

## راهکارهای حوضه‌ای و دریاچه‌ای بهبود کیفیت آب مخازن سدها (مطالعه موردی: سد شیرین دره)

حسن ساقی<sup>۱\*</sup>، ابراهیم خواجه پور<sup>۲</sup>، لیلا کریمی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۱۹ تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۴/۱۳

<sup>۱</sup> استادیار گروه عمران- دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد عمران- دانشگاه رازی کرمانشاه، ایران

<sup>۳</sup> کارشناس ارشد عمران- محیط زیست و کارشناس شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ایران

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [h.saghi@hsu.ac.ir](mailto:h.saghi@hsu.ac.ir)

### چکیده

در این مطالعه، مدل دوبعدی متوسط‌گیری شده در عرض CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی ترازسطح آب، دما و پارامترهای کیفی آب مخزن سد شیرین دره در یک دوره زمانی یازده ماهه و در سال آبی ۹۱-۱۳۹۰ مورد استفاده قرار گرفته است. بدین منظور ابتدا مدل واسنجی و معتبرسازی شد. سپس، کیفیت آب مخزن در حالت‌های مختلف کاهش میزان فسفر ورودی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، تأثیر میزان غلظت اکسیژن محلول زیرلایه بر بهبود کیفیت آب مخزن مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نمونه برداری و شبیه‌سازی، کاهش شدید میزان اکسیژن محلول در زیرلایه در دوران لایه‌بندی و افزایش غلظت فسفر و یوتروفیک شدن دریاچه را در پایان دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همچنین نتایج نشان می‌دهد، افزایش غلظت اکسیژن زیرلایه، باعث کاهش میزان آزادسازی فسفر و بهبود کیفیت آب مخزن می‌شود. به‌عنوان مثال، با کاهش ۶۰ تا ۷۰ درصدی میزان فسفر ورودی به مخزن، شرایط مخزن از یوتروفیک به مزوتروفیک تغییر وضعیت می‌دهد. علاوه بر این، در شرایط عادی، میزان غلظت فسفر در مخزن به ۵۰ میلی‌گرم در لیتر رسیده که با به‌کارگیری دستگاه اکسیژن‌دهی، این میزان به ۲۵ میلی‌گرم در لیتر کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: پارامترهای شیمیایی آب، پارامترهای فیزیکی آب، تغذیه‌گرایی، کاهش بار فسفر، مدل دوبعدی

## Basin and Reservoir Water Quality Improvement Methods of Dams (Case study: Shirin Darreh Dam)

H Saghi<sup>\*1</sup>, E Khajepour<sup>2</sup>, L Karimi<sup>3</sup>

Received: 20 January 2015 Accepted: 3 July 2016

<sup>1</sup>Assist. Prof., Department of Civil Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran

<sup>2</sup>Master of Science of Civil Engineering, Razi University of Kermanshah, Iran.

<sup>3</sup>Master of Science in Civil and Environmental Engineering, Toosab Consulting Company, Iran.

\*Corresponding Author, E-mail: h.saghi@hsu.ac.ir

### Abstract

In this study, a two-dimensional width averaged model "CE-QUAL-W2" has been used to simulate the water level, temperature and quality of Shirin Darreh Dam during a period of eleven months in years 2012-2013. In this way, the model was calibrated and validated. Then, the reservoir water quality was evaluated for different reduction of the amount of input phosphorus. Finally, the effect of increment of the sub layer oxygen concentration on water reservoir quality improvement was studied. Sampling and simulation results showed a sharp decline in the amount of dissolved oxygen in hypolimnion and an increase in the concentration of phosphorus in this region and so the eutrophic condition of the lake at the end of the simulation. The results also showed that increasing of the sub layer oxygen concentration reduced the amount of phosphorus release and improvement of water quality. For example, the reservoir conditions are changed from eutrophic to mesotrophic, when the amount of phosphorus entering the reservoir reduced 60-70 percent. Furthermore, the phosphorus concentration reached to 50 mg/lit in normal condition which it would be reduced to 25 mg/lit when Oxygenation device was applied.

**Keywords:** Chemical parameters of water, Eutrophication, Physical parameters of water, Reduction of phosphorus, Two-dimensional model

### مقدمه

این راستا، با تلفیق رویکردهای سازهای و غیرسازهای، مدلی برای بهینه‌سازی تراز و ظرفیت دریچه‌های مخزن سد ۱۵ خرداد ارایه شد (حیدری ژاله و همکاران ۱۳۸۷). در دهه‌های اخیر، با پیشرفت چشمگیر در زمینه رایانه از یک سو و از سوی دیگر، پیچیدگی روابط حاکم بین پارامترهای کیفی درون مخازن سدها، مدل‌های عددی بسیاری برای حل مسائل مربوط به کیفیت آب در مخازن ارائه شده‌است که از آن جمله می‌توان به مدل‌های WQRSS (وایلی و همکاران ۱۹۹۶)، WASP (آمبروز و همکاران ۱۹۸۷)، HEC-5Q (وایلی و همکاران ۱۹۹۶)، CE-QUAL-W2 (کول و ولز ۲۰۰۰) و ELCOM

اطلاع از نحوه تغییرات کیفیت آب در دوره‌ها و سال‌های مختلف از لحاظ وضعیت آبدی رودخانه، می‌تواند کمک زیادی در انتخاب بهترین تراز آبیگری و در نتیجه مدیریت کیفی آب نماید (خیامی و همکاران ۱۳۸۸). بررسی کیفی آب سدها، راهکار مناسبی در پیش‌بینی و جلوگیری از تخریب و زوال آب‌هایی است که با صرف هزینه‌های زیاد، تأمین و ذخیره شده‌اند (افشار و سعادت‌پور ۱۳۸۸). لذا، با آگاهی از شرایط کیفی آب در لایه‌های مختلف مخزن، می‌توان بهترین لایه را از لحاظ کیفی تشخیص و اقدام به آبیگری نمود. در

کاهش ۳۰ تا ۵۵ درصد بار فسفر می‌تواند وضعیت مخزن تی‌چای را از حالت مغذی به شاداب تغییر دهد. در این راستا، افشار و سعادت‌پور (۱۳۸۸) توسط این مدل، علاوه بر دما، پارامترهای ارتوفسفات، آمونیوم، نترات، کلروفیل *a* و اکسیژن محلول در مخزن سد کرخه را در اردیبهشت سال ۱۳۸۴ تا تیرماه سال ۱۳۸۵ شبیه‌سازی نمودند. نتایج به دست آمده نشان دهنده همخوانی نسبتاً مناسب نتایج حاصل از مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی است. در ادامه، آنها نقش تغییر در بار آلاینده‌های ورودی به سیستم را در پیش‌بینی رفتار سیستم مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان‌دهنده اهمیت بار فسفر در کنترل روند تغذیه‌گرایی در مخزن سد کرخه است. در ادامه، دیوگو و همکارانش (2008) تغییرات حرارت، فسفات و نترات در سد چند منظوره آلکوثوا در کشور پرتغال را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی نمودند. سپس با هدف ارزیابی استراتژی‌های کنترل مواد مغذی در حوضه این سد، سناریوهای ۹۰٪ کاهش آلودگی منابع شهری و ۱۰۰٪ کاهش کل آلودگی (منابع شهری و صنعتی) را بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان داد، تخلیه فاضلاب شهری سهم بیشتری از افت کیفیت آب را به خود اختصاص داده است. اما حتی با کاهش ۱۰۰٪ کاهش کل آلودگی‌ها، کیفیت آب مخزن از لحاظ مغذی بودن بهبود نیافته و در مرحله یوتروفیک باقی می‌ماند. از دیگر تحقیقات انجام گرفته می‌توان به تحقیقات انجام شده توسط ضیفی و همکارانش (۲۰۱۴) اشاره نمود. آنها مدل CE-QUAL-W2 را برای شبیه‌سازی پارامترهای کیفی شامل نترات، فسفات، کلروفیل *a* و نیز اکسیژن محلول در دریاچه پرسپا واقع در البانی در طی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ به کار بردند. درصد خطای میانگین در این شبیه‌سازی برای پارامترهای مذکور کمتر از ۱۰٪ بوده که نشان از شبیه‌سازی موفق مدل مذکور است.

مرور تحقیقات انجام گرفته نشان‌گر عملکرد مناسب مدل CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی کیفی آب در

(هوگز و دلیمر ۲۰۰۱) اشاره نمود. از طرفی، با توجه به هزینه نسبتاً ارزان استفاده از این مدل‌ها و قابلیت بالای آن‌ها در زمینه تشخیص، ارزیابی و پیش‌بینی شرایط کیفی آب مخزن در شرایط موجود و آینده، به عنوان یک روش مناسب و کارآمد برای مدیریت و حفظ کیفیت آب در مخازن در نقاط مختلف جهان به کار گرفته شده‌اند. در میان این مدل‌ها، مدل‌های دو بعدی متوسط‌گیری شده در عرض، به طور گسترده برای نشان دادن تغییرات هیدرودینامیک و کیفیت آب در طول و عمق مخازن سدها به کار گرفته شده‌است. در دهه گذشته، محققان زیادی از مدل CE-QUAL-W2 استفاده کرده‌اند که حکایت از کارایی مدل مذکور دارد (رضازاده و همکاران ۱۳۹۳). این مدل در سراسر جهان توجه زیادی را به خود اختصاص داده‌است (زو و همکاران ۲۰۰۷). به عنوان مثال، زو و همکارانش با تلفیق دو مدل CE-QUAL-W2 و AGNPS به پیش‌بینی رفتار مخازن پرداختند (زو و همکاران ۲۰۱۱). مخزن سد در دست احداث بختیاری نیز با این مدل مورد بررسی قرار گرفت (نظریها و همکاران ۱۳۸۹). افزون‌براین، ارتقای پیوسته مدل و وجود نسخه‌ها و ویرایش‌های مکرر آن، از دلایل دیگر علاقه محققان به استفاده از این مدل بوده است. در میان کاربردهای مختلف مدل مذکور، می‌توان به کار او و همکارانش (2004) جهت شبیه‌سازی حرارت و پارامترهای کیفی آب نظیر اکسیژن محلول، مواد مغذی و واسنجی کلروفیل *a* اشاره نمود. در این تحقیق، بعد از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، غلظت کلروفیل *a* تحت سناریوهای مختلف تخصیص بار آلاینده شبیه‌سازی شد. بر اساس نتایج به دست آمده، کاهش ۹۰٪ تخصیص بار آلاینده‌ها، وضعیت مخزن را از حالت مغذی به شاداب تغییر می‌دهد (وو و همکاران ۲۰۰۴). در ادامه، دکو و همکاران (2006)، مدل CE-QUAL-W2 را برای شبیه‌سازی حرارت، فسفر، آمونیوم، نترات، کلروفیل *a* و اکسیژن محلول در اثر کاهش بار مواد مغذی و در مخزن سد تی‌چای تایوان مورد استفاده قرار دادند. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان داد،

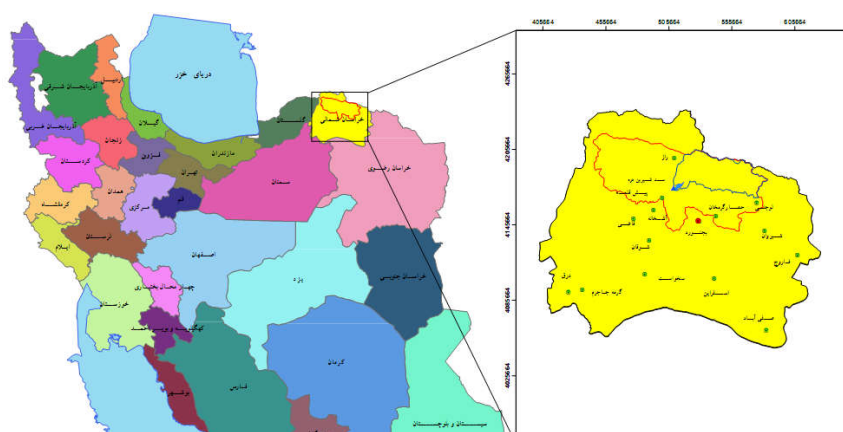
جغرافیایی  $6^{\circ} 31' 37''$  و در ۶۵ کیلومتری شهرستان بجنورد و انتهای حوضه آبریز شیرین‌دره قرار داشته و مساحت حوضه آبریز آن ۱۷۵۰ کیلومترمربع است. مطالعات این سد از سال ۱۳۷۵ شروع و در سال ۱۳۸۴ با هدف تأمین آب شرب شهر بجنورد و توسعه اراضی کشاورزی، به بهره‌برداری رسید. محدوده مورد مطالعه و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در مخزن سد شیرین‌دره در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.

مخازن سدها است. لذا در مطالعه حاضر، مدل مذکور جهت شبیه‌سازی روند تغییرات دما، تغذیه‌گرایی و پارامترهای کیفی آب شامل نیترات، اکسیژن محلول و فسفر موجود در مخزن سد شیرین‌دره به کار رفته و نتایج به دست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت.

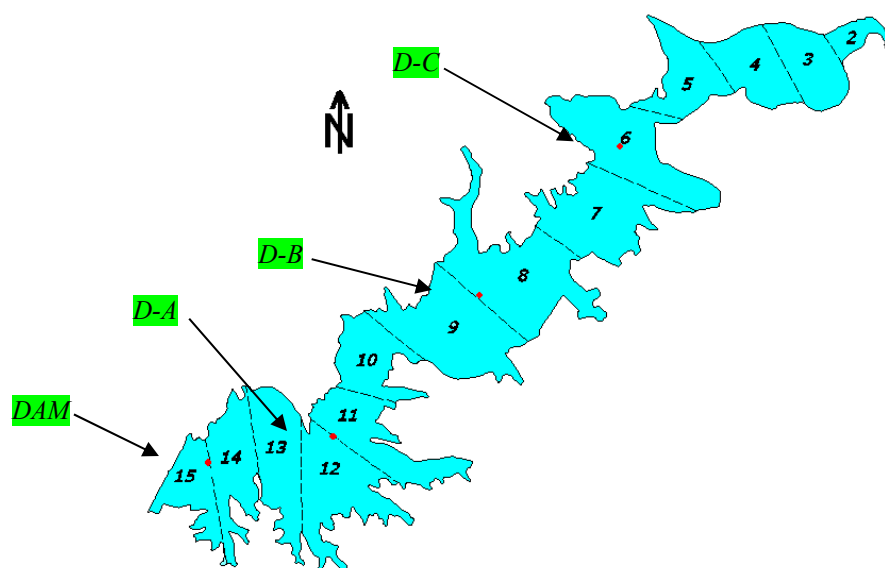
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی شیرین‌دره، سدی خاکی با هسته رسی است که در طول جغرافیایی  $28^{\circ} 6' 57''$  و عرض



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه (سد شیرین‌دره).



شکل ۲- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در مخزن سد شیرین‌دره.

زمانی آذر ۱۳۹۰ تا آبان ۱۳۹۱ برداشت شد. داده‌های ایستگاه هیدرومتری بربرقلعه به‌عنوان داده‌های ورودی

داده‌های کیفی حوضه آبریز و مخزن سد شیرین‌دره براساس برنامه پایش طراحی و در بازه

۵- افزایش فسفر ورودی به مخزن به میزان ۴۰٪ در هر سال نسبت به سال قبل. برای بررسی تأثیر افزایش اکسیژن محلول زیرلایه بر کاهش آزادسازی فسفر در مخزن سد، مدل‌سازی دستگاه اکسیژن‌دهی زیرلایه نیز در این مقاله مدنظر قرار گرفته و تأثیر افزایش غلظت اکسیژن محلول بر بهبود کیفیت آب مخزن مورد توجه قرار گرفت. نمودار توسعه مدل کیفی مخزن سد شیرین‌دره در مطالعه حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است.

#### معیارهای ارزیابی مدل

در مدل‌های شبیه‌سازی، برای مقایسه نتایج داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده، از پارامترهای آماری مختلفی استفاده می‌شود. در این تحقیق علاوه بر نمایش گرافیکی، از دو پارامتر آماری خطای میانگین مطلق ( $AME$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و مطابق روابط زیر استفاده شده است. خطای میانگین مطلق طبق توصیه راهنمای مدل، یکی از بهترین معیارهای خطا است. در واقع این پارامتر، مقدار متوسط خطاها را در مجموعه پیش‌بینی‌ها، بدون در نظر گرفتن جهت آنها اندازه‌گیری می‌کند. ریشه میانگین مربعات خطا نیز یکی دیگر از پارامترهای آماری است که در کارهای مشابه زیادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پارامتر، معیار مناسبی برای درک کارایی مدل به شمار می‌آید (محمدنژاد ۱۳۹۳).

$$AME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{i,pre} - X_{i,obs}) \quad [1]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{i,pre} - X_{i,obs})^2} \quad [2]$$

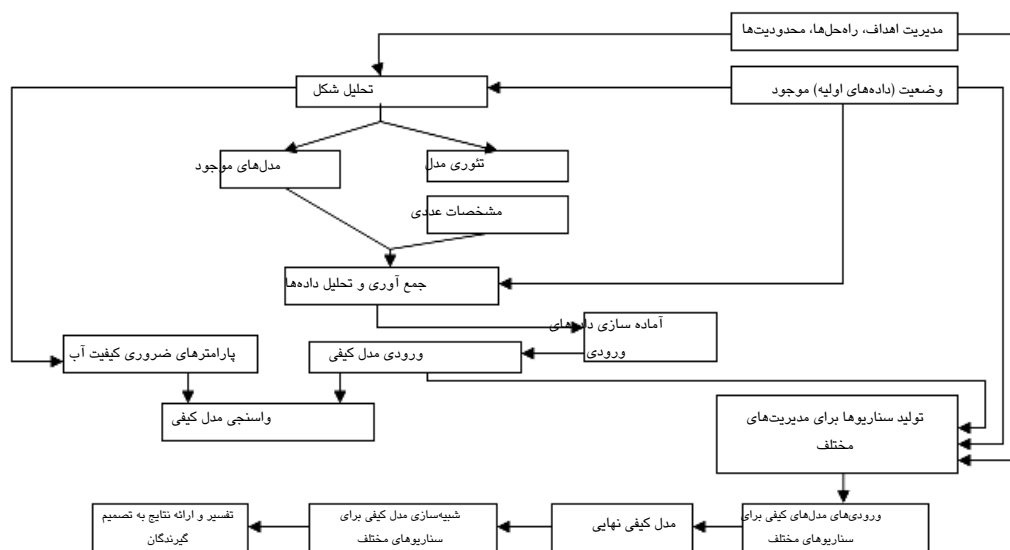
در روابط فوق،  $N$  تعداد نمونه‌ها و  $X_{i,obs}$  و  $X_{i,pre}$  به ترتیب مقدار مشاهده شده و برآورده شده برای هر پارامتر هستند.

به مخزن و داده‌های کیفی ایستگاه  $DAM$  در عمق‌های مختلف مخزن به فواصل ۵ متر (در عمیق‌ترین نقطه) برای تدوین مدل کیفی مورد استفاده قرار گرفت. علاوه بر این، در هر مرحله نمونه‌برداری از مخزن، برخی پارامترهای مهم مانند دما،  $DO$ ،  $EC$  در چهار ایستگاه  $DAM$ ،  $D-A$ ،  $D-B$  و  $D-C$  توسط دستگاه  $CTD$  در فواصل عمقی ۰/۵ متری برداشت و در مدل کیفی مورد استفاده قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده از نوع  $Ocean seven$  316 ساخت شرکت ایتالیایی  $Idronaut$  بوده و مجهز به حسگرهای درجه حرارت، هدایت الکتریکی، فشار (عمق)، اکسیژن محلول،  $pH$  و کدورت است. این دستگاه درجه حرارت را با دقت ۰/۰۰۳ درجه سلسیوس اندازه‌گیری می‌کند.

#### روش تحقیق

در این تحقیق، مدل کیفی  $CE-QUAL-W2$  برای مخزن سد شیرین‌دره واسنجی و سپس جهت مدیریت مخزن مورد استفاده قرار گرفت. بدین ترتیب که در ابتدا با ارائه سناریوهایی، اثرات کاهش و افزایش میزان غلظت فسفر در جریان ورودی به مخزن، بر افزایش روند تغذیه‌گرایی مخزن بررسی شد. ورود فسفر به مخزن عمدتاً از منابعی چون فضولات انسانی، شوینده‌های فسفری، پساب‌های صنعتی و رواناب کشاورزی اتفاق می‌افتد. سناریوهای بررسی شده در این قسمت شامل موارد زیر است:

- ۱- وضع موجود (بدون تغییر در میزان فسفر ورودی) در طی دوره چهار ساله پس از پایان شبیه‌سازی.
- ۲- کاهش فسفر ورودی به مخزن به میزان ۲۵٪ نسبت به وضعیت موجود.
- ۳- کاهش فسفر ورودی به مخزن به میزان ۵۰٪ نسبت به وضعیت موجود.
- ۴- افزایش فسفر ورودی به مخزن به میزان ۲۰٪ در هر سال نسبت به سال قبل.



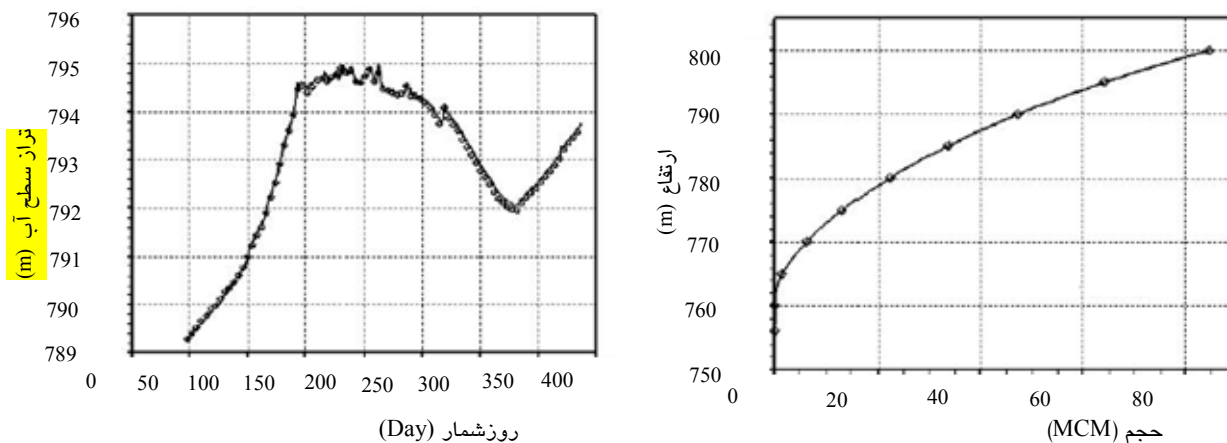
شکل ۳- نمودار توسعه مدل کیفی مخزن سد شیرین دره و تجزیه و تحلیل سناریوها.

### نتایج و بحث

#### واسنجی هندسه مخزن و تراز سطح آب

در این شبیه‌سازی، مخزن سد شیرین دره به یک شاخه که دارای ۱۴ بخش طولی بوده و طول بخش‌ها از ۲۷۰ متر تا ۶۰۰ متر متغیر است، تفکیک و هر بخش به لایه‌های یک متری تقسیم شد. تعداد کل سلول‌های فعال در شبکه محاسباتی ۳۰۸ عدد است. به‌منظور واسنجی هندسه و رسیدن به منحنی‌های سطح-حجم مخزن، در پارامتر عرض مخزن تغییراتی انجام شد. پس از انجام واسنجی هندسه مخزن و تطابق هندسه مخزن با منحنی

حجم-سطح-ارتفاع واقعی مخزن، با استفاده از داده‌های روزانه ثبت شده توسط اشلی که در داخل مخزن و نزدیک تاج سد قرار داشته و قرائت آن به‌صورت روزانه انجام گرفته بود، تراز سطح آب با خطای متوسط مطلق ۰/۰۷ متر شبیه‌سازی شد. مقایسه نمودارهای حجم-ارتفاع و تراز سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مقایسه نمودارهای حجم-ارتفاع و تراز سطح آب مشاهداتی (دایره توخالی) و شبیه‌سازی شده (خط).

### واسنجی حرارت

قبل از شبیه‌سازی مقاطع دمایی، تحلیل حساسیت انجام و سپس ضرایب واسنجی مؤثر بر لایه‌های مختلف، دسته‌بندی و ضرایب با بیشترین تأثیر مورد بررسی قرار گرفت. با نزدیک شدن شکل مقاطع شبیه‌سازی شده به شکل مقاطع مشاهداتی، سایر ضرایب واسنجی مورد استفاده قرار گرفته تا دقت شبیه‌سازی بالا برده شود. ارزش ضرایب مؤثر در واسنجی دمای آب مخزن سد شیرین دره در جدول ۱ ارائه شده است.

در ادامه، با استفاده از مدل عددی، دمای آب در ماه‌های مختلف و در اعماق مختلف پیش‌بینی و با داده‌های اندازه‌گیری شده در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، تیر، مرداد، شهریور و آبان سال ۱۳۹۱ (فروردین، اردیبهشت و تیر دوره واسنجی و مرداد، شهریور و آبان دوره صحت‌سنجی) در نزدیکترین مقطع به مخزن سد مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج در شکل ۵ ارائه شده‌است.

جدول ۱- ارزش ضرایب مؤثر در واسنجی دمای آب مخزن سد شیرین دره.

| عنوان ضریب                    | علامت اختصاری | ارزش نهایی                          |
|-------------------------------|---------------|-------------------------------------|
| لزجت گردابه طولی <sup>۱</sup> | AX            | 1 (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
| پخش گردابی طولی <sup>۲</sup>  | DX            | 1 (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ) |
| ضریب اصطکاک کف                | CHEZY         | 70                                  |
| تابش خورشیدی جذب شده          | BETA          | 0.61                                |
| نرخ میرایی نفوذ نور در        | EXH2O         | متغیر                               |
| میزان سایه اندازی دیوارهای    | SHD           | 0.9                                 |
| ضریب پناه باد <sup>۶</sup>    | WSC           | متغیر                               |

بر اساس اطلاعات به‌دست آمده، معیارهای خطا برای ماه‌های مختلف محاسبه و در جدول ۲ ارائه شده‌است. نتایج شبیه‌سازی و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد، مدل قادر است دما را در دوره واسنجی و صحت‌سنجی به‌ترتیب با متوسط خطای مطلق ۰/۹۷ °C و ۰/۱ °C (اواخر آذر ۱/۰۱ شبیه‌سازی کند. در ابتدای شبیه‌سازی (اواخر آذر ماه) لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد شیرین دره وجود ندارد. این شرایط تا اواخر اسفندماه حاکم بوده و با گرم شدن هوا و افزایش میزان تشعشع خورشیدی، لایه‌بندی حرارتی به‌تدریج شروع به شکل‌گیری می‌نماید. با شروع فصل تابستان، این پدیده تشدید شده به‌طوری‌که در اواسط تیر ماه، ضخامت میان‌لایه به بیشینه خود و در حدود ۶/۵ متر رسیده و تغییرات درجه‌حرارت در ستون آب به ۱۵ درجه سلسیوس رسید. با سردتر شدن هوا و در نتیجه کاهش دمای سطح آب در اوایل مهرماه (حدود ۲۱ درجه سلسیوس)، کاهش دمای آب ورودی و افزایش چگالی آن، جریان ورودی به لایه‌های پایینی مخزن رسیده و در نتیجه افزایش رولایه و کاهش عمق میان‌لایه اتفاق می‌افتد. با ادامه این روند، به تدریج عمق و چگالی رولایه افزایش یافته و مقاومت میان‌لایه در مقابل اختلاط کاهش و مخزن از حالت لایه‌بندی حرارتی خارج و شروع به همگن‌شدن در عمق می‌نماید. در اواسط آبان‌ماه، میان‌لایه به‌طور کامل شکسته شده و اختلاط در مخزن به وجود می‌آید. از این‌رو، مخزن سد شیرین دره جزو مخازن دارای لایه‌بندی تابستانه بوده که یکبار واژگونی در سال در این مخزن رخ می‌دهد. تناوب این لایه‌بندی حدود چهارماه است و دمای آب در این مخزن هیچ‌گاه به کمتر از ۴ درجه سلسیوس نمی‌رسد.

<sup>1</sup> Longitudinal eddy viscosity

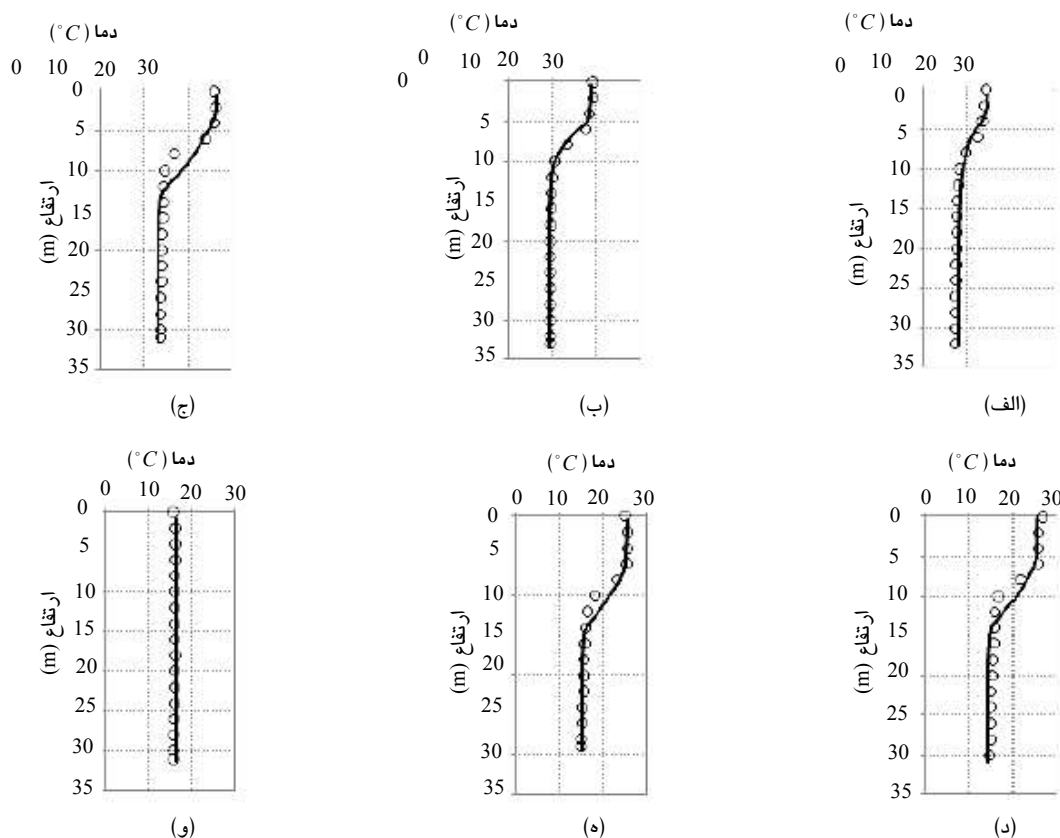
<sup>2</sup> Longitudinal eddy diffusivity

<sup>3</sup> Solar radiation absorbed in surface layer

<sup>4</sup> Extinction coefficient for pure water

<sup>5</sup> Solar radiation shading

<sup>6</sup> Wind sheltering coefficient



شکل ۵- نمودار داده‌های دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل (خط توپر) و مقایسه آن با داده‌های واقعی (دایره توخالی) در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱ (الف) فروردین، (ب) اردیبهشت، (ج) تیر (د) مرداد (ه) شهریور و (و) آذر.

جدول ۲- مقادیر معیارهای خطا در پیش‌بینی دما و مقایسه آن در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱.

| معیارهای خطا       | فروردین | اردیبهشت | تیرماه | مردادماه | شهریورماه | آذرماه |
|--------------------|---------|----------|--------|----------|-----------|--------|
| $AME (^{\circ}C)$  | ۰/۶۳    | ۰/۳۷     | ۱/۰۳   | ۱/۰۷     | ۰/۷۱      | ۰/۸۰   |
| $RMSE (^{\circ}C)$ | ۰/۷۲    | ۰/۶۳     | ۱/۵۳   | ۱/۳۷     | ۱/۱۶      | ۰/۸۲   |

#### واسنجی اکسیژن محلول

صورتی که لایه‌بندی حرارتی آب در آن اتفاق بیافتد، لایه‌های زیرین کمتر می‌توانند مستقیماً اکسیژن هوا را دریافت کنند. ضریب فرمول هواگیری که در واسنجی مدل مورد استفاده قرار می‌گیرد، توسط رابطه زیر مشخص می‌شود.

$$K_a = \frac{C_1 + C_2 W^{C_3}}{H} \quad [3]$$

میزان اکسیژن محلول در مخازن، یکی از شاخص‌های مهم برای سلامت آب به‌شمار آمده و کاهش آن بطور مستقیم بر کاهش کیفیت آب اثرگذار خواهد بود. مخازن آب ممکن است علی‌رغم عاری بودن از مواد مصرف‌کننده اکسیژن، حاوی مقدار بسیار کمی اکسیژن بوده و یا اصولاً فاقد آن باشند. زیرا قسمت‌های سطحی آب در تماس با هوا بوده و در

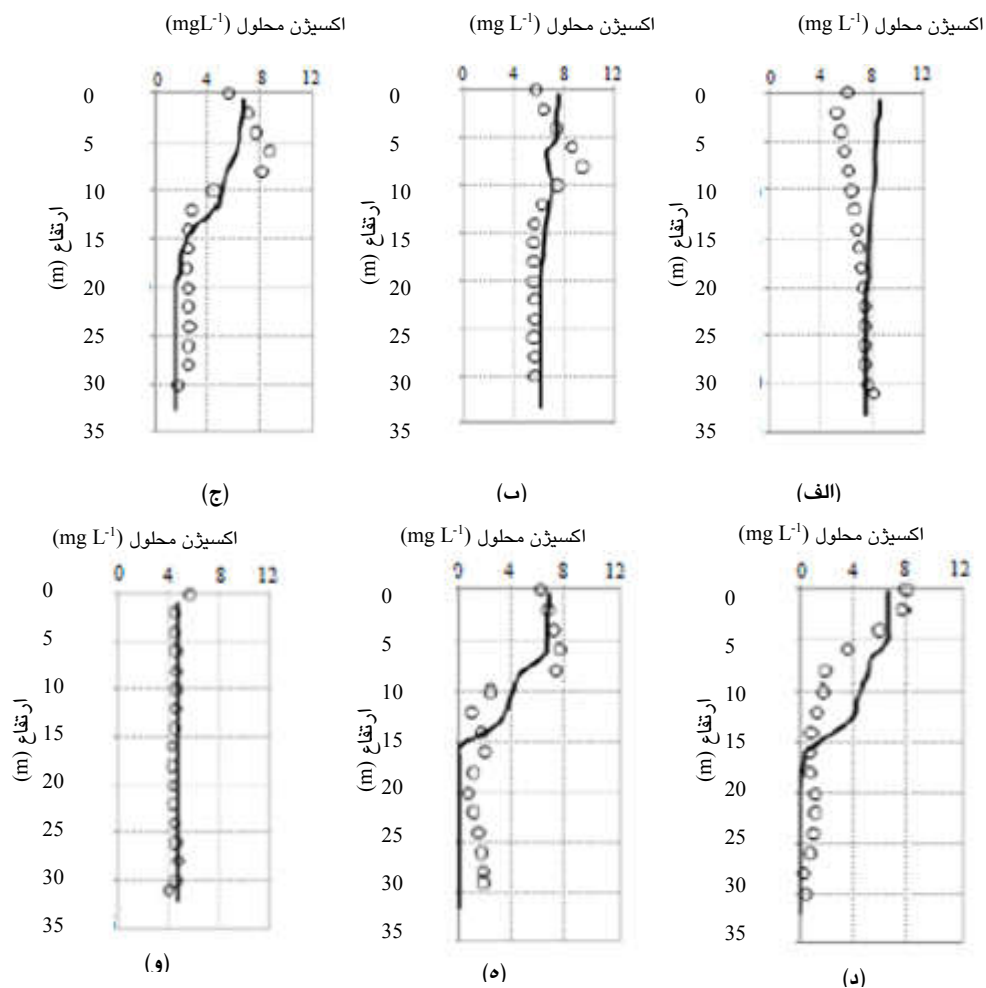


دوره‌های واسنجی و صحت‌سنجی در شکل ۶ مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس اطلاعات به‌دست آمده، معیارهای خطا برای ماه‌های مختلف محاسبه و در جدول ۳ ارائه شده‌است.

در رابطه فوق،  $K_d$  ضریب هواگیری و  $C_1$ ،  $C_2$  و  $C_3$  ضرایبی هستند که توسط کاربر تعریف می‌شوند.  $W$  سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری و  $H$  عمق آب است. مدل، امکان استفاده از فرمول‌بندی‌های مختلفی را برای ضریب هواگیری دارد. غلظت اکسیژن محلول در

جدول ۳- مقادیر معیارهای خطا در پیش‌بینی اکسیژن محلول و مقایسه آن در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱.

| معیارهای خطا           | فروردین | اردیبهشت | تیرماه | مردادماه | شهریورماه | آذرماه |
|------------------------|---------|----------|--------|----------|-----------|--------|
| $AME$ ( $mg L^{-1}$ )  | ۱/۱۹    | ۰/۰۹     | ۱/۱۴   | ۱/۰۶     | ۱/۲۸      | ۰/۱۷   |
| $RMSE$ ( $mg L^{-1}$ ) | ۱/۵۸    | ۱/۰۷     | ۱/۴۱   | ۱/۲۶     | ۱/۴۴      | ۰/۲۸   |



شکل ۶- نمودار داده‌های اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده توسط مدل (خط توپر) و مقایسه آن با داده‌های واقعی (دایره توخالی) در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱ (الف) فروردین، (ب) اردیبهشت، (ج) تیر (د) مرداد (ه) شهریور و (و) آذر.

### واسنجی نیترات

نیترات، مهم‌ترین منبع نیتروژن موجودات آبی به شمار می‌آید. از این‌رو، افزایش غلظت این ماده مغذی می‌تواند روند اتروفیکاسیون را تشدید نماید. نیترات به عنوان یک جزء مهم در کودهای شیمیایی بوده و برای تولید محصولات کشاورزی لازم است. لذا زمین‌های زراعی غالباً آلوده به این ماده هستند. در هنگام بارندگی، غلظت بالایی از نیترات از زمین‌های کشاورزی شسته و در نهایت وارد دریاچه‌ها و مخازن سدها می‌شود. نیترات همچنین در اثر ورود فاضلاب انسانی و

یا فضولات دامی وارد محیط می‌شود. در این تحقیق، نرخ نیتریفیکاسیون آمونیاک ۰/۱ میلی‌گرم در روز در نظر گرفته شد. نتایج مربوط به شبیه‌سازی، مقدار نیترات به‌دست آمده در ایستگاه DAM توسط مدل و مقایسه آن با داده‌های واقعی در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، معیارهای خطا برای ماه‌های مختلف محاسبه و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- مقادیر معیارهای خطا در پیش‌بینی نیترات و مقایسه آن در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱.

| معیارهای خطا               | فروردین | اردیبهشت | تیرماه | مردادماه | شهریورماه | آذرماه |
|----------------------------|---------|----------|--------|----------|-----------|--------|
| AME (mg L <sup>-1</sup> )  | ۲/۰۰    | ۲/۱۷     | ۳/۹۵   | ۲/۳۱     | ۲/۲۹      | ۲/۱۷   |
| RMSE (mg L <sup>-1</sup> ) | ۲/۱۳    | ۴/۴۷     | ۴/۵۰   | ۳/۲۸     | ۲/۶۰      | ۲/۳۹   |

### واسنجی فسفات و فسفرکل

فسفات‌ها دارای بار منفی قوی (۳-) بوده و تمایل زیادی به واکنش با کاتیون‌های چند ظرفیتی مانند Fe<sup>3+</sup> و Fe<sup>2+</sup>، Mg<sup>2+</sup>، Ca<sup>2+</sup> برای تشکیل نمک‌های نامحلول دارند. عنصر فسفر برای رشد گیاهان و جانوران ضروری بوده و تقریباً تمامی کودهای شیمیایی حاوی فسفات‌ها (ترکیبات شیمیایی حاوی عنصر فسفر) هستند. در زمان بارندگی، مقادیر مختلفی از ترکیبات فسفات از خاک‌های کشاورزی به منابع آبی اطراف این مناطق منتقل می‌شوند. فسفر، مهم‌ترین عنصر در زیست‌بوم‌های آبی محسوب می‌شود. فسفات یکی از مواد مغذی اولیه بوده که موجب تحریک رشد فیتوپلانکتون‌ها و گیاهان آبی شده که به عنوان غذا برای ماهی‌ها به‌کار می‌روند. به‌عبارت دیگر، فسفات از فاکتورهای مهم در ایجاد پدیده تغذیه‌گرایی در مخازن سدها است. فسفات‌ها از طریق کودهای شیمیایی، صنعت و ترکیبات شوینده وارد محیط می‌شوند.

همچنین این ماده ممکن است از طریق پسماندهای انسان و حیوان و صخره‌های حاوی فسفات وارد محیط‌های آبی شود. این مواد به سه شکل، ارتوفسفات، متافسفات و فسفات‌های که به ترکیبات آن پیوند برقرار می‌نمایند، در محیط یافت می‌شوند. میزان PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>، در صورت مصرف کودهای فسفات در اراضی کشاورزی موجود در محدوده مطالعات و ورود زهاب‌های کشاورزی تغییر می‌کند. با برآورد میزان غلظت فسفر ورودی به مخزن سد بر اساس نمونه‌گیری‌ها و با توجه به مدل‌سازی انجام شده، بر اساس مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی مخزن، میزان PO<sub>4</sub> در پنج عمق و در ماه‌های مورد نظر تعریف شد. در ادامه، مدل اجرا و نمودارهای به‌دست آمده با نمودارهای مشاهده‌ای مقایسه شد. لازم به ذکر است، با توجه به میزان کم فسفر آلی در مخزن سد، مقدار فسفات و فسفر کل در ورودی و در اعماق مختلف و در روزهای نمونه‌گیری در ایستگاه DAM گزارش شد. ضریب نیم‌اشباع فسفر

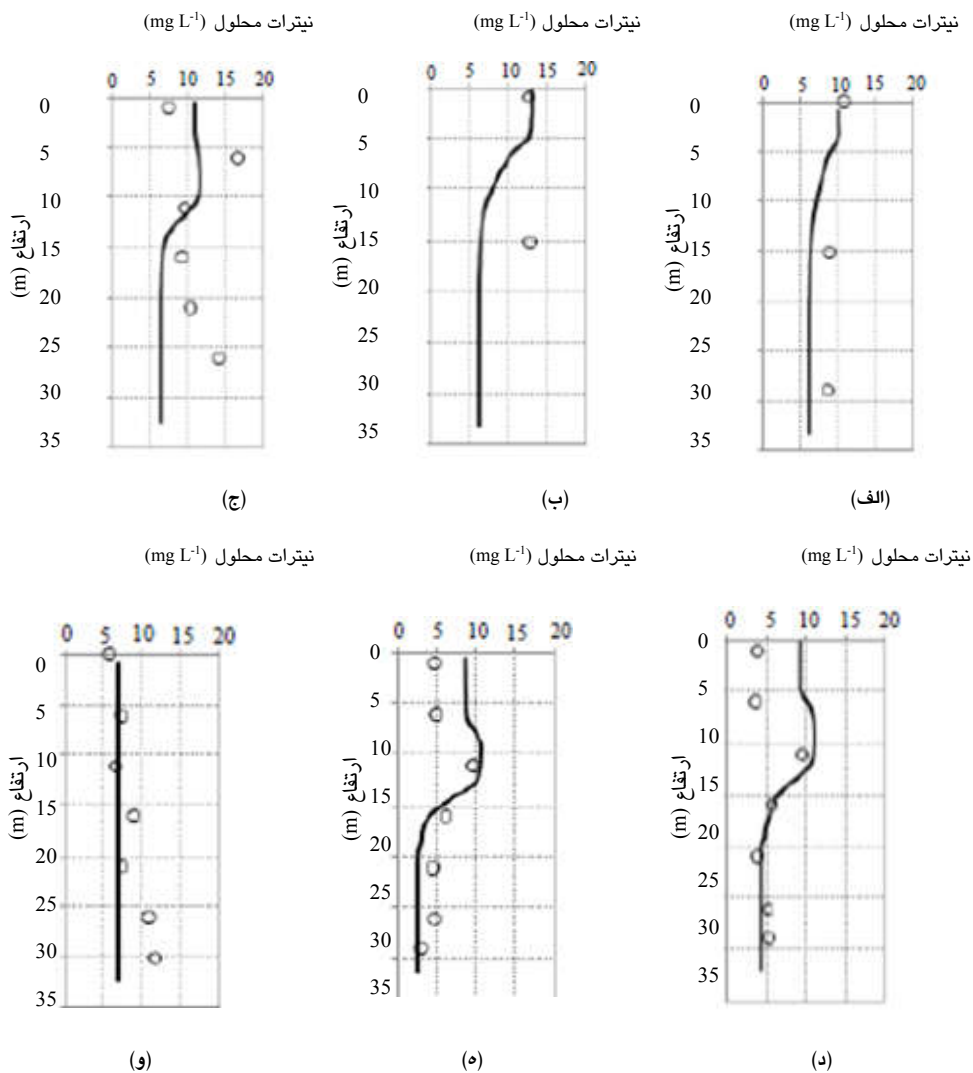
فسفر داخل مخزن در وضعیت شاداب به سر برده و پس از طی یک دوره ۱۱ ماهه، در انتهای دوره شبیه‌سازی (۲۷ آبان ماه ۱۳۹۱) از لحاظ میزان غلظت فسفر داخل مخزن، به وضعیت فوق‌مغذی رسیده است، لزوم اعمال راهکارهایی به منظور خروج از وضعیت کنونی احساس می‌شود. پس از واسنجی مدل CE-QUAL-W2، از مدل مذکور جهت بررسی تأثیر سناریوهای کاهش و افزایش میزان فسفر ورودی به مخزن استفاده شد.

۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر و تعادل استوکیومتری (اندازه‌گیری عنصر) بین توده حیاتی و فسفر نیز در ۰/۰۰۵ واسنجی شد. نیترات شبیه‌سازی شده توسط مدل و داده‌های واقعی در زمان‌های مختلف نمونه‌برداری، در ایستگاه DAM، در شکل ۷ نشان داده شده است.

کاهش میزان فسفر ورودی به مخزن

با توجه به اینکه مخزن سد شیرین‌دره در ابتدای

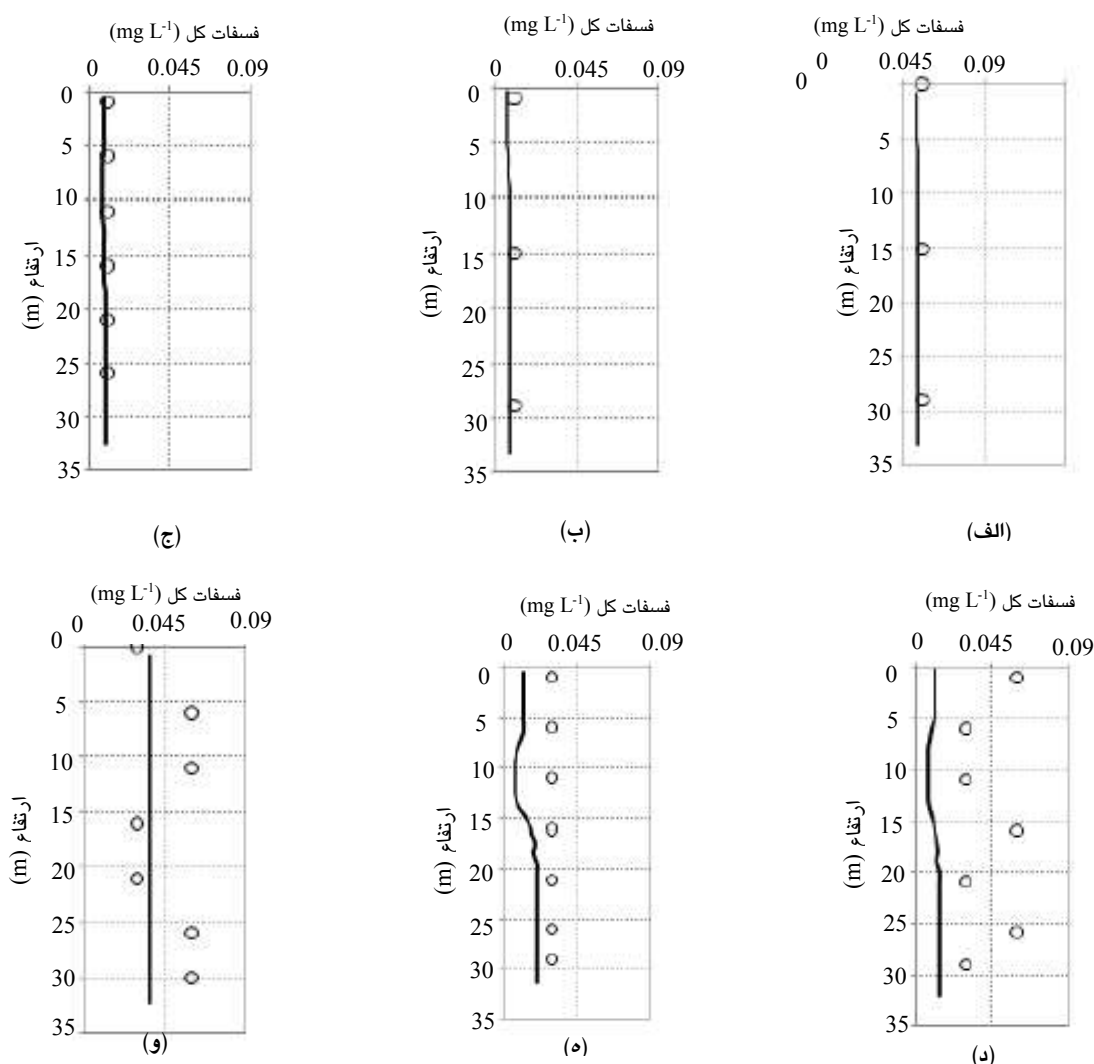
دوره شبیه‌سازی (۲۳ آذر ماه ۱۳۹۰) از نظر میزان



شکل ۷- نمودار داده‌های نیترات شبیه‌سازی شده توسط مدل (خط توپر) و مقایسه آن با داده‌های واقعی (دایره توخالی) در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱ (الف) فروردین، (ب) اردیبهشت، (ج) تیر (د) مرداد (ه) شهریور و (و) آذر.

جدول ۵- میزان غلظت فسفر کل بر حسب میکروگرم بر لیتر در اواخر آبان ماه در سناریوهای مختلف.

| شماره سناریو | سال اول | سال دوم | سال سوم | سال چهارم |
|--------------|---------|---------|---------|-----------|
| ۱            | ۳۵/۷    | ۳۲/۵    | ۳۰/۹    | ۲۶/۵      |
| ۲            | ۳۲/۱    | ۲۸/۲    | ۲۶/۶    | ۲۲/۶      |
| ۳            | ۲۸/۵    | ۲۳/۸    | ۲۲/۳    | ۱۸/۱      |
| ۴            | ۳۸/۶    | ۳۸/۳    | ۴۰      | ۵۱        |
| ۵            | ۴۱/۵    | ۴۵      | ۵۱/۵    | ۷۰        |



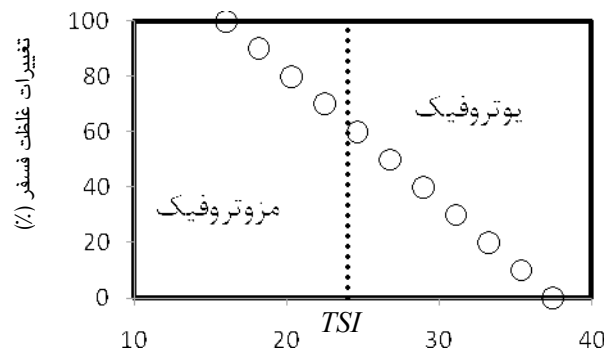
شکل ۸- نمودار داده‌های فسفر کل و فسفات شبیه‌سازی شده توسط مدل (خط توپر) و مقایسه با داده‌های واقعی (دایره توخالی) در ماه‌های مختلف سال ۱۳۹۱ (الف) فروردین، (ب) اردیبهشت، (ج) تیر (د) مرداد (ه) شهریور و (و) آذر.

سناریوهای موجود، میزان کاهش و افزایش فسفر مخزن با وضعیت مخزن در این زمان مورد مقایسه قرار گرفت. در سناریوهای کاهش میزان فسفر، ورودی به مخزن در طول دوره شبیه‌سازی به ترتیب از

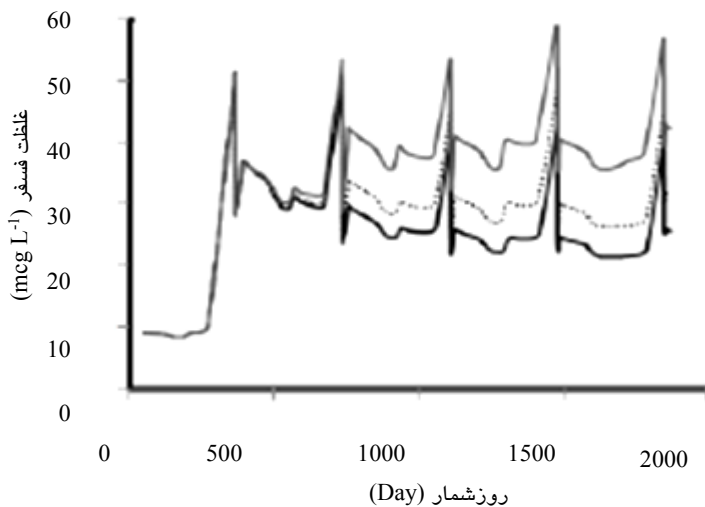
با توجه به اینکه مدل شبیه‌سازی شده برای مخزن سد شیرین‌دره در انتهای دوره شبیه‌سازی که مخزن در حالت اختلاط کامل به سر می‌برد، دارای میزان فسفر در حدود ۳۷ میکروگرم بر لیتر است، در

مخزن از لحاظ دبی و نیز ثابت فرض کردن شرایط هواشناسی منطقه، پس از دوره شبیه‌سازی (تقریباً یک سال)، سناریوهای کاهش و افزایش فسفر به مدت ۴ سال بررسی شد. همانطور که از جدول ۵ و شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص می‌شود، می‌توان با اعمال مدیریت صحیح فسفر در حوضه آبریز و کاهش میزان آن در ورودی به سد (سناریوهای دوم و سوم) در بلندمدت، وضعیت کیفی مخزن را از لحاظ میزان فسفر کل بهبود بخشید. اما با توسعه کشاورزی و نبود مدیریت صحیح، فسفر ورودی به مخزن افزایش یافته و مخزن هر چه بیشتر به سمت مغذی شدن پیش خواهد رفت.

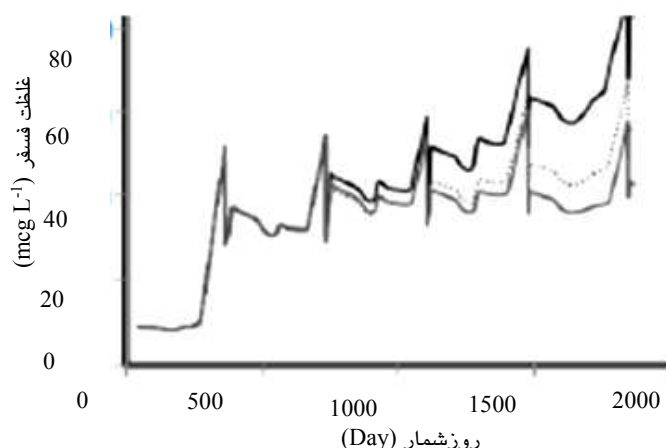
۱۰ تا ۱۰۰ درصد در ورودی کاهش داده شده و تأثیر آن بر کیفیت مخزن در اواخر آبان‌ماه (انتهای دوره شبیه‌سازی) در شکل ۸ نشان داده شد. غلظت فسفر در نزدیک بدنه سد در اواخر آبان در شکل ۹ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، با کاهش ۶۰ تا ۷۰ درصدی غلظت فسفر در ورودی در طی دوره شبیه‌سازی، دریاچه از شرایط یوتروفیک (مغذی) وارد شرایط مزوتروفیک (نیمه مغذی) در انتهای دوره شبیه‌سازی خواهد شد. در ادامه، به منظور بررسی بیشتر سناریوهای کاهش و افزایش فسفر بر وضعیت کیفی مخزن، در اواخر آبان‌ماه، با ثابت فرض کردن وضعیت



شکل ۹- تغییرات غلظت فسفر در نزدیک بدنه سد بر حسب TSI در اواخر آبان.



شکل ۱۰- میزان غلظت فسفر در سناریوهای کاهش (در حالتی که فسفر ورودی نسبت به وضعیت موجود ۲۵ درصد کاهش یابد).

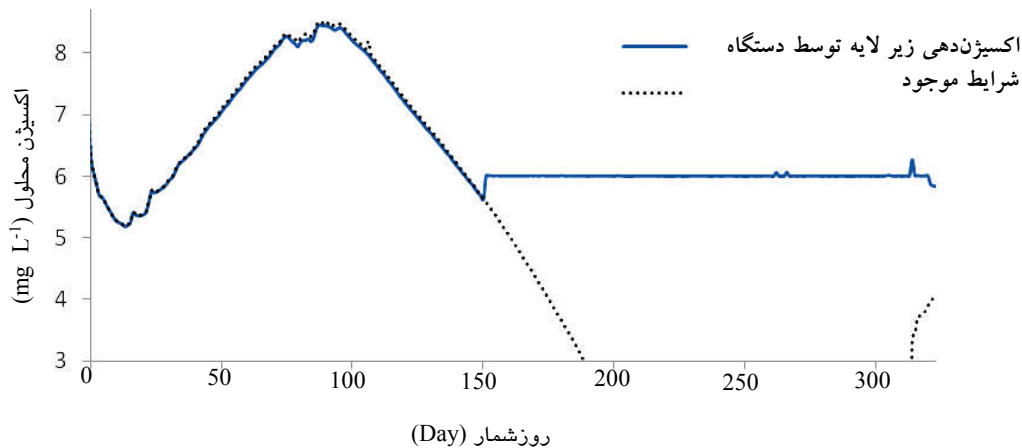


شکل ۱۱- میزان غلظت فسفر در سناریوهای کاهش (در حالتی که فسفر ورودی نسبت به وضعیت موجود ۲۰ درصد افزایش یابد).

#### دستگاه اکسیژن دهی در مدل

عدم هواگیری مستقیم زیرلایه در دوران لایه‌بندی حرارتی و همچنین افزایش میزان مصرف اکسیژن به دلیل ازدیاد مواد مغذی و رشد میکروارگانیسم‌ها باعث می‌شود تا زیرلایه در دوران لایه‌بندی حرارتی، با مشکل کمبود اکسیژن مواجه شود. این امر واکنش‌های احیای عناصر را به همراه داشته که در نهایت باعث ایجاد طعم و بو در آب می‌شود. با توجه به اینکه تراز خروجی مخزن سد شیرین‌دره در زیرلایه قرار دارد، آبرگیری از لایه‌های مذکور و انتقال آن به تصفیه‌خانه‌های آب‌آشامیدنی، نه تنها میزان مصرف مواد شیمیایی و هزینه‌های تصفیه را افزایش خواهد داد، بلکه در برخی موارد می‌تواند مشکلات اجتماعی بسیاری را همراه داشته باشد. در روش اکسیژن‌دهی زیرلایه، اکسیژن در داخل زیرلایه انتشار می‌یابد. در حالی که در لایه‌بندی حرارتی مخزن تغییراتی ایجاد نمی‌کند. مزیت این فرآیند این است که هوادهی بدون انتقال سایر پارامترهای کیفی از زیرلایه به رولایه صورت می‌گیرد. از این رو، رشد جلبک‌ها افزایش نمی‌یابد. در این قسمت، تأثیر قرارگیری استفاده از این دستگاه بر افزایش میزان اکسیژن محلول زیرلایه و نیز بهبود کیفیت آب مخزن سد شیرین‌دره توسط مدل‌سازی بررسی می‌شود. برای مدل‌سازی دستگاه مذکور، دستگاهی با قدرت تولید ۶۲۵۰ کیلوگرم اکسیژن در روز که ناحیه تأثیرش در حدود ۵ متر است، در

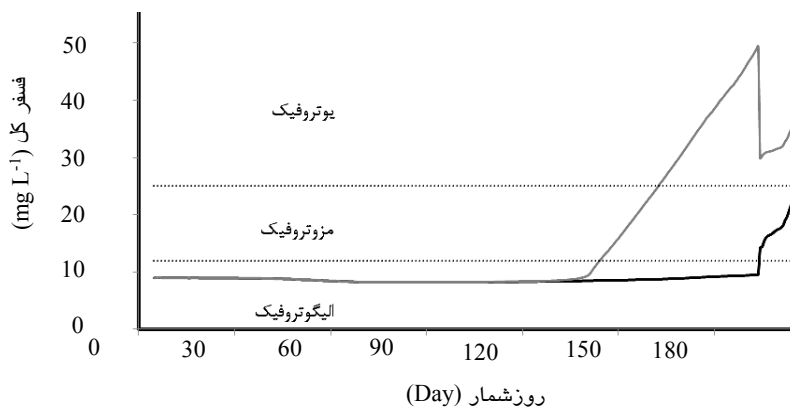
مکانی نزدیک به بدنه سد و در فاصله مناسب از کف مخزن (در حدود ۱۰ متر از کف) در نظر گرفته شد. روشن و خاموش‌شدن دستگاه از طریق حسگر تشخیص میزان اکسیژن محلول که در زیرلایه قرار داده شده، کنترل می‌شود. هنگامی که میزان اکسیژن محلول کمتر از ۴ میلی‌گرم در لیتر شود، دستگاه شروع به کار کرده و در صورتی که این میزان بیشتر از ۶ میلی‌گرم در لیتر شود، دستگاه خاموش می‌شود. در ضمن، با توجه به اینکه در شروع شبیه‌سازی، مخزن در حالت اختلاط کامل به‌سر برده و میزان اکسیژن محلول در ستون آب در وضعیت مناسبی به‌سر می‌برد، شروع به‌کار دستگاه از اواخر اردیبهشت‌ماه که مخزن وارد وضعیت لایه‌بندی و کمبود اکسیژن محلول در عمق می‌شود، تعیین شده است. در طول دوران لایه‌بندی که شرایط کمبود اکسیژن محلول در زیرلایه حاکم است، دستگاه روشن بوده و در اواسط آبان ماه (شماره روز میلادی ۶۷۰) که دوباره مخزن در عمق واژگون می‌شود، تا شروع فصل بعدی دستگاه خاموش خواهد شد. در طول دوره‌ای که دستگاه برای هر فصل آماده به‌کار می‌شود (در حدود ۱۹۰ روز)، در ۶۱ روز سال روشن و در بقیه روزها خاموش خواهد ماند. میزان غلظت اکسیژن محلول بر حسب میلی‌گرم در لیتر در طول شبیه‌سازی در زیرلایه، در شکل ۱۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه در دو حالت شرایط موجود و استفاده از دستگاه تولید اکسیژن.

منطقه یوتروفیک قرار می‌گیرد. اما با به‌کارگیری دستگاه اکسیژن‌دهی زیرلایه، وضعیت مخزن تا سوم آبان‌ماه در وضعیت شاداب قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه ترکیبات فسفر موجود در مخزن سد جذب ذرات رسوب شده و در نهایت در کف مخزن تجمع می‌یابند، در زمان اختلاط کامل، این ترکیبات مجدداً به بدنه آب برگشته و باعث افزایش شدید مواد مغذی می‌شوند. از این زمان به بعد، وارد دوره اختلاط مخزن شده و میزان غلظت فسفر کل در زیر لایه افزایش و کیفیت آب مخزن از لحاظ غلظت فسفر کل از چهارم آبان وارد مرحله مزوتروفیک و تا پایان دوره شبیه‌سازی در این مرحله باقی می‌ماند.

غلظت فسفر کل در طول دوره شبیه‌سازی و در زیرلایه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد، در شرایط موجود، مخزن که بدون استفاده از دستگاه اکسیژن‌دهی زیرلایه است، میزان غلظت فسفر کل از ابتدای دوره شبیه‌سازی تا اوایل مرداد، تقریباً ثابت بوده و سپس روند غلظت فسفر کل صعودی گشته، به‌طوریکه وضعیت مخزن از لحاظ غلظت فسفر کل در دوازدهم مردادماه در وضعیت مزوتروفیک قرار می‌گیرد. این روند صعودی با شیب ثابتی ادامه یافته و مخزن در حدود یک ماه در وضعیت مزوتروفیک قرار می‌گیرد. در یازدهم شهریورماه وارد شرایط یوتروفیک (مغذی) شده و این وضعیت ادامه می‌یابد تا اینکه وضعیت مخزن در انتهای دوره نیز در



شکل ۱۳- غلظت فسفر کل در زیرلایه در شرایط موجود و استفاده از دستگاه اکسیژن‌دهی زیرلایه.

## نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، مدل دوبعدی متوسط‌گیری‌شده در عرض CE-QUAL-W2 به‌منظور مدل‌سازی هیدرودینامیک، دما و بررسی روند تغذیه‌گرایی در مخزن سد شیرین‌دره به‌کار گرفته شد. هیدرودینامیک سیستم (سطح آب)، دما و پارامترهای کیفی آب شامل نیترات، اکسیژن محلول و فسفر در طی دوره مدل‌سازی (دوره واسنجی آذر ۱۳۹۰ تا تیر ۱۳۹۱ و دوره صحت-سنجی مرداد تا آبان ۱۳۹۱) واسنجی و تایید شد. در این دوره، نتایج حاصل از مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی دما و پارامترهای کیفی آب تطابق نسبتاً مناسبی با داده‌های مشاهداتی داشتند. با توجه به داده‌های برداشت شده و نیز نتایج حاصل از شبیه‌سازی، لایه-بندی حرارتی در مخزن سد شیرین‌دره از ابتدای اسفندماه شروع شد. با شروع فصل تابستان، لایه‌بندی تشدید شده و در اواسط تیرماه، ضخامت میان لایه به بیشینه خود و در حدود ۶/۵ متر و تغییرات درجه-حرارت در ستون آب ۱۵ درجه سلسیوس شد. به‌تدریج هنگام پاییز، لایه‌بندی ضعیف‌تر شده و در اواسط آبان-ماه، میان‌لایه به طور کامل شکسته شده و اختلاط در مخزن به وجود آمد. از این رو، مخزن سد شیرین‌دره، جزو مخازن دارای لایه‌بندی تابستانه بوده که یک‌بار واژگونی در سال در این مخزن رخ می‌دهد. تناوب این لایه‌بندی حدود چهارماه است. تغییرات غلظت اکسیژن محلول در عمق مخزن نشان داد که در فصل تابستان میزان غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه بسیار کم شده بطوری‌که شرایط تقریباً در این لایه بی‌هوایی شده و

## منابع مورد استفاده

- افشار ع و سعادت‌پور م، ۱۳۸۸. تغذیه‌گرایی مخازن سدها: مدل‌سازی دوبعدی مخزن کرخه. مجله آب و فاضلاب، دوره ۲۰، شماره ۳، صفحه‌های ۸۳ تا ۹۰.
- رضازاده ن، نظریها م و سارنگ ا، ۱۳۹۳. مدیریت کیفیت آب خروجی از مخزن سد کرخه با انتخاب تراز تخلیه مناسب. نشریه پژوهش‌های محیط‌زیست، شماره ۹، صفحه‌های ۱۲۵ تا ۱۳۶.

با توجه به اینکه خروجی آبگیر مخزن سد در زیرلایه قرار دارد، باعث کاهش کیفیت آب خروجی از سد می‌شود. فسفر نیز نقش مهمی در زمینه تغذیه‌گرایی در مخازن آب و دریاچه‌ها دارد. ورود فسفر به منابع آب-شیرین از دو طریق اتفاق می‌افتد، یکی از این راه‌ها، ورود فسفر از طریق جریان‌های ورودی به مخزن و دیگری فسفوری است که از رسوب و با توجه به شرایط محیطی حاکم در آب بالای آن وارد مخزن می‌شود. داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داد، هرچند در آغاز دوره شبیه‌سازی، وضعیت مخزن در منطقه شاداب قرار گرفته باشد، پس از گذشت یک سال، مخزن وارد شرایط مغذی می‌شود. در این مقاله، به منظور مدیریت کیفیت آب مخزن سد شیرین‌دره بجنورد، سناریوهای کاهش غلظت میزان فسفر در ورودی (به عنوان روش مدیریت حوضه آبریز) و افزایش غلظت اکسیژن محلول زیرلایه (به عنوان روش مدیریت داخل مخزن) بر بهبود کیفیت آب مخزن سد به تفکیک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در هر دو سناریو، کیفیت آب مخزن بهبود پیدا کرده است. بنابراین، نتایج حاصل از این مطالعه می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای ارزیابی استراتژی‌های مختلف مدیریت کیفی داخل مخزن برای به تعویق انداختن تغذیه‌گرایی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد.

## تشکر و قدردانی

در پایان از شرکت آب منطقه‌ای خراسان شمالی و مهندسین مشاور طوس‌آب تشکر و قدردانی می‌شود.



- حیدری ژاله ع، کراچیان ر و زهرایی ب، ۱۷ الی ۱۹ اردیبهشت ماه سال ۱۳۸۷. مدیریت کیفیت آب در مخازن سدها با تلفیق رویکرد سازه‌ای و غیرسازه‌ای. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- خیامی م، دانش ش، خدشناس س و داوری ک، ۱۳۸۸. شبیه‌سازی شرایط کیفی مخازن سدها، مطالعه موردی: مخزن سد طرق. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۲۳، شماره ۱، صفحه‌های ۱۷ تا ۲۹.
- نظریها م، دانایی ع، هاشمی ح و ایزد دوستدار ام، ۱۳۸۹. پیش‌بینی لایه‌بندی حرارتی سد در دست احداث بختیاری با استفاده از مدل CE-QUAL-W2. مجله محیط‌شناسی، دوره ۳۶، شماره ۵۴، صفحه‌های ۱۱ تا ۱۸.
- محمدنژاد ب، ۱۳۹۳. شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن سد مهاباد با استفاده از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۴، شماره ۴، صفحه‌های ۱۰۷ تا ۱۱۵.
- Ambrose RB, Wool TA, Connolly JP and Schanz RW, 1987. WASP4, a hydrodynamic and water quality model-model theory, user's manual, and programmers' guide. Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency in Athens, Ga. EPA/600/3-87/039.
- Diogo PA, Fonseca M, Coelho PS, Mateus NS, Almeida MC and Rodrigues AC, 2008. Reservoir phosphorous sources evaluation and water quality modeling in a Tran's boundary watershed. *Desalination* 226: 200-214.
- Hodges B and Dallimore C, 2001. Estuary and lake computer model, ELCOM, science manual. Code version 1.5.0. Centre for Water Research, University of Western Australia.
- Kou, JT, Lung WS, Yang CP, Liu WC, Yang MD and Tang TS, 2006. Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling & Software* 21(6): 829-844.
- Willey RG, Smith DJ and Duke JH, 1996. Modeling water resource systems for water-quality management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 122(3): 171-179.
- Wu RS, Liu WC and Hsieh WH, 2004. Eutrophication modeling in Shihmen Reservoir, Taiwan. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering* 39(6): 1455-1477.
- Xu Z, Godrej AN and Grizzard TJ, 2007. The hydrological calibration and validation of a complexly linked watershed-reservoir model for the Occoquan watershed, Virginia. *Journal of Hydrology* 345(3-4): 167-183.
- Zhu L, Li HE, Li JK and Dong W, 2011. Connecting AnnAGNPS and CE-QUAL-W2 Models for Reservoir Water Quality Prediction. *International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)* 1120-1124.
- Zyfi A, Grazhdani S and Ahmeti A, 2014. Application of CE-QUAL-W2 model to water quality simulation in Prespa lakes. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 3(5):12021-12029.