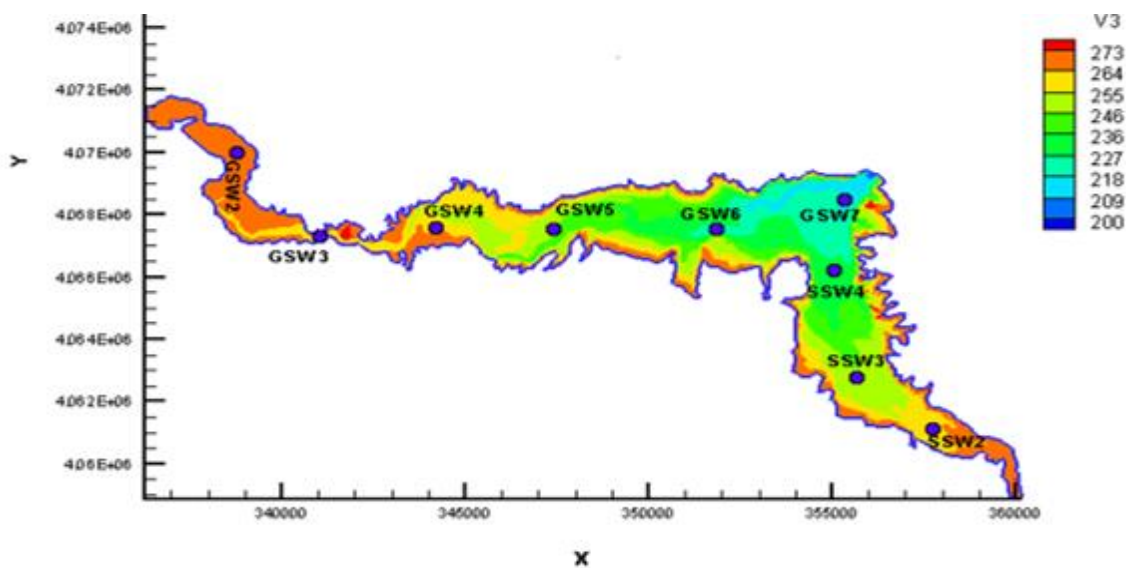


Fig. 6. Map of Sampling Stations Implementing by Water Research Institute

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<sup>۱</sup>، عرضی<sup>۲</sup> 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 <sub>4</sub> (mg/l)			دمای آب (C°)			پارامتر
سفیروود	شاهرود	قزل اوزن	سفیروود	شاهرود	قزل اوزن	سفیروود	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 سفیروود 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 (PO<sub>4</sub>)، 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 سفیروود 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 سفیروود، 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، سفیروود برخوردار است.

قائم<sup>۱</sup> 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 اعدادی 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 (m<sup>2</sup>/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 سناریوها 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/m<sup>3</sup> 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)	درصد تغییر فسفر		
				سه	چهار	پنج
۱۳۰۹ الی ۱۳۰۲ (قزل‌اوزن)	۷۱۶۶/۳۲	۸۰۹۰/۵۲۰	۸۳۸۸/۷۳۳	۱۳٪	۱۷٪	-۱۱٪
۱۳۱۱ و ۱۳۱۰ (شاهرود)	۵۳۳/۵۱	۵۶۱/۸۵	۶۲۶/۶۷	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 <sub>4</sub>
سناریو چهار	SE4	سناریو دو-کاهش دبی	SE2-1	جلبک محلول	Algae
سناریو پنج	SE5	سناریو دو-افزایش دبی	SE2-2	سناریو شاهد	SE SHAHED

سازیه‌ها در نظر گرفته شده است.

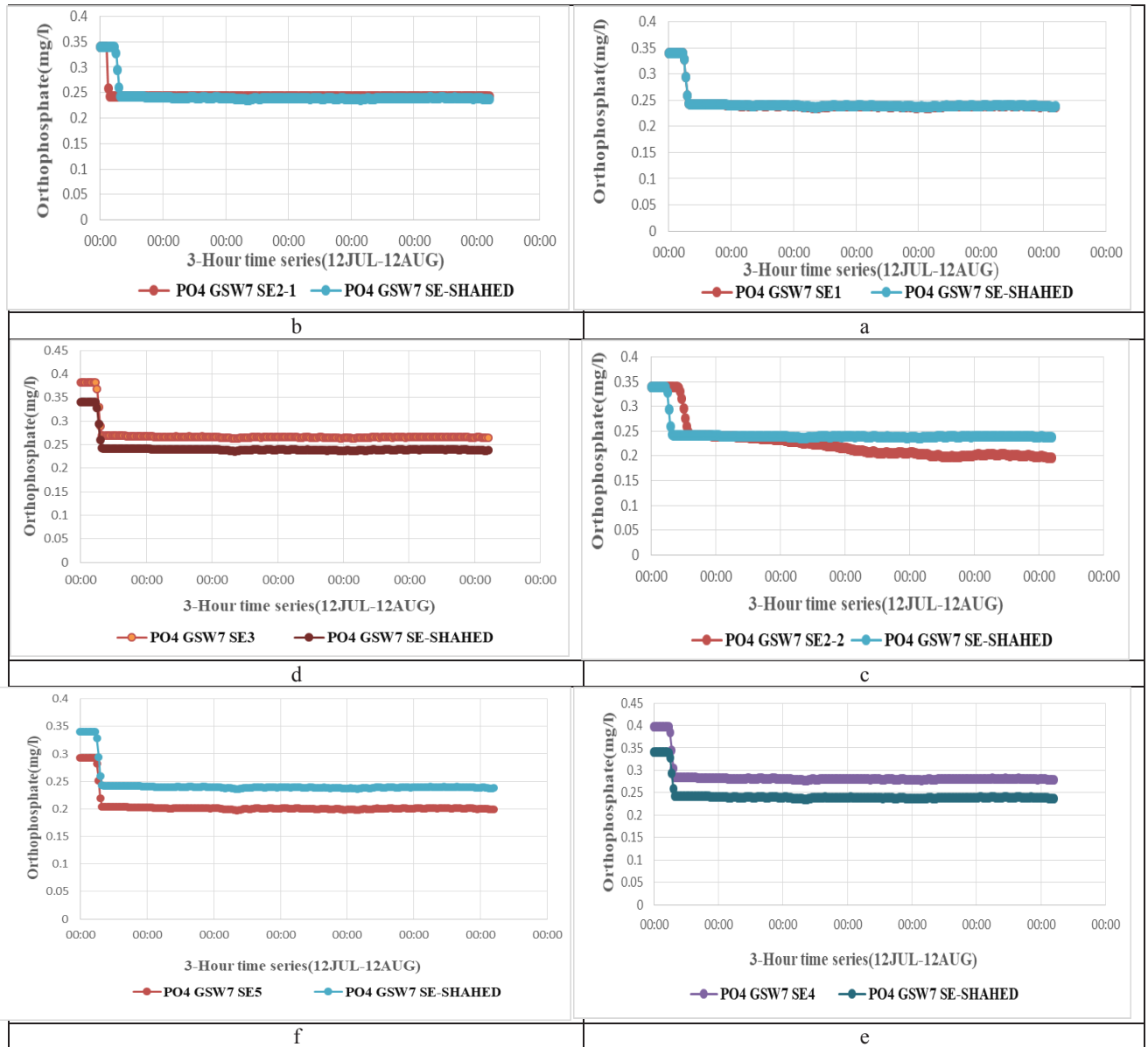
۵- ارائه نتایج

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 ۱ C° متوسط دمای هوای حوضه آبریز سفیدرود در سناریویک، موجب کاهش اندک متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به متوسط غلظت اورتوفسفات آن در سناریو شاهد شده است. کاهش ۳۰٪ دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سناریو دو موجب افزایش اندک غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود نسبت به نتایج سناریو شاهد شده است. همچنین افزایش ۳۰٪ دبی رودخانه‌های قزل‌اوزن و شاهرود در سناریو دو موجب کاهش ۵/۰ 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 ۱۲٪ غلظت اورتوفسفات در مرز بالادست رودخانه قزل‌اوزن و ۵٪ آن در

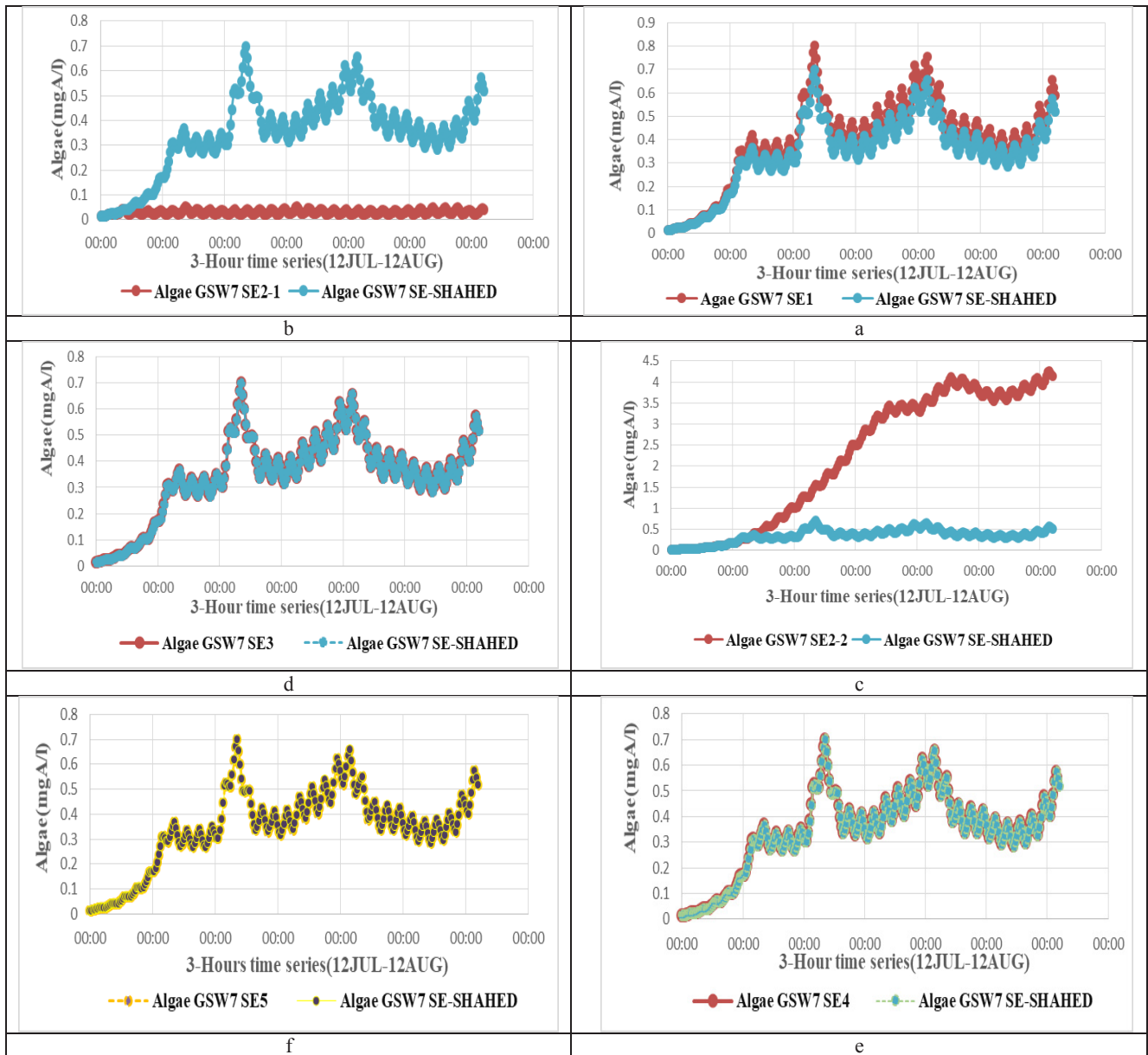
رودخانه شاهرود ناشی از افزایش فسفر ورودی به رودخانه‌ها با رویکرد سناریو سه، موجب افزایش ۱۲٪ متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه سفیدرود شده است. افزایش ۱۷٪ متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه قزل‌اوزن و شاهرود (سناریو چهار) موجب افزایش ۱۷٪ متوسط غلظت فسفر رودخانه سفیدرود و کاهش ۱۱٪ متوسط غلظت اورتوفسفات رودخانه قزل‌اوزن و ۲۴٪ آن در رودخانه شاهرود ناشی (سناریو پنج) موجب کاهش ۱۲٪ 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 ۱ 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)

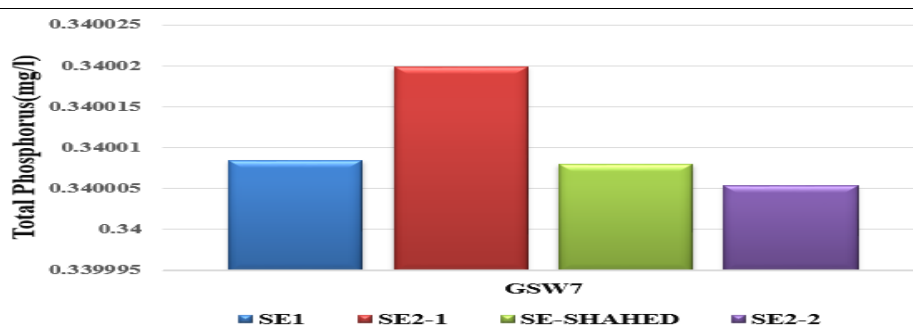
Fig. 7. Series of Diagrams of Orthophosphate Concentration (mg / l) for the Station (GSW7) of Sefidrood River for Scenarios One to Five (Year 2040) and Comparison with Witness Scenario (Year 2005)



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

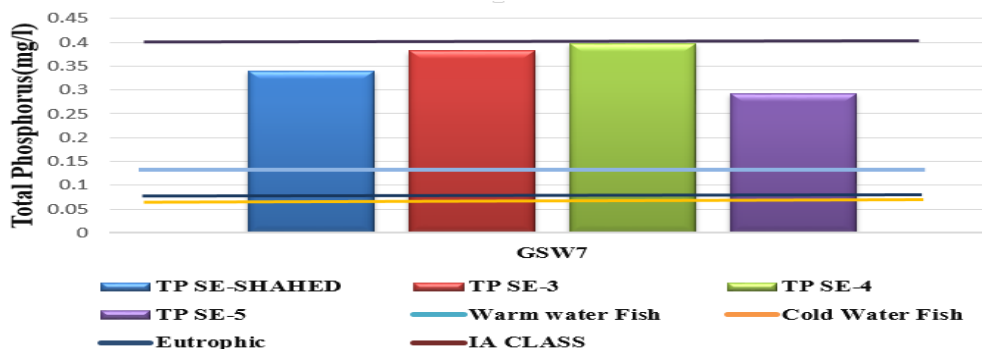
سفيدرود به خود اختصاص داده و پس از آن ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي فسفر كمترين مقدار نسبت به ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي نيتروژن را دارد، بنابر اين در رودخانه سفيدرود به دليل غلظت بالاي فسفر و نيتروژن هم در سال پايه مطالعات و هم در سال افق طرح، نور نقش محدود كندگي رشد توده زنده جلبك را بر عهده دارد. پس از نور، از بين مواد مغذي محدود كنده رشد توده زنده جلبك، اورتوفسفات (تنها ماده غيرآلي فسفر) به دليل داشتن غلظتي كمتر از غلظت تركيبات نيتروژن غيرآلي به عنوان كمترين ماده در دسترس جلبك در رودخانه سفيدرود شناخته شد.

با بررسي سري نمودارهاي شكل‌هاي ۷ و ۸ (a,b,c)، مي‌توان نتيجه گرفت كه تغييرات دما و حجم آب ورودی به رودخانه سفيدرود با فرض عدم ورود فسفر از منابع خارجي، تاثير چنداني در افزايش و يا کاهش غلظت اورتوفسفات اين رودخانه نداشته اما در مقابل غلظت توده زنده جلبك تغيير کرده است. اين موضوع نشان دهنده اين است كه تغييرات دمائي و افزايش-كاهش دبي تنها بر پارامترهاي منبع و مصرف جلبك تاثير گذاشته و با تغيير در شرايط مطلوب براي رشد جلبك موجب افزايش جمعيت جلبك‌ها (فيتوپلانكتون‌ها) و يا کاهش آن مي‌شوند و مقدار فسفر كل محلول (اورتوفسفات+ فسفر آلي) به دست آمده از نتايج شبیه‌سازی سناریو یک و دو مطابق با شکل ۹، تغيير ناچيزی نسبت به مقدار فسفر کل سناریو شاهد داشته و چرخه داخلي فسفر در تعادل است.

همچنين بررسي سري نمودارهاي (d و e و f) شكل ۷ و ۸ نشان داده است كه تغيير در مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌هاي قزل‌اوزن و شاهرود ناشی از عوامل انساني تنها عامل تغيير غلظت اورتوفسفات رودخانه سفيدرود

برای رشد آن‌ها است و بالعكس کاهش ارتفاع آب و افزايش سرعت جريان شرايط نامطلوبي براي رشد آن‌ها به حساب مي‌آيد. حال آن كه بررسي مدل هيدروليكي سناریو دو، نشان داده است كه به دليل حاكميت رژيم جريان زير بحرانی در طول رودخانه سفيدرود در محدوده پشت سد سفيدرود، کاهش ۳۰٪ دبي باعث کاهش ارتفاع آب رودخانه و افزايش سرعت آن و افزايش دبي ۳۰٪ موجب افزايش ارتفاع آب و کاهش سرعت جريان رودخانه شده است.

بررسي شكل‌هاي (d-۷)، (e-۷)، (f-۷) مربوط به نمودارهاي سري زماني سه ساعته غلظت توده زنده جلبك در دوره ۳۰ روزه ۱۲ جولای تا ۱۲ آگوست سال (۲۰۴۰ ميلادي)-(۱۴۲۰ شمسي)، به دست آمده از نتايج شبیه‌سازی سناریوهای سه، چهار و پنج نشان داده است كه، غلظت توده زنده جلبك رودخانه سفيدرود در اثر تغيير در مقدار فسفر ورودی به رودخانه‌هاي قزل‌اوزن و شاهرود نسبت به سناریو شاهد تغييری نداشته است و اين موضوع نشان دهنده اين است كه غلظت اورتوفسفات رودخانه سفيدرود هم در سال پايه مطالعات (تير ۱۳۸۴ لغايت تير ۱۳۸۴) و هم در سال افق طرح (۱۴۲۰ شمسي) از مقدار كافي براي رشد جلبك بيشتري بوده و اين ماده ديگر نقش عامل محدود كنده رشد جلبك را ايفا نمي‌كند. جهت اثبات اين مدعا، ضريب محدوديت نور (FL)، ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي فسفر (FP) و ضريب محدوديت تركيبات غيرآلي نيتروژن (FN) در محدوده رودخانه سفيدرود از سري نتايج خروجی نرم‌افزار HEC-RAS مربوط به شبیه‌سازی سناریوهای سه، چهار، پنج و شاهد برداشت شده و با يكدیگر مقايسه شد كه 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<sup>۴</sup> 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)<sup>۲</sup> 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<sup>۳</sup> 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

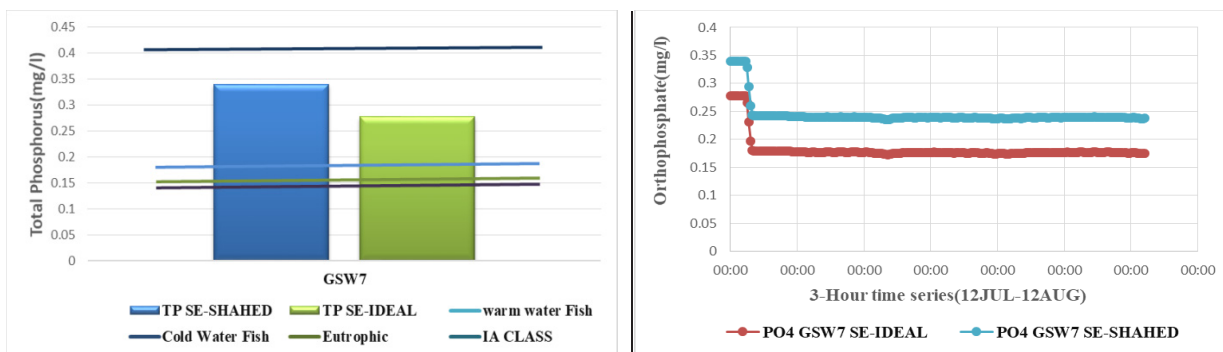
سناریو شاهد کاهش خواهد یافت اما همچنان غلظت فسفر کل محلول از مقدار فسفر کل مطلوب برای حیات ماهی‌های گرم آبی و سرد آبی و فسفر کل مناسب برای وقوع پدیده تغذیه‌گرایی بیشتر بوده و کنترل غلظت فسفر کل این رودخانه نیازمند مطالعات بیشتر و دقیق‌تر و اجرای برنامه‌هایی با رویکرد جلوگیری از ورود فسفر بیش از حد به 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  $1^{\circ}\text{C}$  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 <sup>3</sup> /s)
V	حجم سلول کیفیت آب، (m <sup>3</sup> )
A	مساحت سطح سلول کیفیت آب، (m <sup>2</sup> )
S	نرخ منبع-مصرف مواد مغذی/دما، (kg/s)
t	زمان، (s)
x	مکان، (m)
u	سرعت جریان، (m/s)
D	ضریب پخشیدگی، (m <sup>2</sup> /s)
m	ضریب ثابت
w	عرض متوسط کانال، (m)
u*	سرعت برشی، (m/s)

### علائم یونانی

Γ	ضریب پخشیدگی، (m <sup>2</sup> /s)
φ	غلظت، (mg/l)(kg/m <sup>3</sup> )
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

