



Seasonal assessment of eutrophication potential and thermal stratification in Esteghlal reservoir

Hamid Abdolabadi 

Corresponding Author, Department of Environmental Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: H.abdolabadi@scu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 18 September 2023

Received in revised form

8 December 2023

Accepted 13 February 2024

Published online 14 March 2024

Keywords:

CE-QUAL-W2

Dissolved Oxygen

Esteghlal Dam

Eutrophication

Thermal stratification

ABSTRACT

This study investigates the water quality dynamics of Esteghlal Reservoir over a five-year period, with a specific emphasis on evaluating its eutrophication potential. We employed a two-dimensional water quality model, CE-QUAL-W2, to simulate daily variations in key variables, including temperature, dissolved oxygen, algae, phosphate, ammonia, and nitrate, which influence nutrient conditions and eutrophication. Due to significant fluctuations in the reservoir's water volume, water quality analysis was conducted seasonally. The results reveal a complex dynamic pattern within the nutrient cycle in the reservoir. In spring and summer, temperatures vary throughout the water column, indicating strong thermal stratification. There is a notable difference in dissolved oxygen concentration between the epilimnion and hypolimnion due to factors such as oxygen consumption by algae, limited wind-induced mixing, thermal stratification, and an extended detention time. In autumn, a reduction in inflow during the summer and evaporation lead to a decrease in water volume. This, along with a reduction in temperature, weakens thermal stratification. With the influx of floods in winter, water volume increases, and complete mixing occurs due to cooling. This provides a suitable environment to improve dissolved oxygen levels. However, it also leads to an increase in nutrient input. Simulation results and an assessment of nutrient criteria underscore the presence of eutrophication potential in most months. A well-defined monitoring program with optimized sampling frequency and location, coupled with the control of nutrient input through watershed management and detention time adjustment, can be considered effective strategies for improving the reservoir's condition.

Cite this article: Abdolabadi, H. (2024). Seasonal assessment of eutrophication potential and thermal stratification in Esteghlal reservoir. *Journal of Water and Irrigation Management*, 14 (1), 55-74.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.365447.1105>



© The Author(s).

Publisher: The University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.365447.1105>



ارزیابی فصلی پتانسیل تغذیه‌گرایی و لایه‌بندی حرارتی سد استقلال

حمید عبدالآبادی ✉

نویسنده مسئول، گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی آب و محیط‌زیست دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: H.abdolabadi@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	در این پژوهش، وضعیت کیفیت آب مخزن استقلال با تمرکز بر ارزیابی پتانسیل تغذیه‌گرایی در بازه پنج‌ساله مورد بررسی قرار گرفت. برای شبیه‌سازی روزانه متغیرهای کلیدی مؤثر بر وضعیت مغذی شدن و شکوفایی جلبکی از جمله دما، اکسیژن محلول، جلبک، فسفات، آمونیوم و نیترات، از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 استفاده شد. با توجه به تغییرات قابل توجه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد، تحلیل شرایط حاکم بر مخزن سد به صورت فصلی انجام گرفت. نتایج حاکی از وجود الگوی پیچیده‌ای از پویایی‌ها و ارتباطات چرخه غذایی در مخزن است. در فصل بهار و تابستان، تغییرات دمایی شدید در عمق آب نشان از لایه‌بندی حرارتی قوی دارد. غلظت اکسیژن محلول در رولایه و زیرلایه به علت عواملی مانند مصرف اکسیژن توسط جلبک‌ها، محدودیت اختلاط تحت تأثیر باد، لایه‌بندی حرارتی و زمان ماند بالا دارای اختلاف قابل توجهی است. در پاییز، با توجه به کاهش ورود آب در تابستان و افزایش تبخیر، حجم آب کاهش یافته و با سرد شدن هوا، لایه‌بندی حرارتی کاهش می‌یابد. با ورود جریان‌های سیلابی در زمستان، حجم آب افزایش یافته و به علت کاهش دما، اختلاط کامل ایجاد می‌شود. این موضوع منجر به بهبود شرایط اکسیژن محلول می‌شود. اما، بار ورودی مواد مغذی را افزایش می‌دهد. نتایج شبیه‌سازی و ارزیابی معیارهای تغذیه‌گرایی نشان می‌دهند که پتانسیل تغذیه‌گرایی در اغلب ماه‌ها وجود دارد. وجود برنامه پایش دقیق با تعیین تواتر و محل بهینه نمونه‌برداری، کنترل ورود مواد مغذی از طریق مدیریت حوضه آبریز و تنظیم زمان ماند می‌توانند به عنوان راهکارهای مؤثر برای بهبود وضعیت مخزن محسوب گردند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷	
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۱۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۴	
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۲/۲۴	
کلیدواژه‌ها: اکسیژن محلول سد استقلال تغذیه‌گرایی لایه‌بندی حرارتی مدل CE-QUAL-W2	

استناد: عبدالآبادی، حمید (۱۴۰۳). ارزیابی فصلی پتانسیل تغذیه‌گرایی و لایه‌بندی حرارتی سد استقلال. نشریه مدیریت آب و آبیاری، ۱۴ (۱)، ۵۵-۷۴.
DOI: <https://doi.org/10.22059/jwim.2024.365447.1105>



۱. مقدمه

سدها به‌عنوان سازه‌های بزرگ آبی نقش مهمی در توسعه اقتصادی و ایجاد رفاه ایفا می‌نمایند (Shi *et al.*, 2019). این سازه‌ها با توجه به بزرگی و محدوده تأثیرگذاری آن‌ها، ویژگی‌های منحصربه‌فردی در بهره‌برداری داشته و اثرات قابل توجهی بر محیط‌زیست و منابع طبیعی محدوده‌های اطراف خود دارند (Grey and Sadoff, 2007). عدم توجه به این ویژگی‌ها و اثرات، دستیابی به اهداف احداث این سازه‌ها را با مشکل مواجه خواهد نمود. یکی از چالش‌های اصلی سدها، شرایط کیفی حاکم بر مخزن سد است (Manatunge *et al.*, 2008). امروزه بسیاری از سدهای کشور با مشکلات کیفیت آب مواجه هستند. از آنجایی که یکی از اهداف عمده احداث این سدها تأمین آب برای مصارف شرب، صنعت و کشاورزی است، این مسئله می‌تواند نارضایتی مصرف‌کنندگان و افزایش هزینه‌های تصفیه را به‌همراه داشته باشد (نجفی و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین، تغییرات برخی از متغیرهای اصلی کیفی آب، مانند کاهش اکسیژن محلول در شرایط لایه‌بندی حرارتی موجب افت کیفیت آب رهاسازی شده به پایین دست شده و حیات زیست‌بوم آبی پایین دست را با مخاطره مواجه می‌نماید. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن، ابزار مناسبی در پیش‌بینی و برآورد کیفیت آب پس از شروع بهره‌برداری با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی، اقلیمی، بار آلاینده‌های ورودی و جریان رودخانه می‌باشند (Abdolabadi *et al.*, 2016). مدل به‌طور کلی ایده‌ای از فرایندهای دنیای واقعی محسوب می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن ابزاری هستند که براساس روابط و معادلات بین اجزا و مشخصه‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب، به شبیه‌سازی روابط بین آلاینده‌ها و کیفیت آب می‌پردازند.

این شبیه‌سازی‌ها به‌طور کلی به سه گروه عمده مدل‌های تجربی، مدل‌های بارگذاری مواد مغذی و موازنه جرمی و مدل‌های زنجیره غذایی مواد مغذی تقسیم می‌شوند (Reichert *et al.*, 2001). مدل‌های تجربی به‌صورت معمول با استفاده از داده‌های محلی و منطقه‌ای به‌سادگی قابل استفاده هستند و می‌توانند به توصیف تغذیه‌گرایی در دریاچه‌ها و مخازن در معرض خطر کمک کنند. این مدل‌ها اغلب برای پیش‌بینی تغذیه‌گرایی با جمعیت‌های به نسبت یکنواخت در دریاچه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. مدل‌های بارگذاری مواد مغذی و موازنه جرمی بر مبنای معادلات موازنه جرمی برای پیش‌بینی بارگذاری مواد مغذی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها با در نظر گرفتن ورودی‌ها، خروجی‌ها و تغییرات غلظت در محیط مخزن، بارگذاری فسفر و سایر مواد مغذی را مدل‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها در دو حالت گذار و پایدار قابل حل می‌باشند و به‌عنوان ابزاری کارآمد برای شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی در مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند (Chapra, 2008).

در زمینه مدل‌سازی تغذیه‌گرایی مخزن سد استقلال از مدل‌های مختلفی می‌توان استفاده نمود که دارای ویژگی‌ها، مزایا و معایب متفاوتی هستند. به‌عنوان مثال، مدل BATHTUB با امکان مدل‌سازی موازنه جرمی مواد مغذی و آب در شبکه هیدرولیکی، امکان کاهش داده‌های شاخه‌های فرعی را می‌دهد و اطلاعات نمونه‌برداری را تحلیل کند (Walker Jr, 2006). مدل WQRRS یک مدل فراگیر با قابلیت شبیه‌سازی کیفیت آب در مخزن و رودخانه است که ماژول‌های مختلفی شامل ماژول مخزن، ماژول هیدرولیک رودخانه و ماژول کیفیت آب را با توانایی شبیه‌سازی ۱۸ پارامتر کیفی مختلف و معیایی نظیر ساده‌سازی روابط اکولوژی و محدودیت‌های مخزنی دارد (Sharma and Kansal, 2013). مدل HEC-5Q یک مدل شبیه‌سازی کمی و کیفی سامانه‌های رودخانه-مخزن است. در این مدل، مخازن و دریاچه‌ها به‌صورت عمودی لایه‌بندی می‌شوند و فرض می‌شود که هر لایه دارای اختلاط کامل است. تبادل جرم و حرارت بین لایه‌ها از طریق فرایندهای پخش و انتقال انجام می‌شود (Borah *et al.*, 1999). مدل WASP با تنوع در شبیه‌سازی کیفیت آب و استفاده از زیربرنامه‌های جانبی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما مشکلاتی نظیر کاربرد محدود و

مشکلات در ورودی‌ها و اجرا دارد. انتخاب مدل مناسب باید با توجه به ویژگی‌های پروژه و نیازهای آن انجام شود (Wool et al., 2006).

مدل CE-QUAL-W2 با قابلیت شبیه‌سازی توزیع قائم و طولی انرژی حرارتی و مواد شیمیایی و بیولوژیکی در طول زمان، برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی مخازن و دریاچه‌های طولانی و باریک مناسب است. این مدل می‌تواند حجم، سطح آب، چگالی، سرعت‌های قائم و طولی و غلظت اجزای کیفی آب را مدل کند. همچنین، این مدل قابلیت مدل‌سازی حدود ۳۰ پارامتر کیفی را به همراه دما و الگوی چرخه‌ای دما دارد و تراز سطح آب را به صورت غیرصریح محاسبه می‌کند که اجازه استفاده از گام‌های زمانی بزرگ‌تر در دوره‌های شبیه‌سازی را می‌دهد (Wells, 2021).

تاکنون، پژوهش‌گران زیادی از مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی تغییرات متغیرهای کیفیت آب در مخازن سدها و تحلیل آن، ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری آب، تعیین لایه‌بندی حرارتی، تعیین بهترین نقاط نمونه‌برداری، تعیین تراز برداشت آب استفاده نموده‌اند (Aghasian et al., 2019; Colarusso et al., 2003; Debele et al., 2008; Jiang, 2012; Kuo et al., 2006; Liang et al., 2023; Liu et al., 2009).

Larabi et al. (2022) مدل یکپارچه رودخانه-مخزن را برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی و کیفی آب مخزن نچاکو توسعه دادند. این مدل به‌عنوان یک ابزار شبیه‌سازی کمک می‌کند تا اثر تغییرات در ورودی و عملکرد مخزن به دلیل تغییرات آب‌وهوا بررسی گردد. نتایج نشان می‌دهد که دمای آب مخزن، به‌ویژه رولایه به تغییرات هیدرولوژیکی بسیار حساس است.

Saadatpour (2020) از مدل‌های CE-QUAL-W2 و WEAP برای برنامه‌ریزی و ارزیابی اثرات سناریوهای مختلف کنترل جریان نمکی بالادست سد میمه استفاده نمودند. نتایج نشان دادند که بیش‌ترین نقض غلظت TDS در فصول کشاورزی رخ می‌دهد و در برخی از سال‌های خشک، کمبود قابل‌توجهی در تأمین آب در سناریوی سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP) رخ می‌دهد.

Ziaie et al. (2019) به بررسی لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی سد زاینده‌رود با استفاده از مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ پرداختند. ایشان به شبیه‌سازی تغییرات پروفیل دمایی و متغیرهای مهم کیفی آب شامل نترات، فسفات، فسفر کل و اکسیژن محلول را که بیش‌ترین تأثیر بر تغذیه‌گرایی دارند، پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که لایه‌بندی حرارتی در تابستان موجب افت شدید اکسیژن محلول شده و زیرلایه مخزن را در وضعیت بی‌هوازی قرار می‌دهد. همچنین، براساس شاخص تغذیه‌گرایی Carlson، زیرلایه در اغلب ماه‌های سال در وضعیت مغذی قرار دارد.

مطالعات متعدد دیگری نیز برای مدیریت شوری، بهبود شرایط برداشت آب از سدهای بختیاری، زنجان، بافت و کارون ۳ به لحاظ دمایی و ارزیابی وضعیت کیفیت آب مخزن صورت گرفته است (Beiramipoor et al., 2018; Nazariha et al., & Izad Doustdar, 2010; Rezaei Barandagh et al., 2018; Salehi et al., 2019; Talakesh et al., 2019). این موضوع بیانگر قابلیت مدل CE-QUAL-W2 برای مطالعه وضعیت تغذیه‌گرایی و لایه‌بندی حرارتی مخازن سدهاست.

سد استقلال میناب بر روی رودخانه میناب با ظرفیت مفید ۲۷۰ میلیون مترمکعب ساخته شده است. در حال حاضر، این سد وظیفه اصلی تأمین آب شهر بندرعباس را برعهده داشته و آب ذخیره‌شده در مخزن از مشکل طعم و بو برخوردار است. وجود فیتوپلانکتون‌ها در آب مخزن و وقوع پدیده شکوفایی جلبکی را می‌توان یکی از مهم‌ترین دلایل ایجاد طعم و بو در آب مخزن عنوان نمود. این موضوع به‌علت ورود مواد مغذی ناشی از سیلاب‌ها بوده و با وقوع لایه‌بندی حرارتی در مخزن، تشدید می‌گردد. با عنایت به این‌که سیلاب‌های به‌وقوع پیوسته در اواخر زمستان و اوایل بهار مهم‌ترین منبع

تأمین آب ورودی به سد هستند، به‌گونه‌ای که با رخداد چند سیلاب با آوردهای حدود ۲۰ تا ۳۰ میلیون مترمکعب در ماه، ۳۰ تا ۸۰ درصد ظرفیت مخزن آبیگری شده و پس از آن تنها برداشت آب از مخزن را خواهیم داشت، ارزیابی فصلی کیفیت آب مخزن ضرورت می‌یابد. بنابراین، افزایش زمان ماند و لایه‌بندی حرارتی مخزن از جمله متغیرهای تأثیرگذار بر تغذیه‌گرایی بوده و تأثیر به‌سزایی در کیفیت آب مخزن سد دارند.

Shahraki Mojahid (2014) به بررسی وضعیت شوری و لایه‌بندی حرارتی سد میناب در یک دوره یک‌ساله و در یک ایستگاه در پنج عمق مختلف با استفاده از نرم‌افزار HEC-5Q پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که غلظت شوری در مخزن با گرم‌شدن هوا افزایش یافته و با سردشدن هوا کاهش می‌یابد. همچنین، مقدار EC شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده کم‌تر از ۱/۲ دسی‌زیمنس بر متر بوده و لذا مخزن سد به لحاظ شوری از وضعیت نامناسبی برخوردار نبوده است.

در مطالعه‌ای دیگر، Jozi et al. (2016) اثرات زیست‌محیطی ناشی از بهره‌برداری سد استقلال را با استفاده از روش ICOLD و روش اصلاح‌شده بررسی و تحلیل نمودند. نتایج این مطالعه نشان داده است که سد استقلال بر روی محیط بیولوژیکی و محیط اقتصادی اجتماعی اثری مثبت داشته و تنها بر محیط فیزیکی شیمیایی اثر منفی دارد. بنابراین، وجود سد استقلال و بهره‌برداری از آن را مثبت ارزیابی نموده‌اند. البته ایشان در این مطالعه به‌علت اصلی بودارشدن آب که رشد و تکثیر جلبک‌های آناسیس تیس، پاندورینا، دینوبریون، تابالریا، اسمیس تیس و میکروسیمس تیس می‌باشند، اشاره نموده‌اند.

به‌تازگی، Moridi (2023) به بررسی چگونگی تغییرات ماهانه لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی مخزن سد استقلال در سه ایستگاه داخل سد و به‌مدت یک سال از اول خردادماه ۱۳۹۷ تا پایان اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۸ با استفاده از مدل دو بعدی کیفی CE-QUAL-W2 پرداختند. بررسی‌های ایشان نشان می‌دهد که مخزن سد دارای یک دوره لایه‌بندی ۱۰ ماهه از آذرماه تا اسفندماه است. همچنین، شرایط اختلاط کامل در دی‌ماه صورت گرفته و در کل مخزن از نظر تغذیه‌گرایی در شرایط مغذی قرار دارد.

بررسی پژوهش‌های صورت‌گرفته نشان می‌دهد که با توجه به شرایط ویژه سد استقلال، دوره مطالعه یک‌ساله برای مطالعه شرایط لایه‌بندی حرارتی کافی نبوده و نیاز به تحلیل بلندمدت تغییرات دمایی آب احساس می‌گردد. به‌علاوه، در پژوهش‌های انجام‌شده تغییرات ماهانه وضعیت مغذی شدن مخزن سد به‌صورت تفکیک‌شده با توجه به متغیرهای کلیدی شامل فسفر کل، کلروفیل a و اکسیژن محلول مطالعه نشده است. بر این اساس، در این پژوهش، با توجه به قابلیت‌های فراوان مدل CE-QUAL-W2 و ویژگی‌های سد استقلال از این مدل برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی مخزن سد استقلال استفاده شده است. مدل‌سازی به‌صورت روزانه برای پنج سال صورت گرفته و متغیرهای مختلف کیفی آب مانند دما، مواد معلق جامد، اکسیژن محلول، جلبک (فیتوپلانکتون)، فسفات، آمونیم و نترات برای ترسیم شرایط کیفی حاکم بر مخزن سد شبیه‌سازی می‌شود. در پایان، وضعیت تغذیه‌گرایی سد نسبت به متغیرهای مهم در طول ۵۲ ماه تحلیل شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲.۱. محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز سد استقلال پرآب‌ترین و مهم‌ترین حوضه آبریز استان هرمزگان می‌باشد که در عرض جغرافیایی ۲۶ درجه و ۵۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۲۴ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۶ درجه و ۴۹ دقیقه تا ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه شرقی واقع

شده است (شکل ۱). سد استقلال بر روی رودخانه میناب واقع شده و نقش به‌سزایی در حیات اقتصادی استان دارد. متوسط بارندگی حوضه در حدود ۱۸۰ میلی‌متر بوده و دمای متوسط آن حدود ۲۶/۷ درجه سانتی‌گراد ثبت شده است. سد استقلال علاوه بر تأمین آب شرب شهر بندرعباس، زمین‌های کشاورزی شهرستان میناب را مشروب می‌کند. جدول (۱) مشخصات سد مخزنی استقلال را نمایش می‌دهد. عملیات اجرایی این سد از سال ۱۳۵۳ شروع و در سال ۱۳۶۲ به بهره‌برداری رسیده است. این سد دارای دو دریاچه آبگیر در رقوم ۷۷/۵ و ۹۰ متر است که آب موردنیاز بخش کشاورزی (حدود ۱۰۳۱۰ هکتار سطح زیرکشت) و بخش عمده‌ای از آب شرب شهر بندرعباس را تأمین می‌نماید.

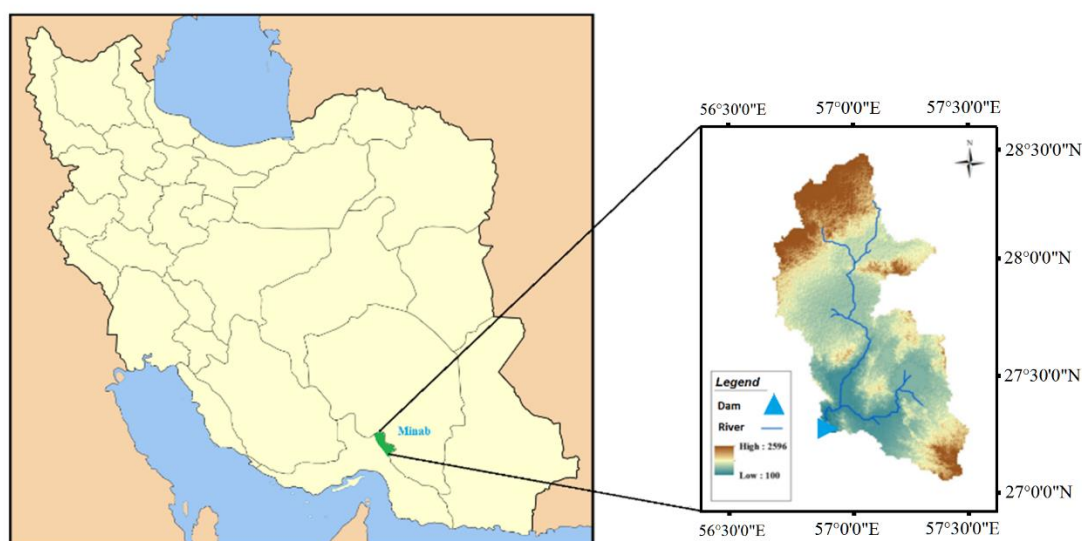


Figure 1. Study area of Esteghlal Dam (Minab city)

Table 1. Dam Specifications

Dam Type	Height	Crest Length	Base Width	Crest Width	Reservoir Capacity	Water Intake for Drinking Water	Objectives
Gravity Concrete	59.25 m	451 m	58 m	3 m	270 MCM	Two, located at elevations of 5.77 and 90 meters above sea level	Drinking Water Supply Agricultural Water Supply Flood Control and Storage

۲.۲ مدل CE-QUAL-W2

در مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 مدل‌سازی حرکت سیال با استفاده از معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی صورت می‌گیرد. در بسیاری از جریان‌های آشفته معادلات رینولدز که حرکت سه‌بعدی آشفته سیال را به‌صورت متوسط‌گیری شده در عرض مدل می‌کنند، با دقت خوبی قابل استفاده می‌باشند. در صورتی که تغییرات در عرض نسبت به تغییرات در طول و ارتفاع ناچیز باشد، می‌توان از معادلات در عرض انتگرال‌گیری کرد و معادلات متوسط‌گیری شده در عرض رینولدز را به‌دست آورد. این معادلات مبنای کار بسیاری از مدل‌های متوسط‌گیری شده در عرض کیفیت مخازن سد می‌باشند.

در مدل CE-QUAL-W2 تغییرات سطح آب، سرعت آب و دما به‌صورت دینامیک قابل محاسبه بوده و این مدل در سامانه‌های مختلفی آبی از قبیل رودخانه، مخزن سد، دریاچه، مصب و ترکیب آن‌ها قابلیت به‌کارگیری را دارد. در این مدل از تغییرات عواملی مثل سرعت، دما و کیفیت آب در عرض مخزن صرف‌نظر شده است. این فرض برای مخازن و

دریاچه‌های پهن که از نظر کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در عرض دارای تغییرات قابل ملاحظه‌ای هستند، ممکن است مناسب نباشد (Wells, 2021).

پیش‌بینی فرایندهای کیفی شیمیایی و بیولوژیکی در سد وابسته به فرایندهای فیزیکی می‌باشد. چگالی آب تابعی از دما، املاح محلول و مواد معلق می‌باشد. اختلاط، تلاطم و تغییرات دما در واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی تأثیر قابل توجهی می‌گذارد. مفروضات ابعادی، داده‌های هواشناسی، هیدرولوژی، آبگذری (دبی ورودی و خروجی از توربین و سرریز)، داده‌های دما (دمای آب ورودی، دمای آب خروجی و اولیه مخزن) و داده‌های کیفیت اندازه‌گیری شده از جمله اطلاعات پایه‌ای برای مدل‌سازی هستند. جدول (۲) معادلات حاکم را پس از میانگین‌گیری عرضی برای شیب کانال صفر نشان می‌دهد.

Table 2. Summary of hydrodynamic equations (Cole & Wells, 2006)

Governing equation	Number	Discription
$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gB}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_{xz}}{\partial z}$	رابطه ۱)	x- momentum
$0 = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}$	رابطه ۲)	z-momentum
$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB$	رابطه ۳)	continuity
$\rho = f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ss})$	رابطه ۴)	density
$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB dz - \int_{\eta}^h qB dz$	رابطه ۵)	free surface

که در این روابط، U: سرعت افقی (m/s)، W: سرعت عمودی (m/s)، B: عرض کانال، P: فشار، η : سطح آب، τ_x : تنش برشی متوسط در جهت (x افقی)، τ_y : تنش برشی متوسط در جهت y (عمودی) است. تبادل گرمای سطحی می‌تواند به‌عنوان یک فرایند مرحله‌به‌مرحله با استفاده از محاسبات مستقیم انتقال میان سلول‌های مجاور با استفاده از رابطه زیر محاسبه شود:

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br}) \quad \text{رابطه ۶)}$$

که در آن، H_n : نرخ خالص تبادل گرما از طریق سطح آب، H_s : تابش خورشیدی با طول موج کوتاه، H_a : تابش خورشیدی با طول موج بلند، H_e : تابش خورشیدی موج کوتاه بازتابی، H_c : تابش خورشیدی موج بلند بازتابی، H_{sr} : بازتاب تابش خورشیدی از سطح آب، H_{ar} : دست‌دادن حرارت تبخیر و H_{br} : انتقال حرارت است. واحد همه متغیرها ($W.m^{-2}$) می‌باشد. تابش خورشیدی با طول موج کوتاه می‌تواند به‌طور مستقیم اندازه‌گیری شود یا از روابط زاویه‌های آفتاب و پوشش ابر محاسبه شود. هم‌چنین، تابش طول موج بلند جوی از دما و پوشش ابر یا فشار بخار هوا با استفاده از فرمول برون‌ت محاسبه می‌شود. عبارتهای سمت راست همگی وابسته به دمای سطح آب هستند. با توجه به جزئیات محاسباتی روابط مندرج، جهت کسب جزئیات دقیق فرمول‌ها به (Cole and Wells, 2006) مراجعه فرمایید. در حوضه مطالعات کیفیت آب، جلبک‌ها یکی از پارامترهای مهم در بررسی وضعیت کیفی و تغذیه‌گرایی دریاچه‌ها می‌باشند. پویایی مواد مغذی و جلبک به یکدیگر وابسته بوده و تنفس جلبکی و زوال، چرخه اصلی زنجیره‌ غذایی را تشکیل می‌دهد. در این پژوهش غلظت جلبک به‌صورت غلظت کلروفیل a بیان شده و معادله (۷) برای رشد جلبک در نظر گرفته شده است. تغییرات غلظت جلبک تابعی از رشد، تنفس، دفع، مرگ‌ومیر و ته‌نشینی است.

$$\frac{d\Phi_a}{dt} = \underbrace{K_{ag}\Phi_a}_{\text{growth}} - \underbrace{K_r\Phi_a}_{\text{respiration}} - \underbrace{K_{ae}\Phi_a}_{\text{excretion}} - \underbrace{K_{am}\Phi_a}_{\text{mortality}} - \underbrace{\omega_a \frac{\partial \Phi_a}{\partial z}}_{\text{settling}} \quad \text{رابطه ۷)}$$

که در این رابطه، z: ارتفاع سلول، K_{ag} : نرخ رشد جلبک (sec^{-1})، K_{ar} : نرخ تنفس تاریک جلبک (sec^{-1})، K_{ae} : نرخ دفع

جلبک (sec^{-1})، K_{am} : نرخ مرگومیر جلبک (sec^{-1})، ω_a : نرخ تنه‌نشینی جلبک (m sec^{-1}) و Φ_a : غلظت جلبک (g m^{-3}) است. اکسیژن یکی از عناصر مهم در زیست‌بوم‌های آبی است که می‌تواند سلامت عمومی سامانه‌های آبی را نشان دهد. CE-QUAL-W2 قابلیت مدل‌سازی فرایندهای هوازی و بی‌هوازی را دارد. اکسیژن محلول می‌تواند به‌عنوان متغیری در سیستم‌های آبی اندازه‌گیری شود که بیش‌ترین اطلاعات را در مورد وضعیت سامانه ارائه دهد (شکل ۲). معادله (۸)، اندرکنش اکسیژن محلول و متغیرهای کیفی لحاظ‌شده در مدل را نمایش می‌دهد. برای کسب اطلاعات بیش‌تر به مرجع مراجعه گردد.

$$\begin{aligned} \frac{dDO}{dt} = & \left(K_{ag} - K_{ar} \right) \delta_{OMa} \Phi_a + A_{sur} K_L \left(\Phi'_{DO} - \Phi_{DO} \right) - K_{RPOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{RPOM} \\ & - K_{LPOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{LPOM} - K_{LDOM} \gamma_{OM} \delta_{OM} \Phi_{LDOM} - K_{RDOM} \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{RDOM} \\ & - K_s \delta_{OM} \gamma_{OM} \Phi_{sed} - SOD \gamma_{OM} \frac{A_{sed}}{V} - \sum K_{CBOD} R_{CBOD} \Theta^{T-20} \Phi_{CBOD} \\ & - K_{NH4} \delta_{NH4} \gamma_{NH4} \Phi_{NH4} + \sum \gamma_{zoo} K_{zr} \delta_{OMoo} \Phi_{zoo} \end{aligned} \quad (8)$$

که در آن، δ_{OMa} : ضریب استوئیومتریکی اکسیژن برای ماده آلی جلبک‌ها، δ_{OM} : ضریب استوئیومتریکی اکسیژن برای ماده آلی، δ_{NH4} : ضریب استوئیومتریکی اکسیژن برای نیتریفیکیشن، δ_{Omzoo} : ضریب استوئیومتریکی اکسیژن برای زئوپلانکتون، γ_{NH4} : ضریب ضربه دما برای نیتریفیکیشن، γ_{OM} : ضریب ضربه دما برای تجزیه ماده آلی، γ_{Zoo} : ضریب ضربه دما برای زئوپلانکتون، R_{BOD} : تبدیل از CBOD در مدل به CBOD نهایی، Θ : ضریب نرخ دما BOD، V : حجم سلول محاسباتی (مترمکعب)، T : دما، درجه سانتی‌گراد، A_{sed} : مساحت سطح رسوبات (مترمربع)، A_{sur} : مساحت سطح آب (مترمربع)، K_{ag} : نرخ رشد جلبک‌ها (S^{-1})، K_{ar} : نرخ تنفس تاریک جلبک‌ها (S^{-1})، K_{Zr} : نرخ تنفس زئوپلانکتون (S^{-1})، K_{NH4} : نرخ تجزیه آمونیاک (S^{-1})، K_{LDOM} : نرخ تجزیه DOM ناپایدار (S^{-1})، K_{RDOM} : نرخ تجزیه DOM پایدار (S^{-1})، K_{LPOM} : نرخ تجزیه POM قابل تجزیه (S^{-1})، K_{RPOM} : نرخ تجزیه POM پایدار (S^{-1})، K_{BOD} : نرخ تجزیه CBOD (S^{-1})، K_{sed} : نرخ تجزیه رسوبات (S^{-1})، SOD: تقاضای اکسیژن سطحی رسوبات ($\text{g m}^{-2} \text{sec}^{-1}$)، K_L : نرخ تبادل برای اکسیژن (متر بر ثانیه)، Φ_{NH4} : غلظت آمونیاک-نیتروزن (g m^{-3})، Φ_a : غلظت جلبک‌ها (g m^{-3})، Φ_{zoo} : غلظت زئوپلانکتون (g m^{-3})، Φ_{LDOM} : غلظت DOM قابل تجزیه (g m^{-3})، Φ_{RDOM} : غلظت DOM پایدار (g m^{-3})، Φ_{LPOM} : غلظت POM قابل تجزیه (g m^{-3})، Φ_{RPOM} : غلظت POM ناپایدار (g m^{-3})، Φ_{BOD} : غلظت CBOD (g m^{-3})، Φ_{sed} : غلظت رسوبات آلی (g m^{-3})، Φ_{DO} : غلظت اکسیژن محلول (g m^{-3}) و Φ'_{DO} : غلظت اکسیژن اشباع (g m^{-3}) می‌باشند.

اطلاعات مربوط به هندسه مخزن شامل مقدار فواصل طولی، ارتفاع اولیه آب (رقوم نرمال بهره‌برداری)، جهت‌گیری مقاطع نسبت به شمال، فاصله‌های عمودی شبکه، اصطکاک در کف و میانگین عرض هر المان می‌باشد. شکل هندسی مخزن سد استقلال بعد از ساده‌سازی به یک شاخه اصلی با ۳۲ المان طولی تقسیم شد. عمق مخزن نیز به ۳۰ لایه که هر کدام عمقی معادل ۲ متر دارند تقسیم گردید. عرض المان‌های طولی در لایه‌های مختلف عمقی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی تهیه شده است. شکل (۲)، نمایی از مدل هندسی مخزن سد میناب را نشان می‌دهد.

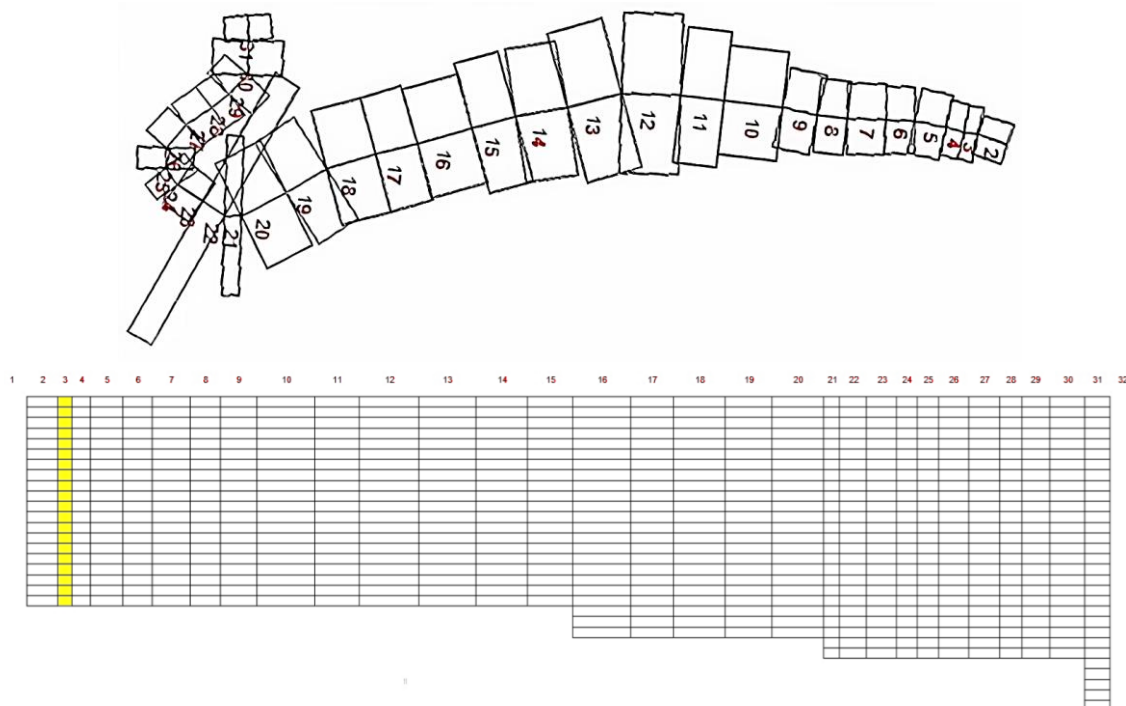


Figure 2. Bathymetry map of Esteghlal reservoir

زمان پایه مدل، یک دوره پنج ساله از بهمن‌ماه سال ۱۳۹۳ برای شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفی به صورت روزانه (۱۵۷۰ روز) در نظر گرفته شده است. ضخامت یخ نیز با در نظر داشتن موقعیت جغرافیایی طرح، برابر صفر است. نوع آب معرفی شده شیرین می‌باشد.

۳.۲. واسنجی مدل

در واسنجی مدل، ابتدا هیدرودینامیک و هندسه مخزن واسنجی و صحت‌سنجی شده و بعد از اتمام این بخش، دما و اکسیژن محلول واسنجی می‌گردد. در ادامه، دوباره هیدرودینامیک مخزن کنترل شده تا در صورت نیاز، واسنجی و صحت‌سنجی روی آن صورت گیرد. متوسط خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطا به عنوان معیارهای واسنجی استفاده گردید (روابط ۹ و ۱۰).

$$AME = \frac{\sum |predicted - observed|}{number\ of\ observations} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum |predicted - observed|^2}{number\ of\ observations}} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

۳. نتایج و بحث

۳.۱. واسنجی و صحت‌سنجی

برای توسعه مدل هیدرودینامیک و واسنجی آن، اطلاعاتی از بین داده‌های نمونه‌گیری و جمع‌آوری شده بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ انتخاب شد و واسنجی هیدرودینامیک مدل در دو مرحله واسنجی هندسه مخزن و واسنجی ارتفاع سطح آب صورت پذیرفت. واسنجی هندسه مخزن به معنای کاهش حداکثری اختلاف میان حجم و سطح شبیه‌سازی شده با حجم و سطح

مشاهداتی مخزن در کلیه رقوم ارتفاعی است. به همین منظور نمودارهای حجم-سطح-ارتفاع حاصل از نتایج شبیه‌سازی رسم گردید و با داده‌های سد استقلال مقایسه شد (شکل ۳). به منظور تنظیم ارتفاع سطح آب با سطح آب مشاهداتی، دبی ورودی و خروجی به مخزن اصلاح شد. در فرایند واسنجی، فایل هندسه اصلاح و در بازه مجاز قرار گرفت. در مرحله واسنجی دمایی، ضرایب تأثیرگذار بر دما در مدل شامل لزجت طولی، پخش طولی، ضریب شزی یا مانینگ، تأثیر باد، جذب تابش خورشید و کاهش نور تنظیم می‌شوند. شکل (۴)، نتایج حاصل از توسعه مدل اولیه و واسنجی را برای شش زمان مختلف برای قطعه طولی شماره ۲۵ نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در بیش‌تر ماه‌ها به‌استثنای بهمن‌ماه ۱۳۹۶ و خردادماه ۱۳۹۷، مقدار خطای مطلق کاهش قابل‌ملاحظه‌ای یافته است. بر این اساس، تغییرات افزایشی خطا در این دو ماه قابل پذیرش خواهد بود. جدول (۳)، مقادیر خطای مدل را برای متغیرهای تعیین‌شده نمایش می‌دهد.

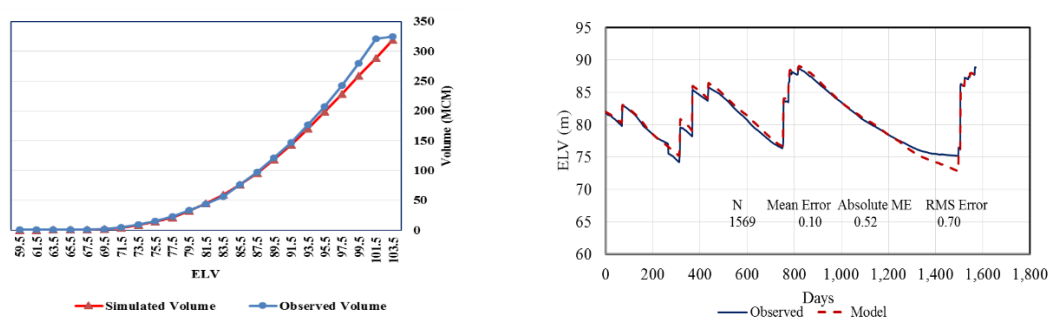


Figure 3. Water level and the volume-Elevation calibration of the Esteghlal dam

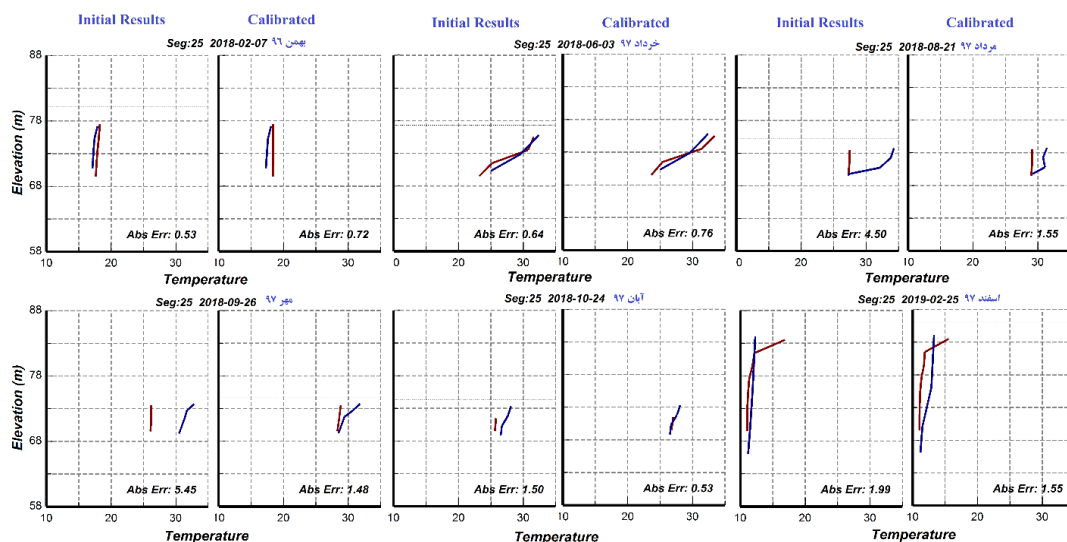


Figure 4. Water temperature calibration

Table 3. Mean absolute error (MAE) and root mean square error (REMS) of calibration

Variable	MAE	REMS
Bathymetry	0.21	0.54
Volume	0.66	0.84
Water level	0.53	0.7
Temperature	0.81	0.92
Dissolved oxygen	0.58	0.72
Nitrate	1.1	1.4
Phosphate	1.23	1.55

۲.۳. شبیه‌سازی کیفی مخزن

در این پژوهش، شبیه‌سازی مخزن سد از تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۱۰ لغایت ۱۳۹۸/۰۱/۳۰ به مدت پنج سال به صورت روزانه انجام شد. هدف اصلی این شبیه‌سازی معطوف به بررسی تغییرات پارامترهای تأثیرگذار بر کیفیت آب سد شامل اکسیژن محلول و چرخه غذایی می‌باشد. با توجه به ویژگی‌های سد استقلال مبنی بر تغییرات زیاد فصلی حجم آب ذخیره‌شده در سد، بررسی شرایط کیفی به صورت فصلی صورت خواهد گرفت. ذکر این نکته قابل توجه است که بیش‌ترین میزان تأمین آب در سد به واسطه وقوع سیلاب‌های کوچک و بزرگ از بهمن‌ماه تا اردیبهشت‌ماه صورت می‌پذیرد. پیش از بررسی فصلی، وضعیت دمای آب و اکسیژن محلول در مخزن سد برای مقطع طولی ۳۰ و لایه‌های ۲۰، ۲۳ و ۲۶ به‌عنوان رولایه، ترموکالین و زیرلایه بررسی می‌گردد (شکل ۵). همچنین، تغییرات روزانه فسفات، آمونیوم و جلبک در مقطع طولی ۳۰ و لایه ۲۳ تحلیل می‌شود.

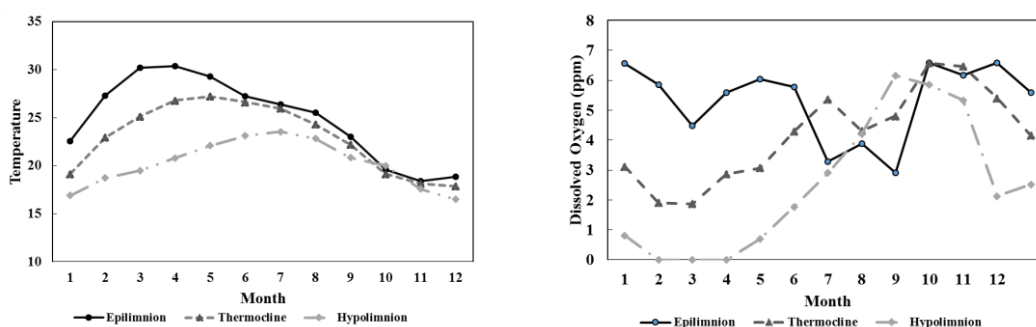


Figure 5. Long-term monthly average of temperature and dissolved oxygen in different depths of Esteghlal reservoir

مطابق شکل مشاهده می‌گردد، از فروردین‌ماه تا شهریورماه مخزن دارای لایه‌بندی حرارتی بوده، به نحوی که اختلاف دمایی حدود ۶ درجه میان زیرلایه و رولایه در بهار وجود دارد. بیش‌ترین دمای آب در تیرماه ثبت شده و به تدریج دمای آب تا اواخر پاییز شروع به کاهش می‌نماید. از شهریورماه تا آذرماه، دمای آب در رولایه و ترموکالین نزدیک شده و مخزن آماده اختلاط کامل می‌شود که این موضوع به دلیل کاهش حجم آب و سرد شدن تدریجی دما می‌باشد.

شکل (۶) نمودار تعدیل‌شده غلظت مواد مغذی آمونیوم و فسفات را به همراه جلبک نمایش می‌دهد. مطابق شکل مشاهده می‌گردد که غلظت مواد مغذی در مخزن معمولاً در بهار به دلیل وقوع سیلاب‌ها و افزایش قابل توجه آورد رودخانه، افزایش می‌یابد. با افزایش غلظت مواد مغذی، غلظت فیتوپلانکتون‌ها افزایش یافته به نحوی که می‌تواند موجب کنترل رشد آمونیوم و فسفات می‌شود. رشد جلبک در مردادماه سال ۹۷، همراه با کاهش حجم آب مخزن منجر به وقوع شکوفایی جلبکی می‌گردد.

۳.۳. تحلیل وضعیت سد در فصل بهار

با عنایت به تغییرات دوره‌ای در مخزن سد، پارامترهای دما، اکسیژن محلول، جلبک، نیتрат-نیتريت، فسفات و آمونیوم برای ماه بهار مورد بررسی قرار خواهند گرفت. شکل (۷) تغییرات غلظت متغیرهای مورد مطالعه در مخزن سد در روزهای ۱۲۰، ۴۸۵، ۸۵۱ و ۱۲۱۶ شبیه‌سازی (اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) را نشان می‌دهد. مطابق انتظار، اختلاف دمای بین زیرلایه و رولایه زیاد بوده و با توجه به نزدیکی لایه سطحی به هوای آزاد، دما در این لایه نزدیک به دمای محیط بوده و با حرکت به سمت عمق این دما کاهش می‌یابد. نکته قابل ملاحظه دیگر، حجم کم آب موجود در مخزن است که آب را در تراز ۸۲ نمایش می‌دهد.

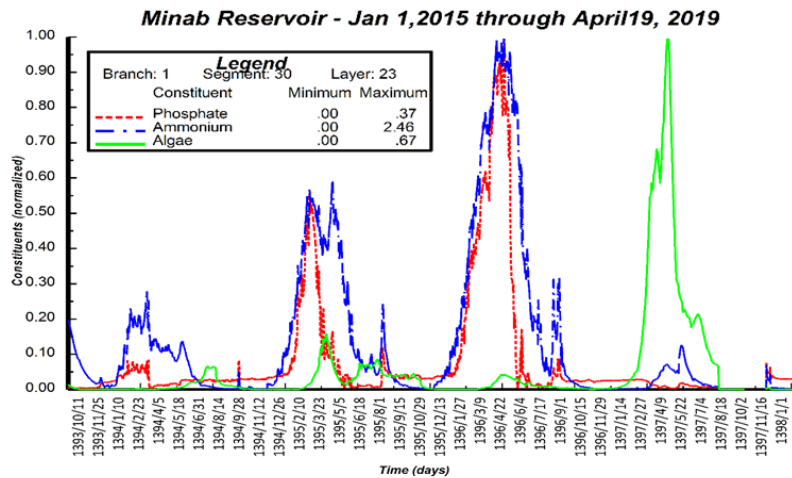


Figure 6. Concentration of phosphate, ammonium and algae in Esteghlal reservoir

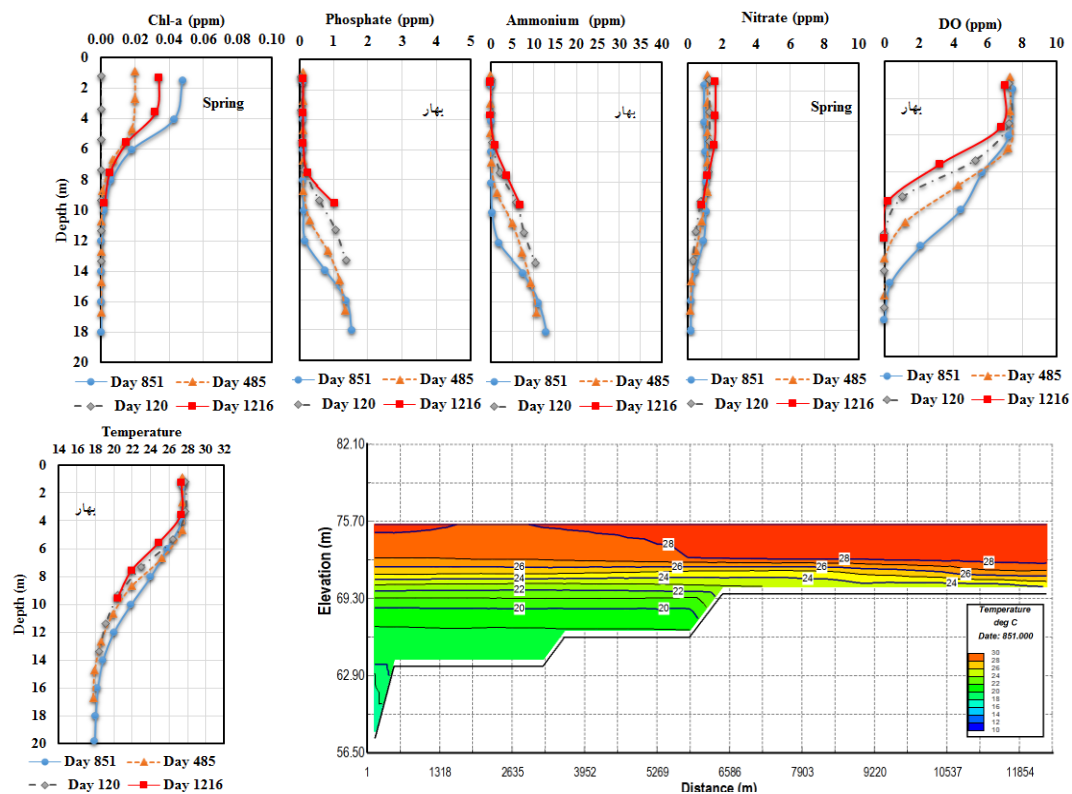


Figure 7. Water temperature, dissolved oxygen, algae, phosphate, ammonium and nitrate on days 120, 458, 851 and 1216 of simulation

میزان غلظت اکسیژن محلول در آب تابعی از دمای هوا و فشار است، به گونه‌ای که اکسیژن در آب گرم نسبت به آب سرد از حلالیت کمتری برخوردار است. در شکل (۷) مشاهده می‌گردد که تفاوت قابل توجهی در میزان غلظت اکسیژن در سطح و عمق مخزن وجود دارد. در لایه‌های بالایی (نزدیک سطح آب) غلظت اکسیژن محلول در حدود ۸

میلی‌گرم بر لیتر بوده که این مقدار در کف مخزن به صفر میلی‌گرم بر لیتر کاهش می‌یابد. از عوامل مؤثر در این کاهش غلظت می‌توان به مصرف اکسیژن جهت تجزیه جلبک‌ها، عدم وزش باد جهت ایجاد اختلاط قائم، لایه‌بندی حرارتی و آورد ناچیز رودخانه در این سد اشاره نمود. همچنین به دلیل مجاورت لایه سطحی با هوای آزاد این لایه از پتانسیل بیش‌تری برای جذب اکسیژن برخوردار است که این عامل تأثیری بر لایه‌های عمیق‌تر ندارد. می‌توان مشاهده کرد که از عمق حدوداً ۸ متری تا کف مخزن شرایط بی‌هوایی بر مخزن سد حاکم می‌باشد. همچنین، روند تغییرات اکسیژن محلول و عمق آب از روز ۱۲۰ تا ۱۲۱۶ به صورت کاهشی است.

نور خورشید، دمای هوا، غلظت اکسیژن و مواد مغذی از جمله مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در رشد جلبک‌ها در محیط‌های آبی می‌باشند. با توجه به برقراری شرایط مساعد دمایی در این فصل از سال و حضور عوامل فوق در لایه‌های سطحی تجمع جلبک‌ها در این لایه قابل پیش‌بینی بوده و همچنین، محدودیت ورود نور آفتاب به دلیل افزایش کدورت در عمق آب موجب محدودیت در رشد جلبک در لایه‌های پایینی می‌شود. بیش‌ترین میزان غلظت جلبک در مخزن در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۶ (روز ۸۵۱) به میزان ۰/۰۵ میلی‌گرم بر لیتر بوده که اثر آن بر کاهش غلظت مواد مغذی قابل مشاهده است. با کاهش غلظت جلبک و تجزیه آن در لایه‌های تحتانی شاهد افزایش غلظت مواد مغذی هستیم. بیش‌ترین غلظت آمونیوم و نترات در روز ۸۵۱ در لایه انتهایی مخزن سد و نزدیک بستر اتفاق افتاده است. از نظر تغذیه‌گرایی برحسب نترات می‌توان مخزن سد را در کلاس شاداب تا تغذیه‌گرایی کم طبقه‌بندی نمود. میزان آمونیوم موجود در آب سد قابل توجه نبوده و غلظت آن در بیش‌تر قسمت‌های سد کم‌تر از یک میلی‌گرم بر لیتر است که در محدوده استاندارد ارائه‌شده سازمان محیط‌زیست در محیط‌های آبی می‌باشد. لیکن، دلیل این امر می‌تواند تغذیه جلبک از این ماده مغذی معرفی گردد. در ناحیه کف مخزن سد این میزان اندکی بالاتر از حد مجاز است که می‌تواند به دلیل ایجاد شرایط بی‌هوایی در کف مخزن سد، اندرکنش رسوبات کف و تجزیه توده بیولوژیکی بوده و باعث افزایش غلظت آمونیوم محلول و تأثیرگذاری آن تا تراز ۷۵ متری از سطح دریا می‌گردد.

غلظت فسفات با حرکت به سمت عمق افزایش پیدا کرده و از مقدار تقریبی صفر در سطح تا میزان دو میلی‌گرم بر لیتر در کف مخزن افزایش می‌یابد. مقدار اندک آب ورودی به مخزن، افزایش دما، لایه‌بندی حرارتی، مصرف فسفات توسط جلبک در رولایه، تجزیه توده جلبکی در زیرلایه و بازتوزیع فسفر از رسوب تحت شرایط بی‌هوایی از جمله دلایل افزایش غلظت این متغیر در زیرلایه هستند. از نظر تغذیه‌گرایی براساس غلظت فسفات می‌توان دریاچه سد را در کلاس تغذیه‌گرایی زیاد تا تغذیه‌گرایی حاد طبقه‌بندی نمود. تغییرات غلظت آمونیوم مشابه فسفات است. در ناحیه کف مخزن سد این میزان افزایش قابل توجهی دارد که می‌تواند به دلیل ایجاد شرایط بی‌هوایی در کف مخزن سد، اندرکنش رسوبات کف و تجزیه توده بیولوژیکی باشد.

۴.۳. تحلیل وضعیت سد در فصل تابستان

شکل (۸) تغییرات غلظت متغیرهای کیفی و دما را در مخزن سد در روزهای ۲۱۸، ۵۸۳، ۹۴۹ و ۱۳۱۴ شبیه‌سازی (مردادماه ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) را نشان می‌دهد. اختلاف دمای بین زیرلایه و رو لایه در بیش‌ترین حالت برابر ۱۰ درجه سانتی‌گراد بوده که لایه‌بندی کامل حرارتی را نمایش می‌دهد. نکته قابل توجه این است که در روز ۱۳۱۴، حجم مخزن بیش‌ترین کاهش را تجربه کرده و با توجه به دمای بالا و عمق کم، تقریباً تمام ۸ متر هم دما شده‌اند. غلظت اکسیژن محلول در مخزن سد در رولایه و زیر لایه کاملاً متفاوت است. در رولایه، تقریباً در تمام سال‌ها در محدوده ۵ تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر قرار دارد، درحالی‌که زیر لایه در وضعیت بی‌هوایی است. بیش‌ترین میزان توده جلبکی در سد

استقلال در تابستان پدیدار می‌گردد که علت آن دمای بالای هوا، عدم ورود آب به مخزن سد، لایه‌بندی حرارتی، وجود مواد مغذی کافی و زمان ماند بالای آب است. غلظت جلبک در مردادماه سال ۱۳۹۷ حدود ۰/۱۶ میلی‌گرم بر لیتر بوده که در نزدیکی بستر مخزن به توجه به محدودیت نور کاهش می‌یابد. غلظت مواد مغذی نسبت به بهار افزایش داشته، لیکن تغییرات آن در عمق مشابه با تغییرات مواد مغذی در بهار است. مقدار فسفات در زیرلایه به بیش‌ترین میزان در حدود ۵ میلی‌گرم بر لیتر رسیده است که تجزیه توده جلبکی و باز توزیع فسفر از رسوب می‌توانند از مهم‌ترین دلایل آن محسوب گردند. در تابستان مخزن سد به‌طور کامل در وضعیت تغذیه‌گرایی قرار گرفته است.

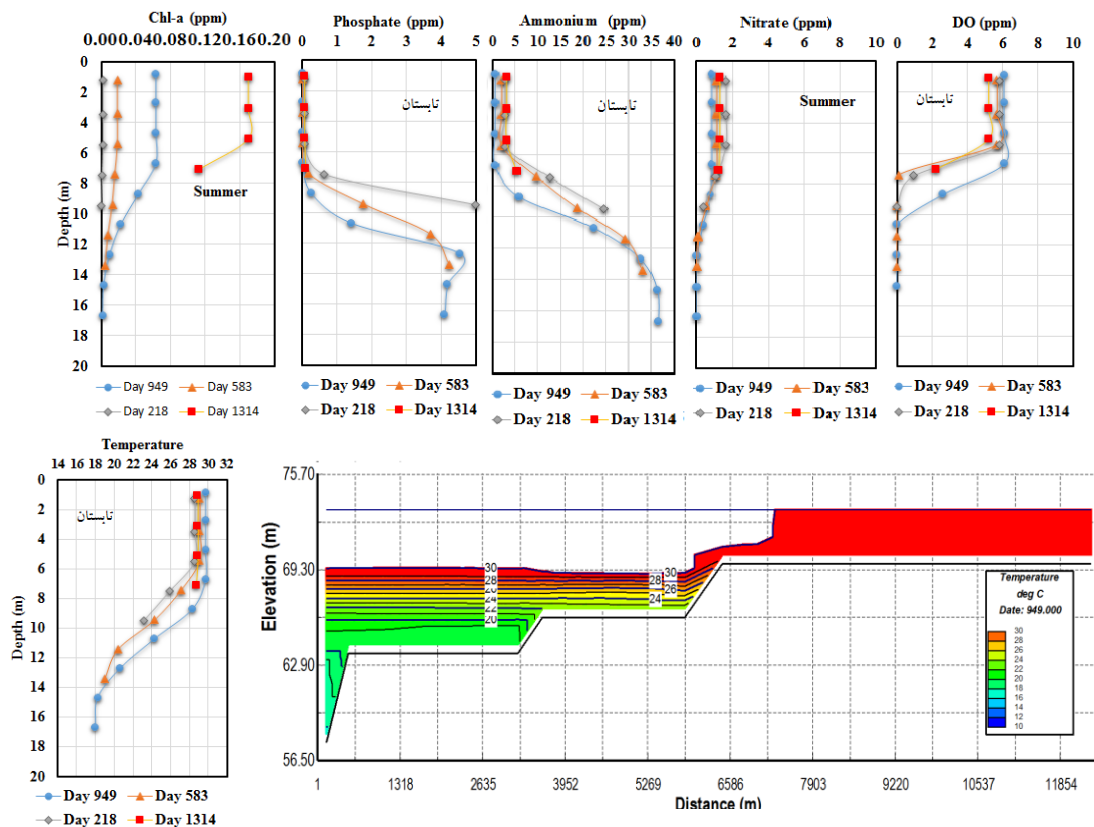


Figure 8. Water temperature, dissolved oxygen, algae, phosphate, ammonium and nitrate on days 218, 583, 949 and 1314 of simulation

۵.۳. تحلیل وضعیت سد پاییز

به دلیل عدم وجود جریان ورودی قابل توجه و هم‌زمانی آن با افزایش تبخیر در دوره گرم سال، در پاییز میزان آب موجود در مخزن سد کاهش می‌یابد. این کاهش عمق و از طرفی خنک شدن هوا، باعث از بین رفتن لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد گردیده و پتانسیل اختلاط کامل در مخزن سد را بالا می‌برد. شکل (۹) تغییرات غلظت متغیرهای کیفی و دما را در مخزن سد در روزهای ۳۱۰، ۶۷۵، ۱۰۴۱ و ۱۴۰۶ شبیه‌سازی (آبان‌ماه ۱۳۹۴، ۱۳۹۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۷) را نشان می‌دهد. همان‌طور که قابل مشاهده است دمای آب مخزن بین ۲۲ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با توجه به افزایش عمق آب در سال ۱۳۹۶، بیش‌ترین اختلاف دما در لایه‌های بالایی و نزدیکی بستر مربوط به این سال است که موجب تغییراتی در روند رفتاری متغیرها در این سال نسبت به سال‌های دیگر می‌شود.

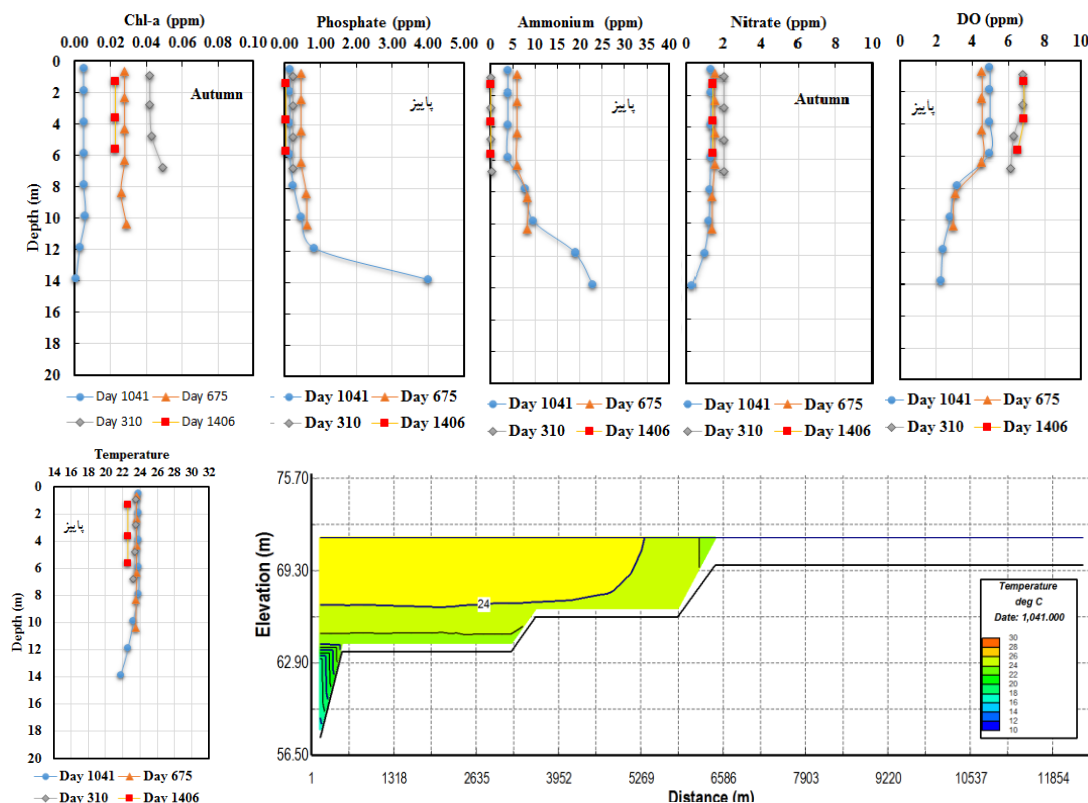


Figure 9. Water temperature, dissolved oxygen, algae, phosphate, ammonium and nitrate on days 310, 675, 1041 and 1406 of simulation

وضعیت غلظت اکسیژن محلول در سد تحت تأثیر هوادهی سطحی و اختلاط مخزن است. بازه تغییرات اکسیژن محلول که در این فصل بین ۴-۷ میلی‌گرم بر لیتر در رولایه بوده که نسبت به دامنه تغییرات در بهار (حدود ۱-۶ میلی‌گرم بر لیتر) بهبود یافته است. از جمله تغییرات دیگری که نسبت به فصل بهار می‌توان مشاهده کرد عدم وجود لایه بی‌هواری در کف مخزن سد می‌باشد که در توضیح آن می‌توان به کاهش عمق مخزن و انتقال اکسیژن از سطح به کف به واسطه اختلاط اشاره نمود. با توجه به کاهش دما و کاهش حجم آب، افزایش حضور جلبک در تمامی قسمت‌های سد قابل پیش‌بینی بوده که کاملاً در نمودار غلظت جلبک‌ها قابل مشاهده است. تغییرات غلظت فسفات به‌استثنای سال ۹۶، با توجه به بهبود حجم آب و مصرف جلبکی در محدوده کوچک‌تری نسبت به دوره قبل بوده، با این وجود، مخزن سد از نظر تغذیه‌گرایی در محدوده تغذیه‌گرایی متوسط طبقه‌بندی می‌گردد.

کاهش غلظت نیترات-نیتريت در مخزن سد نسبت به تابستان مشهود بوده که با توجه به بهبود حجم آب مخزن سد قابل پیش‌بینی بود. براساس طبقه‌بندی دریاچه‌ها از منظر تغذیه‌گرایی با توجه به بازه تغییرات نیترات در مخزن سد که از ۰/۸ در کف تا میزان ۲ میلی‌گرم بر لیتر در سطح متغیر است، می‌توان سد استقلال را در این بازه زمانی در کلاس تغذیه‌گرایی متوسط تا زیاد طبقه‌بندی نمود.

۶.۳. نتایج مدل‌سازی مخزن سد زمستان

شکل (۱۰) تغییرات متغیرهای مورد مطالعه در فصل زمستان را نمایش می‌دهد. با توجه به وقوع سیلاب‌ها در فصل

زمستان، معمولاً ذخیره آب در این فصل نسبت به زمان‌های دیگر مناسب است. متأسفانه حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد استقلال در اکثر روزهای سال کم‌تر از این مقدار است. افزایش حجم آب ذخیره‌شده در پشت سد موجب افزایش سطح دریاچه سد نیز شده است. قسمت کم‌عمق‌تر سد که در اکثر سال خالی از آب می‌باشد در این زمان آب‌گیری شده و از نظر دمایی، مخزن سد با توجه به ورود آب و کاهش دما در حالت اختلاط کامل قرار دارد.

با افزایش حجم آب ورودی وضعیت اکسیژن محلول در شرایط مناسب‌تری نسبت به فصول خشک قرار دارد. کم‌ترین مقدار اکسیژن محلول در عمق مخزن برابر ۴ میلی‌گرم بر لیتر بوده و بیش‌ترین غلظت حدود ۸ میلی‌گرم بر لیتر است. با افزایش عمق شاهد کاهش اندک اکسیژن محلول بوده و حضور جلبک‌ها نیز به میزان قابل‌توجهی کاهش یافته است. با مقایسه میزان نیترات با حالت‌های قبل می‌توان به افزایش غلظت نیترات به دلیل جریان ورودی به سد از رودخانه بالادست و تجزیه فیتوپلانکتونی اشاره نمود. غلظت فسفات و آمونیوم نسبت به ادوار گذشته کاهش یافته که دلیل آن اختلاط کامل مخزن و ورود جریان جدید است.

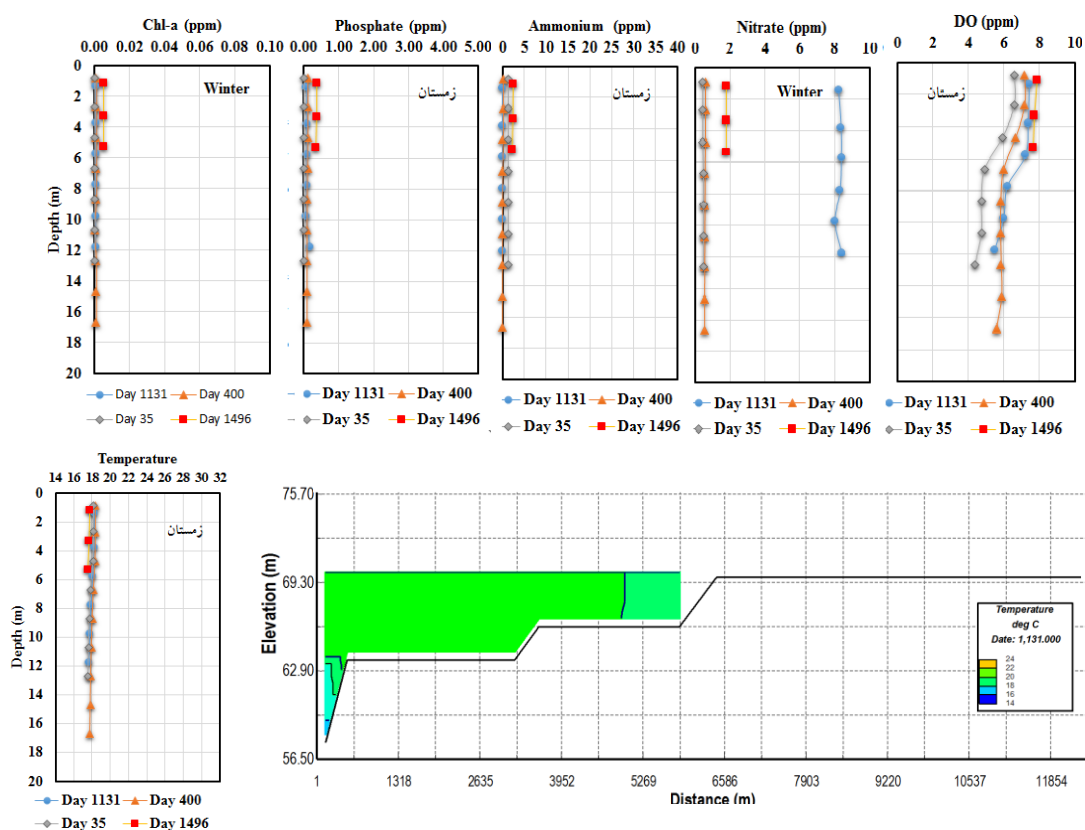


Figure 10. Water temperature, dissolved oxygen, algae, phosphate, ammonium and nitrate on days 35, 400, 1131 and 1496 of simulation

۷.۳. ارزیابی ماهانه وضعیت تغذیه‌گرایی

وضعیت‌های تغذیه‌گرایی مختلف می‌توانند تأثیرات اکولوژیکی و محیطی معنی‌داری داشته باشند. بنابراین درک وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن برای مدیریت منابع آب و حفظ محیط زیست بسیار حیاتی است. شکل (۱۱) وضعیت مخزن سد را برای سه متغیر اساسی فسفر کل، کلروفیل a و درصد اشباع اکسیژن محلول زیر لایه در قطع طولی ۳۰ و لایه انتهایی

برای ۵۲ ماه نشان می‌دهد. ذکر این نکته دارای اهمیت است که جهت جلوگیری از عدم خوانش نمودار، وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن با فاصله زمانی سه ماه برچسب‌گذاری شده است. جدول (۴) فراوانی سطوح تغذیه‌گرایی در ماه‌های شبیه‌سازی شده را نمایش می‌دهد.

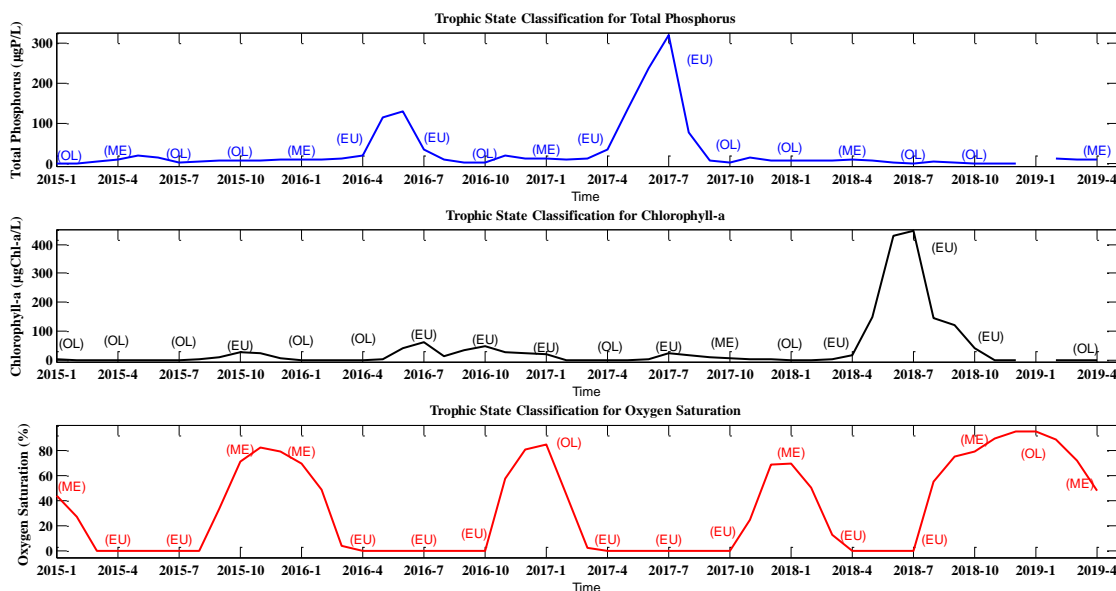


Figure 11. Monthly eutrophication level (oligotrophic (OL), mesotrophic (ME) and eutrophic (EU)) of the reservoirs

Table 3. Frequency of eutrophication levels for each month during simulation period

Variable	Oligotrophic	Mesotrophic	Eutrophic
Total phosphorus (µg/L)	25	16	11
Chlorophyll a (µg/L)	27	4	21
Hypolimnion oxygen (% saturation)	7	19	26
Total Frequency	59	39	58

مطابق جدول مشاهده می‌گردد که بیش‌ترین فراوانی در ماه‌ها مربوط به سطح شاداب^۱ است. بر مبنای فسفر کل و غلظت جلبک، مخزن در حدود نیمی از ماه‌ها در وضعیت شاداب قرار دارد. نکته قابل‌توجه این است که براساس غلظت جلبک تقریباً در ماه‌هایی که مخزن در وضعیت شاداب نبوده، در شرایط مغذی^۲ قرار داشته است. براساس شاخص درصد اشباع اکسیژن محلول زیر لایه، مشاهده می‌گردد که در ۵۰ درصد مواقع مخزن در شرایط تغذیه‌گرایی کامل و در کل در ۸۶ درصد مواقع در وضعیت مغذی‌شدن قرار دارد. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد، مخزن سد از مواد مغذی غنی بوده و پتانسیل تغذیه‌گرایی و شکوفایی جلبکی وجود دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، وضعیت کیفیت آب مخزن سد استقلال با هدف مطالعه پتانسیل تغذیه‌گرایی از تاریخ ۱۳۹۳/۱۱/۱۰ لغایت ۱۳۹۸/۰۱/۳۰ به‌صورت روزانه بررسی شد. برای این منظور، مدل شبیه‌سازی دو بعدی مخزن سد جهت مطالعه

1. Oligotrophic
2. Eutrophic

تغییرات متغیرهای تأثیرگذار بر کیفیت آب سد شامل دما، اکسیژن محلول، جلبک، فسفات، آمونیوم، نیترات و ... توسعه یافت. با توجه به تأمین آب سد به واسطه وقوع سیلاب‌های کوچک و بزرگ، حجم آب ذخیره‌شده در سد دارای تغییرات زیادی است. این موضوع لزوم مطالعه فصلی شرایط کیفی مخزن را بیش‌ازپیش آشکار می‌نماید. بر این اساس، وضعیت سد استقلال به صورت فصلی صورت پذیرفت.

تحلیل بلندمدت وضعیت لایه‌بندی حرارتی در مخزن نشان می‌دهد که از فروردین‌ماه تا شهریورماه مخزن دارای لایه‌بندی حرارتی بوده به نحوی که اختلاف دمایی حدود ۶ درجه میان زیرلایه و رولایه در بهار وجود دارد. همچنین، بیش‌ترین دمای آب در تیرماه ثبت شده و به تدریج دمای آب تا اواخر پاییز شروع به کاهش می‌نماید. از شهریورماه تا آذرماه، دمای آب در رولایه و ترموکلاین نزدیک شده و مخزن آماده اختلاط کامل می‌شود که این موضوع به دلیل کاهش حجم آب و سردشدن تدریجی دما می‌باشد. بنابراین می‌توان استنباط نمود که در تحلیل بلندمدت میانگین دمایی مخزن، دوره لایه‌بندی حرارتی حدود شش تا هفت ماه است. این موضوع با نتایج حاصل از مطالعه (Moridi, 2023)، مبنی بر حاکم‌شدن شرایط لایه‌بندی در ۱۰ ماه (اواخر زمستان تا پایان پاییز) در سد استقلال متفاوت است. مهم‌ترین دلیل این موضوع حجم ذخیره آب در مخزن سد در سال ۱۳۹۸ بوده که در آن سال وضعیت آب موجود مطلوب بوده است. لیکن، در یک دوره پنج‌ساله با توجه به کاهش شدید حجم آب، شرایط لایه‌بندی در پاییز کم‌تر مشاهده شده است. نتایج بررسی لایه‌بندی حرارتی در سد درودزن نشان از لایه‌بندی زمستان و تابستان دارد (Khalaf and Noshadi, 2018). مطالعات صورت گرفته بر روی سدهای مختلف از جمله سد مارون، سد ماملو، سیمره و سد تهم زنگان نیز این موضوع را تأیید می‌نماید (Nori-najafi et al., 2019; Rezaei Barandagh et al., 2018; Shabani et al., 2019; Zohra Vand, 2014).

تحلیل وضعیت سد در فصل بهار نشان داد که مخزن دارای لایه‌بندی حرارتی بوده به نحوی که دما در لایه‌های مختلف مخزن تغییرات معنی‌داری داشته و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. همچنین، غلظت اکسیژن محلول در سطح و عمق مخزن تفاوت‌های زیادی داشته و در لایه‌های بالایی بیش‌تر است. این اختلافات در غلظت اکسیژن به عواملی مانند مصرف اکسیژن توسط جلبک‌ها، عدم وجود وزش باد، لایه‌بندی حرارتی و کمبود آب ورودی به سد برمی‌گردد. همچنین، در بهار، غلظت جلبک‌ها افزایش می‌یابد که به دلیل شرایط مساعد دمایی، وجود مواد مغذی و محدودیت نور آفتاب در عمق مخزن ایجاد می‌شود. براساس غلظت فسفات و آمونیوم، مخزن سد در کلاس شاداب تا تغذیه‌گرایی متوسط دسته‌بندی می‌شود و افزایش فسفات و آمونیوم در عمق مخزن تأثیرگذار در افزایش مواد مغذی در لایه‌های پایینی مخزن دارد.

اختلاف دما بین زیرلایه و رولایه تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد در فصل تابستان نشان‌دهنده لایه‌بندی حرارتی کامل است. غلظت اکسیژن محلول در رولایه و زیر لایه کاملاً متفاوت بوده به صورتی که غلظت اکسیژن در رولایه دارای مقادیر بین ۴ تا ۶ میلی‌گرم بر لیتر بوده، درحالی‌که وجود شرایط بی‌هوازی در زیر لایه حاکم است. بیش‌ترین میزان توده جلبکی در تابستان است که علت آن شرایط مخزن شامل دمای بالا، عدم ورود آب به مخزن سد، لایه‌بندی حرارتی و مواد مغذی کافی در مخزن می‌باشد. غلظت جلبک در این فصل در نزدیکی بستر مخزن به دلیل کاهش نور آفتاب کاهش می‌یابد. همچنین، غلظت مواد مغذی نسبت به بهار افزایش یافته و تغییرات آن در عمق مشابه با تغییرات مواد مغذی در بهار است. غلظت بالاتر فسفات در زیرلایه به علت تجزیه توده جلبکی و بازتوزیع فسفر از رسوب است و مخزن سد به‌طورکلی در تابستان در وضعیت تغذیه‌گرایی قرار دارد. در پاییز، به علت کاهش جریان ورودی آب و افزایش تبخیر در دوره گرم سال، حجم آب موجود در مخزن سد کاهش می‌یابد. این کاهش عمق آب باعث کاهش لایه‌بندی حرارتی شده و پتانسیل اختلاط در مخزن سد را افزایش می‌دهد. در زمستان، به دلیل سیلاب‌ها، حجم آب ذخیره‌شده در مخزن سد

افزایش می‌یابد و وضعیت اکسیژن محلول بهبود می‌یابد. در فصل زمستان، ورود جریان جدید به سد و افزایش حجم آب ذخیره‌شده باعث افزایش غلظت نیترات می‌شود. همچنین، غلظت فسفات و آمونیوم نسبت به دوره‌های قبلی کاهش می‌یابد که دلیل آن اختلاط کامل مخزن و ورود جریان جدید است.

براساس معیارهای ارزیابی وضعیت تغذیه‌گرایی، می‌توان مشاهده نمود که مخزن سد دارای پتانسیل تغذیه‌گرایی و شکوفایی جلبکی است. لیکن، این موضوع به‌واسطه شرایط بسیار متغیر جریان‌های ورودی، زمان‌ماند بسیار بالای سد، تبخیر زیاد، باز توزیع مواد مغذی از رسوب و لایه‌بندی حرارتی برای متغیرهای مختلف متفاوت می‌باشد. به‌عنوان نمونه وضعیت مغذی بودن مخزن سد نسبت به متغیر فسفر کل و جلبک بیش‌تر در شرایط کم‌تر مغذی قرار دارد. اما بر مبنای درصد اشباع اکسیژن محلول در زیر لایه، مخزن در وضعیت مغذی در اکثر ماه‌ها قرار دارد. این نتایج با تحلیل Moridi (2023) همخوانی دارد. با توجه به توضیحات ارائه‌شده، این‌گونه می‌توان استنباط نمود که مؤثرترین راه‌کارهای بهبود وضعیت مخزن سد می‌تواند معطوف به کنترل بار ورودی مواد مغذی از حوزه به‌واسطه سیلاب‌های ورودی و کنترل زمان‌ماند باشد.

۵. تقدیر و تشکر

از شرکت آب منطقه‌ای هرمزگان جهت حمایت پژوهشی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

- Abdolabadi, H., Sarang, A., Ardestani, M., & Mahjoobi, E. (2016). Eutrophication modeling using variable chlorophyll approach.
- Aghasian, K., Moridi, A., Mirbagheri, A., & Abbaspour, M. (2019). Selective withdrawal optimization in a multipurpose water use reservoir. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 5559-5568.
- Beiramipoor, S., Qaderi, K., Haghjuie, H., & Rahimpour, M. (2018). Reservoir water quality management of Baft dam through selected drainage from the dam outlet locations using the model CE-QUAL-W2. *Irrigation and Water Engineering*, 8(3), 237-251. (in Persian).
- Borah, D. K., Knapp, H. V., Raman, R. K., Lin, S. D., & Soong, T. D. (1999). HEC-5Q model applied to a lake system in Illinois for water quality evaluations. *Water international*, 24(3), 240-247.
- Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*: Waveland press.
- Colarusso, L. A., Chermak, J. A., Priscu, J., & Miller, F. (2003). *Modeling pit lake water column stability using Ce-Qual-W2*. Paper presented at the Tailings and mine waste.
- Cole, T. M., & Wells, S. A. (2006). CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5.
- Debele, B., Srinivasan, R., & Parlange, J.-Y. (2008). Coupling upland watershed and downstream waterbody hydrodynamic and water quality models (SWAT and CE-QUAL-W2) for better water resources management in complex river basins. *Environmental Modeling & Assessment*, 13, 135-153.
- Grey, D., & Sadoff, C. W. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water policy*, 9(6), 545-571.
- Jiang, D. (2012). Temporal and spatial variation of thermal structure in Three Gorges Reservoir: a simulation approach. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10(2 part 3), 1174-1178.

- Jozi, S. A., Hosseini, L., & Dehghani, A. (2016). Study of Environmental Impact of Minab Esteghlal Dam in Operation Phase Using a Combination of Modified and ICOLD Methods. *Journal of Environmental Science and Technology*, 18(3), 129-141. (in Persian).
- Khalaf, A., & Noshadi, M. (2018). Analysis of thermal stratification of Droodzen dam reservoir using CE-QUAL-W2 model. *11th National Congress of Civil Engineering*, Shiraz.
- Kuo, J.-T., Lung, W.-S., Yang, C.-P., Liu, W.-C., Yang, M.-D., & Tang, T.-S. (2006). Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan. *Environmental Modelling & Software*, 21(6), 829-844.
- Larabi, S., Schnorbus, M. A., & Zwiers, F. (2022). A coupled streamflow and water temperature (VIC-RBM-CE-QUAL-W2) model for the Nechako Reservoir. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 44, 101237.
- Liang, D., Testa, J. M., Harris, L. A., & Boynton, W. R. (2023). A hydrodynamic model-based approach to assess sampling approaches for dissolved oxygen criteria in the Chesapeake Bay. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195.
- Liu, W.-C., Chen, W.-B., & Kimura, N. (2009). Impact of phosphorus load reduction on water quality in a stratified reservoir-eutrophication modeling study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 159, 393-406.
- Manatunge, J., Nakayama, M., & Priyadarshana, T. (2008). Environmental and social impacts of reservoirs: issues and mitigation. *Oceans and aquatic ecosystems*, 1, 212-255.
- Moridi, M., Sobra, A. R., Jafarzadeh, N., Amiri, F., & Koh Gardi, I. (2023). Investigation of thermal layering phenomenon of Minab dam using Ce-qual-w2 model and its effect on water quality in Bandar Abbas. *Wetland Ecobiology*, 14(1), 49-70. (in Persian).
- Nazariha, M., Danaei, E., Hashemi, S. H., & Izad Doustdar, A. H. (2010). Prediction of Thermal Stratification in Proposed Bakhtyari Reservoir With CE-QUAL-W2. *Journal of Environmental Studies*, 36(54). (in Persian).
- Nori -najafi, F., Veisi, H., Khoshbakhat, K., & Mirzaei-Talar Poshti, R. (2019). Assessing the Impacts of Dams on the Local Community and Environment in Iran: Systematic Review. *Journal of Water and Sustainable Development*, 5(2), 141-152. doi:10.22067/jwsd.v5i2.67
- Reichert, P., Borhardt, D., Henze, M., Rauch, W., Shanahan, P., Somlyody, L., & Vanrolleghem, P. A. (2001). *River water quality model: IWA publishing*.
- Rezaei Barandagh, H., Salmasi, F., & Sahebi, F. (2018). Water Quality and Temperature Stratification of Zanzan Taham Dam with CE-QUAL-W2 Software. *Journal of Water and Soil Conservation*, 25(1), 127-145. doi:10.22069/jwsc.2018.13327.2799. (in Persian).
- Saadatpour, M. (2020). An adaptive surrogate assisted CE-QUAL-W2 model embedded in hybrid NSGA-II_ AMOSA algorithm for reservoir water quality and quantity management. *Water Resources Management*, 34(4), 1437-1451.
- Salehi, M., Khani Temelieyeh, Z., Parchami, N., & Ahmadpour, Z. (2019). Numerical Modeling Of Thermal Stratification And Water Quality In Reservoir By CE-QUAL-W2 Model. *Journal of Water and Soil Conservation*, 26(4), 53-73. doi:10.22069/jwsc.2019.14971.3010. (in Persian).
- Shabani, N., Rahmanifiroozjaee, A., & Abessi, O. (2019). Thermal Stratification of Seymareh Dam Using Two-Dimensional, Hydrodynamic and Water Quality Model: CE-QUAL-W2. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(7), 77-87. doi:10.22034/jest.2018.22904.3200
- Shahraki Mojahid, R., Noshadi, M., & Alizadeh, A. (2014). *Investigation and simulation of thermal stratification and salinity in Minab Esteghlal dam by HEC-5Q model*. Paper presented at the National Congress of Irrigation and Drainage of Iran, Ahwaz. (in Persian).
- Sharma, D., & Kansal, A. (2013). Assessment of river quality models: a review. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 12, 285.
- Shi, H., Chen, J., Liu, S., & Sivakumar, B. (2019). The role of large dams in promoting economic development under the pressure of population growth. *Sustainability*, 11(10), 2965.
- Talakesh, S., Fatahi Nafechi, R., Samadi Boroujeni, H., Mirabbasi Najafabadi, R., & Khajepour, I. (2019). Investigation on Stratification of Temperature and Dissolved Oxygen in a Large Dam Reservoir (Case study: Karun 3 Dam). *Iranian Water Researches Journal*, 13(1), 49-57. (in Persian).