

## Research Paper

## Simulation of Thermal Stratification and Dissolved Oxygen Dynamics in the Zayandeh-Rud Reservoir under Inflow Variation Scenarios Using the CE-QUAL-W2 Model

Seyedeh Hadis Shahrokhi<sup>1</sup>, Hasan Torabi Podeh<sup>2\*</sup>, Amir Hamzeh Haghiabi<sup>3</sup>, Pooneh Saeidi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate in Hydraulic Structures, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Iran.

<sup>4</sup> PhD. Environmental Science/Engineering Water Resources track, Tarbiat Modares University, Iran.



10.22125/iwe.2026.584109.1925

Received:  
**May 30, 2026**  
Accepted:  
**August 9, 2026**  
Available online:  
**September 7, 2026**

**Keywords:**  
CE-QUAL-W2, Zayandeh  
roud Dam Reservoir,  
Thermal stratification,  
Residence time, Climate  
change

### Abstract

This study evaluates the thermal and dissolved oxygen (DO) responses of the Zayandeh Rood Reservoir to reductions in river inflow using the two-dimensional hydrodynamic and water quality model, CE-QUAL-W2. Following calibration and bathymetric corrections, the model demonstrated high accuracy in simulating water level fluctuations. The reservoir exhibits a warm monomictic mixing regime. Simulation results revealed that reduced inflow increases hydraulic residence time and decreases the effective reservoir volume, leading to oxycline displacement and the expansion of oxygen-depleted zones in deeper layers. Scenario analysis indicated that a 10% to 20% reduction in inflow places the reservoir under water quality alert conditions, while a reduction exceeding 30% triggers severe anoxic conditions in the hypolimnion. Additionally, a water surface elevation of 2017 m was identified as the critical threshold for water quality to maintain ecological stability. This research underscores numerical modeling as a robust tool for predicting biogeochemical responses and supporting decision-making under hydrological stress. exceeding **30%** trigger oxygen collapse in the bottom waters. Accordingly, maintaining the reservoir water level above **2017 m** is proposed as a key operational threshold to reduce the risk of deoxygenation, highlighting the usefulness of numerical modeling for reservoir management under water-scarcity stress.

\* **Corresponding Author:** Hasan Torabi Podeh

**Address:** Department of Water Engineering,  
Lorestan University, Iran.

**Email:** torabi.ha@lu.ac.ir  
**Tel:** 09132205169

## 1. Introduction

Reservoirs play a vital role in managing water resources in arid and semi-arid regions. Thermal stratification in these water bodies restricts vertical mixing, limits oxygen transfer, and subsequently degrades water quality, leading to the development of anoxic conditions. Climate change and fluctuations in river inflow alter hydraulic residence times, thereby intensifying thermal stability. While the CE-QUAL-W2 model is widely recognized as an efficient tool for simulating these dynamics, prior research has predominantly focused on the impacts of temperature increases, leaving the role of inflow variations relatively understudied. This study addresses this gap by conducting high-resolution simulations and analyzing the ecological response of the Zayandeh Rood Reservoir under various inflow reduction scenarios. The findings provide a scientific basis for assessing water quality vulnerability during droughts and developing optimal water release and reservoir management strategies.

## 2. Materials and Methods

The two-dimensional, laterally averaged hydrodynamic and water quality model, CE-QUAL-W2 (Version 3.7), was employed to simulate the reservoir's behavior. The computational grid of the reservoir was discretized into 72 longitudinal segments and 91 vertical layers. Boundary conditions and input data—comprising meteorological variables, hydrological inflows, and measured vertical profiles of temperature and DO—were configured for the period from March to December 2021. Calibration was performed for both hydrodynamic and water quality components based on a sensitivity analysis of key parameters. The wind sheltering coefficient (**WSC**) was identified as the most sensitive parameter governing thermal stratification stability; thus, it was calibrated dynamically in the range of **0.5** to **0.7** to improve model accuracy. Model performance was quantitatively evaluated using statistical metrics, including the coefficient of determination ( $R^2$ ), root mean square error (**RMSE**), mean absolute error (**MAE**), and percent bias (**PBIAS**).

## 3. Results

. The calibrated CE-QUAL-W2 model accurately simulated water level fluctuations (**RMSE** = **3.3** cm), water temperature ( $R^2$  = **0.98**), and dissolved oxygen ( $R^2$  = **0.91**), successfully capturing the dynamics of thermal stratification and oxycline formation. Simulating inflow reduction scenarios (10%, 20%, and 30%) revealed a non-linear response to water level drawdown. Decreased inflow prolonged hydraulic residence time and amplified the impact of sediment oxygen demand (**SOD**) due to an increased ratio of sediment surface area to water volume, driving the anoxic boundary upward.

In the first scenario (10% inflow reduction, corresponding to a 3 m drawdown), oxycline compression is initiated. Under the second scenario (20% reduction, 7.5 m drawdown), the anoxic zone expands to cover 45% of the reservoir depth. Ultimately, in the third scenario (30% reduction, 14 m drawdown), the anoxic water mass expands fourfold, encompassing 90% of the water column and causing a complete collapse of the reservoir's self-purification capacity.

## 4. Discussion and Conclusion

The findings demonstrate that a 10% to 20% reduction in inflow places the Zayandeh Rood Reservoir in a water quality alert state, whereas a 30% reduction (dropping the water level to 2006 m) triggers severe anoxia and halts self-purification. To prevent internal phosphorus loading through sediment release and to preserve ecological health, maintaining the reservoir water level above 2017 m is highly recommended as a critical threshold and management target.

## 5. Six important references

- 1) Adrian, R. O. Reilly., H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller and G. A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2283-2297.
- 2). Azadi, F., P.-S. Ashofteh, and X. Chu. 2020. Evaluation of the effects of climate change on thermal stratification of reservoirs. *Journal pre-proof*.
- 3). Cole, T. M., and S. A. Wells. 2015. CE-QUAL-W2: A hydrodynamic and water quality model for rivers, estuaries, lakes, and reservoirs. Version 3.7. US Army Corps of Engineers.
- 4). IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the. Intergovernmental Panel on Climate Change).
- 5)Noori, R., R. Berndtsson, J. F. Adamowski, and M. Rabiee Abyaneh. 2018. Temporal and depth variation of water quality due to thermal stratification in Karkheh Reservoir, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume (19), 279–286.
- 6)O'Reilly, C. M., S. Sharma, D. K. Gray, S. E. Hampton, J. S. Read, R. J. Rowley, and G. Zhang. 2023. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Nature Climate Change*, 13(5), 456-464.

## شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و دینامیک اکسیژن محلول مخزن سد زاینده‌رود تحت سناریوهای تغییر دبی ورودی با استفاده از مدل CE-QUAL-W2

سیده حدیث شاهرخی<sup>۱</sup>، حسن ترابی پوده<sup>۲</sup>، امیرحمزه حق‌آبی<sup>۳</sup>، پونه سعیدی<sup>۴</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۵/۰۳/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

مقاله پژوهشی

### چکیده

بررسی لایه‌بندی حرارتی و وضعیت اکسیژن محلول، برای مدیریت کیفی مخازن سدها حیاتی است؛ به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که خشکسالی و کاهش دبی ورودی، پایداری این مخازن را با چالش مواجه می‌کند. در این پژوهش، پاسخ حرارتی و اکسیژنی مخزن سد زاینده‌رود در برابر تغییرات دبی ورودی، با استفاده از مدل عددی دوبعدی طولی- عمقی CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی شد. هدف اصلی، ارزیابی اثر کاهش ورودی بر تراز مخزن، پایداری لایه‌بندی حرارتی، توزیع عمقی اکسیژن محلول (DO) و تعیین آستانه‌های بحرانی کیفیت آب است. مدل با داده‌های مشاهداتی سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱ کالیبره و اعتبارسنجی شد. نتایج نشان داد که تراز آب پس از اصلاح هندسه مخزن، با دقت بالایی شبیه‌سازی شده است؛ به‌طوری که میانگین قدر مطلق خطا (MAE) به ۲/۷ سانتی‌متر و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) به ۳/۳ سانتی‌متر به‌دست آمد. همچنین، مدل تطابق مطلوبی با داده‌های مشاهداتی داشت؛ به‌گونه‌ای که مقادیر MAE و RMSE در کالیبراسیون دما به ترتیب  $0.64^{\circ}\text{C}$  و  $0.81^{\circ}\text{C}$ ، و برای اکسیژن محلول به ترتیب  $0.89\text{ mg/L}$  و  $1.12\text{ mg/L}$  حاصل شد. یافته‌ها نشان داد که مخزن زاینده‌رود دارای رژیم اختلاط تک‌چرخه‌ای گرم بوده و در فصول گرم، لایه‌بندی حرارتی همراه با پروفیل کاهشی اکسیژن در اعماق شکل می‌گیرد. تحلیل سناریوها نشان داد که کاهش دبی ورودی با افزایش زمان ماند و کاهش حجم مؤثر، منجر به جابه‌جایی و فشردگی اکسی‌کلاین و گسترش نواحی کم‌اکسیژن در لایه‌های عمیق می‌شود. بر این اساس، کاهش ۱۰ تا ۲۰ درصدی دبی ورودی، مخزن را در وضعیت هشدار کیفی قرار داده و کاهش بیش از ۳۰ درصدی، منجر به بروز شرایط بی‌اکسیژنی می‌گردد. در نهایت، نتایج نشان داد که تراز ۲۰۱۷ متر، آستانه بحرانی برای حفظ پایداری کیفی و زیست‌محیطی مخزن است که این امر کارآمدی مدل‌سازی عددی را در پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تحت تنش کم‌آبی اثبات می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** مخزن سد زاینده‌رود، لایه‌بندی حرارتی، زمان ماند، تغییر اقلیم، CE-QUAL-W2.

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ایران، رایانامه: Sh\_hadis815@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ایران، رایانامه: torabi.ha@lu.ac.ir

<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، ایران، رایانامه: haghiahi.a@lu.ac.ir

<sup>۴</sup> دکتری محیط زیست گرایش منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، ایران، رایانامه: Pooneh.saeidi@gmail.com



## مقدمه

سدها از مهم‌ترین زیرساخت‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند و نقشی حیاتی در تنظیم جریان و تأمین مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی ایفا می‌کنند. مخازن سدها اکوسیستم‌های آبی پیچیده‌ای هستند که کیفیت آب در آن‌ها نتیجه تعامل فرآیندهای فیزیکی، شیمیایی و زیستی است. از این‌رو، درک دقیق این فرآیندها برای مدیریت پایدار منابع آب و پیشگیری از چالش‌های زیست‌محیطی ضروری است (Wetzel, 2001, Sadeghian et al., 2021). یکی از اساسی‌ترین فرآیندهای فیزیکی مؤثر بر کیفیت آب مخازن، لایه‌بندی حرارتی<sup>۵</sup> است که در نتیجه اختلاف چگالی ناشی از تغییرات دما ایجاد می‌شود. این پدیده منجر به ساختاری پایدار شامل لایه سطحی گرم‌تر و کم‌چگال‌تر (اپی‌لیمنیون<sup>۶</sup>)، لایه عمیق‌تر و سردتر (هیپولیمنیون<sup>۷</sup>) و ناحیه انتقالی بین آن‌ها (ترموکلاین<sup>۸</sup>) می‌گردد (Woolway et al., 2021). این جدایش حرارتی، با محدود کردن اختلاط عمودی، مانع از انتقال مؤثر اکسیژن از لایه‌های سطحی به اعماق شده و می‌تواند منجر به افت غلظت اکسیژن محلول و بروز شرایط کم‌اکسیژنی<sup>۹</sup> در لایه‌های زیرین شود که پیامدهای اکولوژیکی نامطلوبی به همراه دارد (Adrian et al., 2009; Woolway and Merchant, 2019). تداوم لایه‌بندی در فصول گرم، با محدود کردن تبادل اکسیژن و تداوم تجزیه مواد آلی در هیپولیمنیون، فرآیند یوتریفیکاسیون و آزادسازی مواد مغذی از رسوبات را تشدید می‌کند (Wetzel, 2001; Zhang et al., 2022).

در سال‌های اخیر، تغییر اقلیم با تغییر رژیم‌های هیدرولوژیکی، افزایش دما و نوسان در الگوی بارش، تبخیر و زمان‌بندی رواناب، دبی ورودی مخازن را تحت تأثیر قرار داده است ((IPCC, 2021, Reilly et al., 2023). کاهش دبی ورودی (به‌ویژه در دوره‌های خشکسالی) می‌تواند موجب

افزایش زمان ماند<sup>۱۰</sup> و تشدید پایداری لایه‌بندی حرارتی شود، در حالی که افزایش دبی ورودی قادر است با تقویت اختلاط عمودی، لایه‌بندی را تضعیف نماید (Azadi et al., 2020). با توجه به ماهیت غیرخطی این فرآیندها، مدل‌سازی عددی به ابزاری قدرتمند برای تحلیل رفتار هیدرودینامیکی و کیفی مخازن تبدیل شده است. در این میان، مدل CE-QUAL-W2 به‌عنوان یکی از معتبرترین مدل‌های دوبعدی (طولی-عمقی)، توانایی بالایی در شبیه‌سازی هم‌زمان پارامترهای هیدرودینامیکی، ساختار حرارتی و کیفیت آب (از جمله اکسیژن محلول) دارد و در مطالعات متعدد جهت بررسی الگوهای طولی و عمقی مخازن به کار گرفته شده است (Cole and Wells, 2015).

پژوهش‌های متعددی توانمندی مدل CE-QUAL-W2 را در شبیه‌سازی دقیق ساختار حرارتی و دینامیک اکسیژن در مخازن مختلف به اثبات رسانده‌اند. در سطح جهانی، مطالعات بر پیامدهای گرمایش اقلیمی متمرکز بوده‌اند؛ به طوری که Woolway و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل داده‌های بلندمدت دریاچه‌ها و مخازن سدها نشان دادند که گرمایش اقلیمی مستقیماً بر ساختار فیزیکی آب تأثیر می‌گذارد؛ به‌گونه‌ای که به ازای هر  $1^{\circ}\text{C}$  گرم‌تر شدن هوا، دمای آب در لایه‌های سطحی حدود  $0.34^{\circ}\text{C}$  افزایش می‌یابد. این پایداری حرارتی با ممانعت از اختلاط عمودی، تبادل اکسیژن بین لایه‌های سطحی و عمیق را محدود کرده و غلظت اکسیژن محلول در لایه‌های عمیق را با نرخ  $0.06$  تا  $0.12\text{ mg/L}$  در هر دوره ده ساله کاهش می‌دهد؛ وضعیتی که با ایجاد شرایط بی‌اکسیژنی در کف مخزن، ریسک یوتریفیکاسیون و آزادسازی مواد مغذی را تا ۲۵ درصد تشدید می‌کند. یافته‌های Jane و همکاران (۲۰۲۱) نیز با بررسی بیش از ۶۰۰ دریاچه، تأیید می‌کند که تغییر الگوهای هیدرولوژیکی ناشی از تغییر اقلیم، به‌طور معناداری ساختار حرارتی و زمان اختلاط مخازن را دگرگون می‌سازد.

<sup>8</sup> Thermocline

<sup>9</sup> Hypoxia

<sup>10</sup> residence time

<sup>5</sup> Thermal Stratification

<sup>6</sup> Epilimnion

<sup>7</sup> Hypolimnion

آن‌ها نشان‌دهنده کاهش اکسیژن محلول در لایه‌های عمیق تا  $2/4 \text{ mg/L}$  بود. همچنین، مدل با دقت مناسبی کالیبره شد؛ به‌طوری‌که شاخص  $RMSE$  برای پارامترهای تراز آب، دما، اکسیژن محلول، فسفات و نیتрат به ترتیب  $0/349$  متر،  $1/15^\circ\text{C}$ ،  $2/2$ ،  $0/024$  و  $1/75 \text{ mg/L}$  به دست آمد که نشان‌دهنده توانایی مناسب مدل در شبیه‌سازی تغییرات کیفیت آب در مخازن عمیق است.

با وجود این پیشینه، تحلیل شکاف پژوهشی نشان می‌دهد که بخش عمده مطالعات موجود عمدتاً بر اثرات افزایش دما تمرکز داشته‌اند (Woolway and Merchant, 2019). در حالی‌که در مخازن واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نوسانات دبی ورودی عامل اصلی کنترل‌کننده رفتار هیدرودینامیکی است. با وجود اهمیت این موضوع، تحلیل دقیق اثر سناریوهای تغییر دبی ورودی بر ساختار لایه‌بندی و توزیع اکسیژن در مخازنی مانند زاینده‌رود، همچنان با محدودیت مواجه است. پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به شبیه‌سازی دقیق و تحلیل پاسخ اکولوژیکی مخزن سد زاینده‌رود تحت سناریوهای مختلف هیدرولوژیکی می‌پردازد. نوآوری اصلی این پژوهش، بررسی هم‌زمان اثر سناریوهای کاهش دبی ورودی در دوره‌های کم‌آبی (خشکسالی) بر ساختار لایه‌بندی حرارتی و توزیع اکسیژن محلول در مخزن سد زاینده‌رود است. در این مطالعه، با استفاده از مدل دوبعدی CE-QUAL-W2، پاسخ هیدرودینامیکی و اکولوژیکی مخزن تحت شرایط مختلف ورودی شبیه‌سازی شده و تغییرات شدت و تداوم لایه‌بندی، زمان ماند آب و گسترش شرایط کم‌اکسیژنی در لایه‌های عمیق بررسی می‌شود. همچنین، نقش فرآیندهای مؤثر بر نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری کیفی مخزن در دوره‌های کم‌آبی و تدوین راهبردهای مناسب مدیریت و رهاسازی آب در سد زاینده‌رود باشد.

علاوه بر تغییر اقلیم، رژیم جریان ورودی به‌عنوان عامل مهمی در رفتار حرارتی مخازن شناخته می‌شود. Noori و همکاران (۲۰۲۱) نشان دادند که کاهش جریان ورودی در دوره‌های خشکسالی با افزایش زمان ماند آب، پایداری لایه‌بندی حرارتی را تقویت کرده و با محدود نمودن انتقال عمودی اکسیژن، منجر به بروز شرایط کم‌اکسیژنی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی مدل، نشان‌دهنده دقت بالای آن است؛ به‌طوری‌که شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2 = 0.8$ ) و ریشه میانگین مربعات خطا ( $RMSE = 0.5$ )، نشان‌دهنده انطباق مناسب نتایج مدل با داده‌های مشاهداتی بوده و کارایی بالای مدل را در پیش‌بینی تغییرات کیفی اثبات می‌کند. برای تحلیل این فرآیندهای پیچیده، مدل‌های عددی هیدرودینامیکی ابزارهای کارآمدی هستند. در این میان، CE-QUAL-W2 به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مدل‌های دوبعدی میانگین‌گیری شده در راستای طولی، به دلیل قابلیت شبیه‌سازی هم‌زمان هیدرودینامیک، انتقال حرارت و فرآیندهای کیفی آب، در مطالعات بسیاری به کار گرفته شده است (Wells, Cole, 2015). Mi و همکاران (۲۰۲۰) و Zhang و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از این مدل نشان دادند که تغییرات دبی ورودی نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییر ساختار حرارتی و توزیع اکسیژن محلول ایفا می‌کند. در ایران نیز مطالعاتی بر رفتار حرارتی مخازن متمرکز بوده‌اند. Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۵) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 نشان دادند که مخزن سد بافت حدود ۹ ماه از سال دارای لایه‌بندی حرارتی است و اختلاف دمای لایه‌های سطحی و عمیق آن در اوج لایه‌بندی به حدود  $19^\circ\text{C}$  می‌رسد. همچنین، غلظت  $TDS$  در این مخزن در بازه  $220$  تا  $310 \text{ mg/L}$  گزارش شد که با وجود قرارگیری در محدوده قابل قبول، بیانگر حساسیت مخزن به افزایش شوری در شرایط کم‌آبی و تغییر اقلیم است. همچنین، Ziaei و همکاران (۲۰۱۹) با به‌کارگیری مدل CE-QUAL-W2 در مخزن سد زاینده‌رود، لایه‌بندی حرارتی را از آوریل تا نوامبر شبیه‌سازی کردند. نتایج

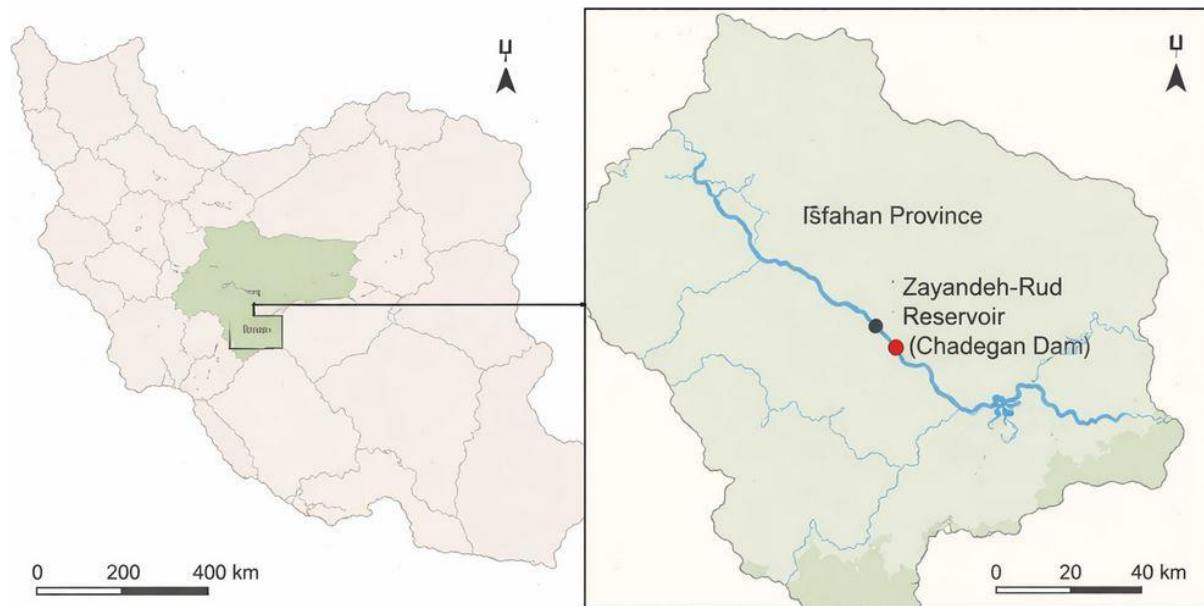


## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

سد و مخزن زاینده‌رود با مختصات جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴۴ دقیقه شمالی و ۵۰ درجه و ۴۷ دقیقه شرقی، بر روی رودخانه زاینده‌رود و در فاصله تقریبی ۱۱۰ کیلومتری غرب شهر اصفهان احداث شده است. این مخزن به‌عنوان یکی از

مهم‌ترین سازه‌های هیدرولیکی حوضه آبریز زاینده‌رود، وظیفه تأمین آب شرب، مصارف صنعتی و کشاورزی استان اصفهان، همچنین بخشی از نیازهای آبی استان یزد را بر عهده دارد و از اهمیت راهبردی در مدیریت منابع آب منطقه برخوردار است. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ و مشخصات فیزیکی و فنی سد و مخزن در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی سد مخزنی زاینده‌رود

جدول (۱): مشخصات سد زاینده‌رود

|      |                                      |
|------|--------------------------------------|
| ۴۵۰  | طول تاج سد (m)                       |
| ۱۶۶  | ارتفاع سد از پی (m)                  |
| ۲۰۴۴ | تراز نرمال بهره‌برداری (m.a.s.l)     |
| ۱۴۷۰ | حجم کل مخزن ( $Mm^3$ )               |
| ۵۴   | مساحت سطح مخزن ( $km^2$ )            |
| ۳۵   | میانگین دبی ورودی سالانه ( $m^3/s$ ) |

## معرفی مدل عددی CE-QUAL-W2

در این پژوهش، به منظور شبیه سازی رفتار هیدرودینامیکی و کیفیت آب مخزن سد زاینده رود، از مدل عددی CE-QUAL-W2 استفاده شد. این مدل، یک مدل دوبعدی طولی-عمقی با میانگین گیری جانبی<sup>۱۱</sup> است که برای شبیه سازی جریان، انتقال حرارت و فرآیندهای کیفیت آب در مخازن، دریاچه ها و رودخانه های عمیق و کشیده توسعه یافته است (Cole and Wells, 2015). مدل CE-QUAL-W2 توسط مرکز مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا (USACE) توسعه یافته و به طور گسترده در مطالعات مرتبط با لایه بندی حرارتی، اختلاط عمقی و تغییرات پارامترهای کیفی آب در مخازن مورد استفاده قرار گرفته است. این مدل با حل معادلات هیدرودینامیکی ناپایا (پیوستگی و مومنتوم) به همراه معادلات انتقال و پخش، توانایی شبیه سازی تغییرات زمانی و مکانی پارامترهایی نظیر دما، سرعت جریان و اکسیژن محلول را در راستای طول و عمق مخزن دارد. با توجه به ویژگی های هندسی و هیدرودینامیکی مخزن سد زاینده رود، از جمله کشیدگی طولی، عمق قابل توجه و شکل گیری لایه بندی حرارتی، نسخه ۴ این مدل به عنوان ابزاری مناسب و کارآمد برای تحلیل هم زمان فرآیندهای هیدرودینامیکی و کیفی این مخزن ارزیابی و انتخاب شد.

## داده ها

برای اجرای مدل و شبیه سازی دقیق رفتار مخزن، مجموعه ای از داده های هواشناسی، هیدرولوژیکی و کیفی در بازه زمانی ۲۰ مارس تا ۱۳ دسامبر ۲۰۲۰ گردآوری و پیش پردازش شدند. این داده ها به شرح زیر دسته بندی می شوند:

## داده های هواشناسی:

متغیرهای هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت و جهت باد، و میزان پوشش ابر از ایستگاه سینوپتیک چادگان استخراج شدند. این داده ها پس از انجام مراحل کنترل کیفیت و حذف داده های پرت، به عنوان شرایط مرزی سطحی<sup>۱۲</sup> برای محاسبه تبادلات حرارتی بین سطح آب و جو در مدل اعمال گردیدند.

## داده های هیدرولوژیکی:

داده های هیدرولوژیکی شامل دبی ورودی روزانه به مخزن، دبی خروجی (از طریق نیروگاه و تخلیه کننده های تحتانی)، دمای آب ورودی و تراز روزانه سطح آب، از شرکت آب منطقه ای اصفهان اخذ گردید. این داده ها به عنوان شرایط مرزی ورودی و خروجی در مدل لحاظ شده و نقش کلیدی در برقرار کردن بیلان آبی مخزن و شبیه سازی تغییرات تراز سطح آب ایفا می کنند.

## داده های کیفی:

به منظور پایش ساختار حرارتی و وضعیت اکسیژن محلول، نمونه برداری های میدانی در ایستگاه های منتخب مخزن صورت گرفت. در این دوره، پروفیل های عمقی دمای آب و اکسیژن محلول در اعماق مختلف برداشت و پس از آنالیز آزمایشگاهی، به عنوان داده های مرجع برای واسنجی<sup>۱۳</sup> و اعتبارسنجی<sup>۱۴</sup> مدل مورد استفاده قرار گرفتند.

## معادلات حاکم و گسسته سازی عددی

دامنه محاسباتی مخزن سد زاینده رود در مدل CE-QUAL-W2 به صورت دوبعدی طولی-عمقی گسسته سازی شد. بر این اساس، مخزن در راستای طولی به ۷۲ سگمنت و در راستای عمقی به ۹۱ لایه افقی تقسیم گردید تا هندسه مخزن، الگوی جریان و لایه بندی حرارتی با دقت کافی شبیه سازی شود. تفکیک عمقی به گونه ای انتخاب شد که

<sup>13</sup> Calibration

<sup>14</sup> Validation

<sup>11</sup> Laterally Averaged

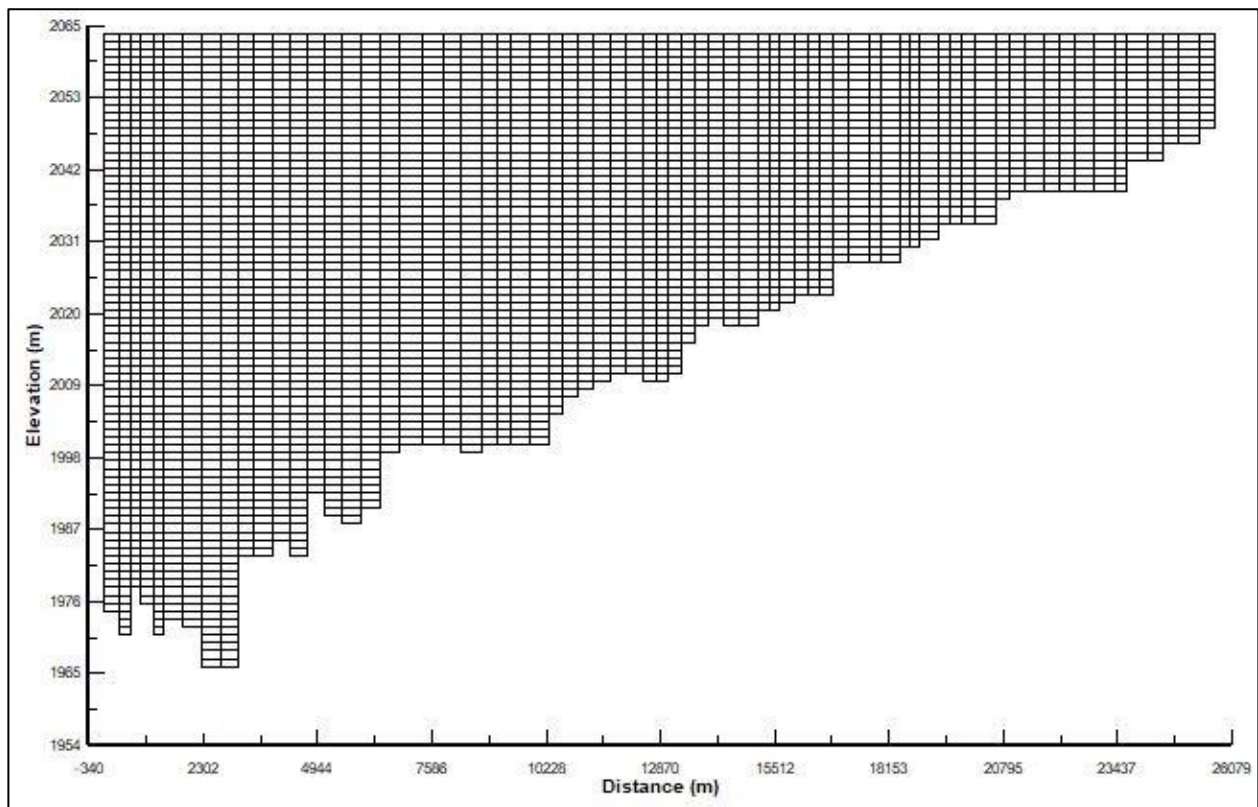
<sup>12</sup> Surface Boundary Conditions





چارچوب اصلی شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب مورد استفاده قرار گرفت. نمایی از هندسه مخزن و شبکه محاسباتی مورد استفاده در CE-QUAL-W2 در شکل ۲ ارائه شده است.

نواحی اپی‌لیمنون، ترموکلاین و هیپولیمنون و گرادیان‌های تند دما و اکسیژن محلول در ناحیه ترموکلاین به‌خوبی قابل شبیه‌سازی باشند. شرایط مرزی بستر و دیواره‌ها به‌صورت بدون لغزش در نظر گرفته شد و شبکه نهایی پس از انطباق با منحنی‌های ارتفاع-سطح-حجم و تراز سطح آب، به‌عنوان



شکل (۲): نمایی از هندسه مخزن زاینده رود در برنامه CE-QUAL-W2

مطالعه بر روی ۴۰۰ بدنه آبی با شرایط بسیار گوناگون نشان داد که مدل جواب‌های دقیقی با مقدار پیشفرض پارامترهای فوق می‌دهد در صورتی که هندسه مخزن به دقت ساخته شده باشد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در صورت نبود اطلاعات

### کالیبراسیون و تحلیل حساسیت

فرآیند کالیبراسیون مدل در دو بخش هیدرودینامیک و کیفیت آب به‌صورت جداگانه انجام شد. در مرحله هیدرودینامیکی، پارامترهایی مانند هدایت حرارتی، نرخ تبخیر و ضرایب انتقال حرارت بین‌لایه‌ای با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای تراز سطح آب و دمای ستون آب تنظیم شدند تا انطباق قابل‌قبولی بین نتایج مدل و مشاهدات میدانی حاصل شود. مقادیر این پارامترها در جدول ۲ ارائه شده است.

دما مقایسه گردید. براساس فرمول ۱ حساسیت مدل با توجه به نتایج نسبت به هر ضریب تعیین شد ( Shirmohammadi et al.2006).

$$F_{sa} = \frac{\partial O}{\partial P} \times \frac{P}{O} \quad (1)$$

در فرمول بالا O خروجی مدل و P پارامتر ورودی تحت بررسی می‌باشد و  $\partial$  نشاندهنده تغییرات است. نتایج تحلیل حساسیت پارامترهای فوق در جدول ۳ آورده شده است.

جدول (۲): پارامترهایی هیدرودینامیکی مدل CE-QUAL-W2

|       |                            |
|-------|----------------------------|
| ۹/۲   | ضریب اول تبادل حرارتی سطحی |
| ۰/۴۶  | ضریب دوم تبادل حرارتی سطحی |
| ۲     | ضریب سوم تبادل حرارتی سطحی |
| OFF   | نرخ تبخیر                  |
| ۱     | حداکثر ضریب اختلاط عمودی   |
| ۹/۵۳۵ | ضریب ویسکوزیته             |
| ۰/۴۳  | ضریب انتقال بین لایه‌ای    |

دقیق از این ضرائب از مقدار پیشفرض آن‌ها استفاده شود. با این وجود مدل هر بار با تغییر این ضرائب اجرا شد و خروجی

جدول (۳): ضرائب تاثیرگذار در کالیبراسیون دمایی

| ضریب                                   | مقدار پیشفرض مدل      | مقدار ضریب حساسیت |
|----------------------------------------|-----------------------|-------------------|
| لزجت طولی ادی ( $m^2 sec^{-1}$ )       | ۱                     | ۰/۱۷              |
| پخش طولی ادی ( $m^2 sec^{-1}$ )        | ۱                     | ۰/۲۱              |
| ضریب سزی یا مانینگ ( $m^2 sec^{-1}$ )  | ۷۰                    | ۰/۰۵              |
| تاثیر باد (پوشش باد)                   | Calibration parameter | ۰/۶۳              |
| جذب تابش خورشید در لایه سطحی           | ۰/۴۵                  | ۰/۱۳              |
| کاهش نور در آب پاک ( $m^{-1}$ )        | ۰/۴۵                  | ۰/۱۷              |
| کاهش نور در مواد جامد غیر آلی          | ۰/۰۱                  | ۰/۱۱              |
| کاهش نور در مواد جامد آلی ( $m^{-1}$ ) | ۰/۲                   | ۰/۰۷              |

#### تغییرات

فصلی الگوی باد در منطقه چادگان، کالیبراسیون WSC به صورت پویا انجام شد؛ به گونه‌ای که مقدار آن در ابتدای دوره شبیه‌سازی روز اول برابر ۰/۵ و در انتهای دوره روز سیصد و شصت و پنج برابر ۰/۷ در نظر گرفته شد. این تنظیم

در بخش کیفیت آب، تحلیل حساسیت نشان داد که ضریب پوشش باد<sup>۱۵</sup> (WSC) بیشترین تأثیر را در شبیه‌سازی ساختار حرارتی و پایداری لایه‌بندی مخزن دارد. این ضریب بیانگر میزان کاهش مؤثر تنش باد بر سطح آب است و در نتیجه عمق اختلاط و شدت لایه‌بندی حرارتی را کنترل می‌کند. با توجه به

<sup>15</sup> Wind Shelter Coefficient



برای مقایسه نتایج و بررسی دقت آن‌ها از تحلیل‌های آماری متفاوتی استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به ضریب تعیین<sup>۱۶</sup> ( $R^2$ )، ریشه میانگین مربعات خطا<sup>۱۷</sup> (RMSE)، میانگین مربعات خطا<sup>۱۸</sup> (MSE)، میانگین قدر مطلق خطا<sup>۱۹</sup> (MAE) و درصد سوگیری بایاس<sup>۲۰</sup> (PBIAS) اشاره کرد. معادلات مورد استفاده جهت تحلیل‌های آماری در معادلات ۲ تا ۶ ارائه شده است.

دینامیک، منجر به بهبود معنی‌دار تطابق پروفیل‌های دمایی مدل با داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی واقع‌بینانه‌تر انتقال انرژی باد به لایه‌های سطحی و عمق اختلاط گردید.

### شاخص‌های ارزیابی عملکرد

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (X_{obs} - X_{sim})^2}{\sum (X_{obs} - \bar{X}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (X_{sim} - X_{obs})^2} \quad (3)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum (X_{sim} - X_{obs})^2 \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |X_{sim} - X_{obs}| \quad (5)$$

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum (X_{sim} - X_{obs})}{\sum X_{obs}} \quad (6)$$

### نتایج کالیبراسیون و ارزیابی هیدرودینامیکی مدل

#### کالیبراسیون و تحلیل هیدرودینامیکی (تراز آب)

ارزیابی شد. روند تغییرات دبی‌های ورودی و خروجی و تأثیر آن‌ها بر حجم مخزن در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

### بحث و نتایج

پیش از تحلیل سناریوهای تغییر دبی و دما، عملکرد مدل CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی تراز آب مخزن سد زاینده‌رود (سگمنت ۷۱) در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

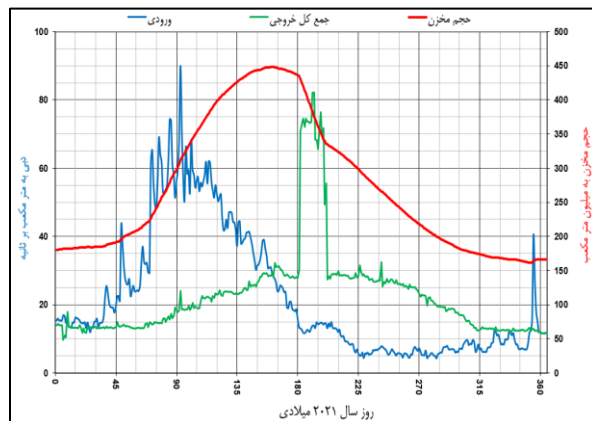
<sup>18</sup> Mean Square Error (MSE)

<sup>19</sup> Mean Absolute Error (MAE)

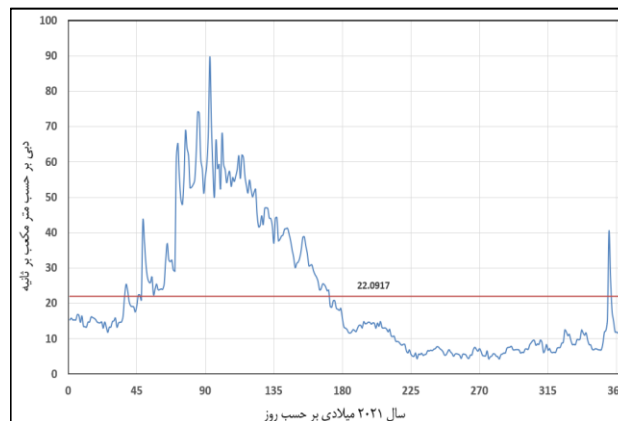
<sup>20</sup> Percent Bias (PBIAS)

<sup>16</sup> Coefficient of Determination ( $R^2$ )

<sup>17</sup> Root Mean Square Error (RMSE)



شکل (۴): روند تغییرات جریان ورودی به مخزن و خروجی از مخزن و روند تغییرات حجم مخزن

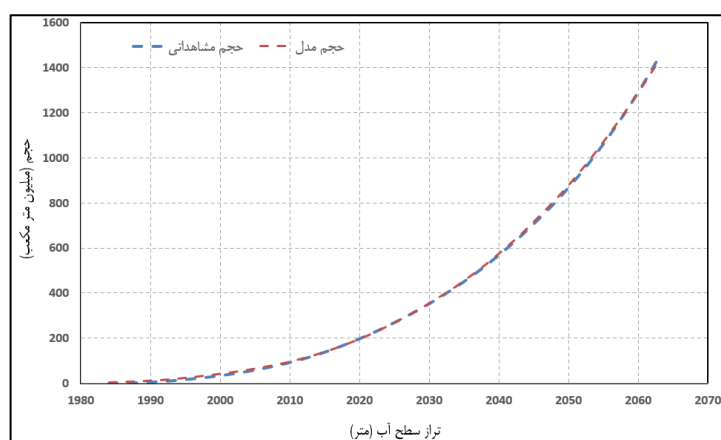


شکل (۳): روند تغییرات جریان ورودی به مخزن سد زاینده رود

انطباق خروجی‌های مدل با داده‌های مشاهده‌ای گردید در نتیجه تغییرات تراز آب با دقت بالاتری شبیه‌سازی شد.

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، منحنی تراز آب شبیه‌سازی شده انطباق بسیار مطلوبی با داده‌های مشاهده‌ای دارد؛ که نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی رفتار هیدرودینامیکی مخزن است.

بررسی این داده‌ها نشان می‌دهد که که مخزن در این دوره با نوسانات شدید دبی ورودی و یک دوره کم‌آبی نسبتاً طولانی مواجه بوده است. نتایج اولیه نشان داد که پیش از اصلاح هندسه مخزن، نتایج مدل و داده‌های مشاهده‌ای همخوانی چندانی با یکدیگر ندارند بر این اساس، اصلاح منحنی تراز-حجم و تنظیم پارامترهای اختلاط عمودی موجب بهبود



شکل (۵): نتایج حجم‌های مشاهده‌ای و محاسباتی



ناچیز و در محدوده قابل قبول می‌باشد. علاوه بر این مقدار  $R^2$  برابر با ۰/۹۹ به دست آمد که نشان‌دهنده انطباق تقریباً کامل روند سطح آب داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی است (شکل ۵). همچنین شاخص درصد سوگیری (PBIAS) برابر با ۱/۶+ درصد به دست آمد؛ این مقدار ناچیز مثبت نشان می‌دهد که مدل تمایل بسیار کمی (کمتر از ۲ درصد) به بیش‌برآورد تراز سطح آب دارد که در مدل‌سازی مخازن بزرگ، عملکردی خوبی محسوب می‌شود.

جدول (۴). شاخص‌های آماری کالیبراسیون تراز آب

|      |           |
|------|-----------|
| ۲/۷۰ | (cm) MAE  |
| ۳/۳۰ | (cm) RMSE |
| ۰/۰۸ | (m) MSE   |
| ۰/۹۹ | $R^2$     |
| +۱/۶ | (%) PBIAS |

شکل‌های ۶ و ۷ به صورت پروفیل‌های عمقی ارائه شده است که نشان‌دهنده دقت بالای مدل CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی رفتار حرارتی مخزن زاینده‌رود است.

جدول (۵). شاخص‌های آماری کالیبراسیون حرارتی مخزن

|      |           |
|------|-----------|
| ۰/۶۴ | (°C) MAE  |
| ۰/۸۱ | (°C) RMSE |
| ۰/۹۸ | $R^2$     |
| +۲/۱ | (%) PBIAS |

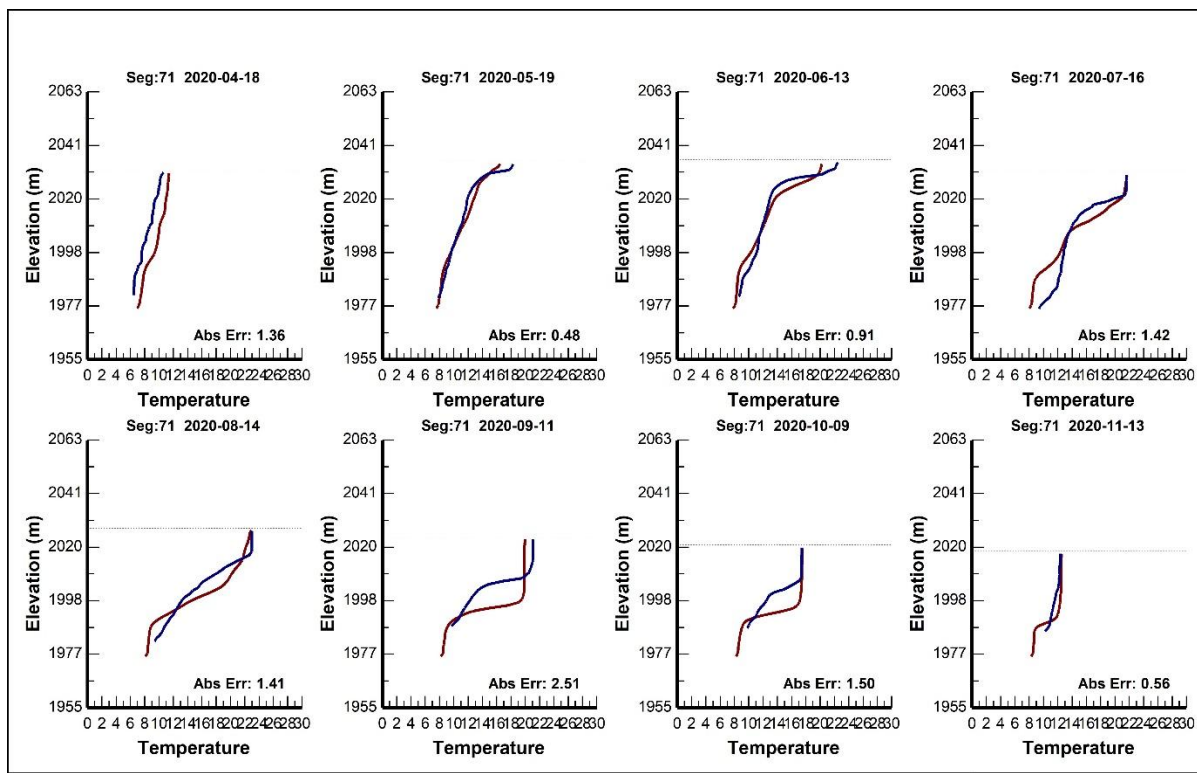
بر اساس نتایج جدول ۴. خطای MAE با ۵۴/۱ درصد کاهش، از ۸/۸۹ سانتی‌متر به ۲/۷ سانتی‌متر رسید. همچنین RMSE با کاهشی معادل ۵۳/۱ درصد از ۷/۰۴ سانتی‌متر به ۳/۳ سانتی‌متر کاهش یافت. کاهش هم‌زمان این دو شاخص نشان‌دهنده دقت بالای مدل در شبیه‌سازی نوسانات روزانه تراز آب است. مقدار خطای MSE نیز ۰/۰۸ متر محاسبه شد که با توجه به ارتفاع بیش از ۱۰۰ متری سد زاینده‌رود و خطای معمول ابزارهای اندازه‌گیری سطح آب، عددی بسیار

در مجموع، تطابق هندسی و هیدرودینامیکی حاصل شده، تضمین می‌کند که بیلان آبی مخزن و همچنین زمان ماند که موثرترین پارامتر در فعل و انفعالات کیفی و بیولوژیکی است، با دقت بالایی توسط مدل محاسبه می‌شود. این موضوع اعتبار لازم را برای تحلیل‌های بعدی در حوزه ساختار حرارتی و پارامترهای کیفی فراهم می‌سازد.

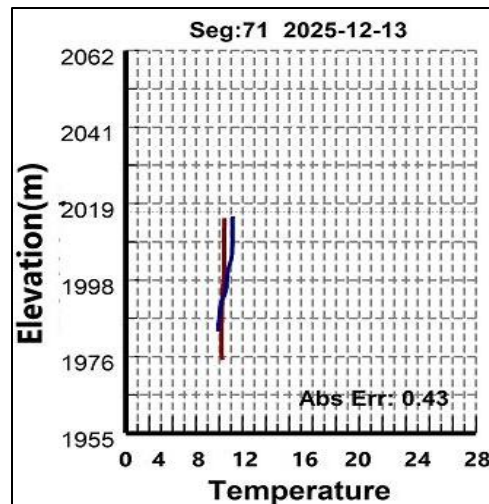
#### کالیبراسیون و تحلیل دینامیک حرارتی (دما)

نتایج کالیبراسیون دمایی در ایستگاه نزدیک به بدنه سد (Segment 71) در جدول ۵ بر اساس شاخص‌های آماری و

در



شکل (۶): مقایسه پروفیل‌های عمقی دمای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱



شکل (۷): مقایسه پروفیل عمقی دمای شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سال آبی ۲۰۲۱-۲۰۲۰

مقابل، با شروع فصل سرد و کاهش دمای هوا (نوامبر و دسامبر)، مدل انتقال ستون آب به یک وضعیت هم‌دما و وقوع اختلاط کامل در پاییزه و زمستان را با دقت بالایی به تصویر کشیده است. این گذار فصلی از لایه‌بندی پایدار تابستانه به فروپاشی حرارتی در زمستان، تطابق کاملی با یافته‌های Woolway و همکاران (۲۰۲۱) در خصوص پایداری حرارتی و گرمایش فصلی در مخازن عمیق دارد. مشابه با مکانیزم‌های توصیف شده در مطالعه مذکور، ساختار سه‌لایه‌ای مخزن زاینده‌رود در طول ماه‌های گرم به‌عنوان یک سد فیزیکی مانع از تبادل مؤثر جرم و انرژی بین لایه‌های اپی‌لیمنیون و هیپولیمنیون می‌شود. با آغاز فصل سرد، خنک شدن سطحی و وقوع جریان‌های غلظتی ناشی از باد و چگالی، این مانع حرارتی را شکسته و تعادل حرارتی را در کل ستون آب برقرار می‌کند. هم‌خوانی این نتایج با مطالعات پیشین، اعتبار مدل را برای پیش‌بینی تغییرات ساختار حرارتی تحت سناریوهای مختلف دبی ورودی تأیید می‌کند.

#### کالیراسیون و تحلیل اکسیژن محلول

نتایج کالیراسیون اکسیژن محلول که در جدول ۶ و پروفیل‌های عمقی در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده است، بیانگر توانمندی مدل CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی دقیق

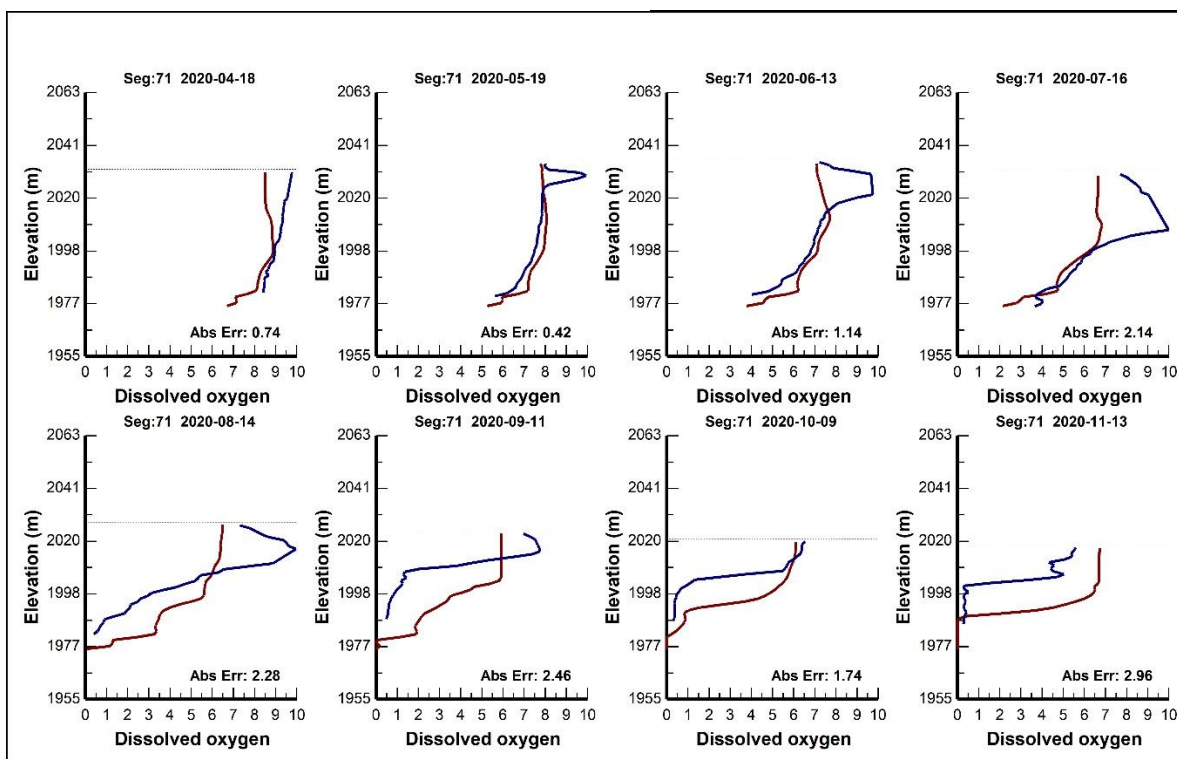
شاخص‌های آماری در کل دوره شبیه‌سازی، انطباق مطلوب بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که مقدار خطای  $MAE$  برابر با  $0.64^{\circ}\text{C}$ ،  $RMSE$  برابر با  $0.81^{\circ}\text{C}$ ،  $R^2$  برابر با  $0.98$  و درصد سوگیری ( $PBIAS$ ) برابر با  $2/1$  درصد به‌دست آمد. بر اساس تحلیل زمانی خطاها، کمترین میزان خطای مطلق در ماه دسامبر (هم‌زمان با فروپاشی لایه‌بندی) و بیشترین مقدار آن در سپتامبر ثبت شده است. این انطباق کمی دقیق، بستر هیدرودینامیکی مستحکمی را برای شبیه‌سازی فرآیندهای کیفی آب فراهم می‌سازد.

مقایسه پروفیل‌های عمقی در شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که مدل توانسته است ساختار حرارتی مخزن را در فصول مختلف با انطباق فیزیکی بالایی شبیه‌سازی کند. در دوره‌های گرم سال (به‌ویژه ژوئن تا آگوست)، الگوی مشخص S شکل ناشی از استقرار لایه‌بندی حرارتی شدید و تشکیل لایه ترموکلاین به‌خوبی توسط مدل شبیه‌سازی شده است. در

تغییرات کیفی و پویایی اکسیژن در مخزن سد زاینده‌رود  
است.

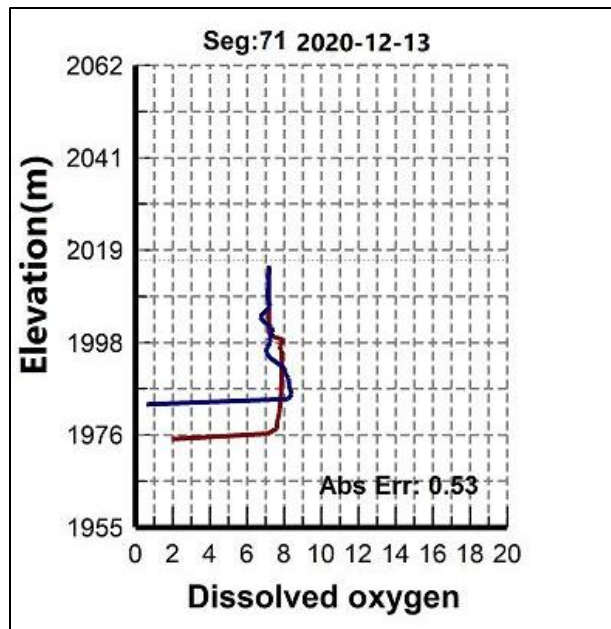
جدول (۶). شاخص‌های آماری کالیبراسیون اکسیژن محلول

|      |                |
|------|----------------|
| ۰/۸۹ | (°mg/L) MAE    |
| ۱/۱۲ | (°mg/L) RMSE   |
| ۰/۹۱ | R <sup>2</sup> |
| -۴/۵ | (%) PBIAS      |



شکل (۸): مقایسه پروفیل‌های عمودی اکسیژن محلول (DO) شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱





شکل (۹): مقایسه پروفیل عمودی اکسیژن محلول شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

شبیه‌سازی شد. در مقابل، در اعماق مخزن (ترازهای زیر ۲۰۰۵ متر)، افت شدید غلظت اکسیژن و گرایش به شرایط کم‌اکسیژنی در ماه‌های سپتامبر و اکتبر به‌وضوح مشاهده می‌شود و مدل موفق شده است مرز تشکیل اکسی‌کلاین را در تطابق با داده‌های مشاهداتی ترسیم نماید. با این حال، بیشترین میزان انحراف عددی مدل در ۱۳ نوامبر ۲۰۲۰ با خطای مطلق  $2/96 \text{ mg/L}$  ثبت شده است. این انحراف با توجه به پیچیدگی فرآیندهای بیوشیمیایی، نرخ مصرف اکسیژن در رسوبات (SOD) در اواخر فصل لایه‌بندی و همچنین پدیده‌های هیدرودینامیکی گذار فصلی و آغاز اختلاط ستون آب، در محدوده قابل‌قبول مدل‌سازی‌های عددی ارزیابی می‌شود (Cole and Wells, 2015).

لازم به ذکر است که در دوره‌های لایه‌بندی شدید (ژوئیه تا سپتامبر)، منحنی‌های مشاهداتی تغییرات تندتر و شکست‌های موضعی بیشتری را در لایه‌های میانی و عمیق نشان می‌دهند، در حالی که منحنی‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، رفتار هموارتری دارند. این عدم انطباق موضعی عمدتاً ناشی از محدودیت‌های فیزیکی و ریاضی مدل‌های دوبعدی قائم-طولی متوسط‌گیری‌شده در عرض و پدیده

از نظر کمی، شاخص‌های آماری ارزیابی عملکرد مدل نشان‌دهنده انطباق بسیار مناسب داده‌های محاسباتی با مقادیر اندازه‌گیری شده هستند؛ به‌طوری‌که مقدار خطای MAE برابر با  $0/89 \text{ mg/L}$ ،  $RMSE$  برابر با  $1/12 \text{ mg/L}$ ،  $R^2$  برابر با  $0/91$  و درصد سوگیری ( $PBIAS$ ) برابر با  $-4/5$  درصد به‌دست آمد. مقدار منفی  $PBIAS$  نشان‌دهنده تمایل و سوگیری جزئی مدل به کم‌برآورد کردن غلظت اکسیژن محلول در طول دوره شبیه‌سازی است. تحلیل زمانی و عمقی پروفیل‌ها نشان می‌دهد که مدل در ماه‌های ابتدایی دوره شبیه‌سازی (مانند می و دسامبر)، وضعیت اشباع اکسیژن را در لایه‌های سطحی با انطباق بالایی شبیه‌سازی کرده است؛ به‌طوری‌که کمترین میزان خطای مطلق در تاریخ ۱۹ می ۲۰۲۰ برابر با  $0/42 \text{ mg/L}$  ثبت شد. با ورود به فصل گرم سال (ژوئن، ژوئیه و اوت) و استقرار لایه‌بندی حرارتی، مدل به‌خوبی توانسته است قله‌های غلظتی اکسیژن در لایه متالیمنیون را شبیه‌سازی کند. این پدیده که ناشی از فعالیت‌های فتوسنتزی در لایه‌های سطحی و تجمع اکسیژن در بالای ترموکلاین است که با دقت مطلوبی توسط مدل

## پاسخ دینامیک اکسیژن محلول مخزن به سناریوهای کاهش دبی ورودی (DO)

### تحلیل اثر سناریوهای تغییر دبی بر پارامترهای هیدرولیکی

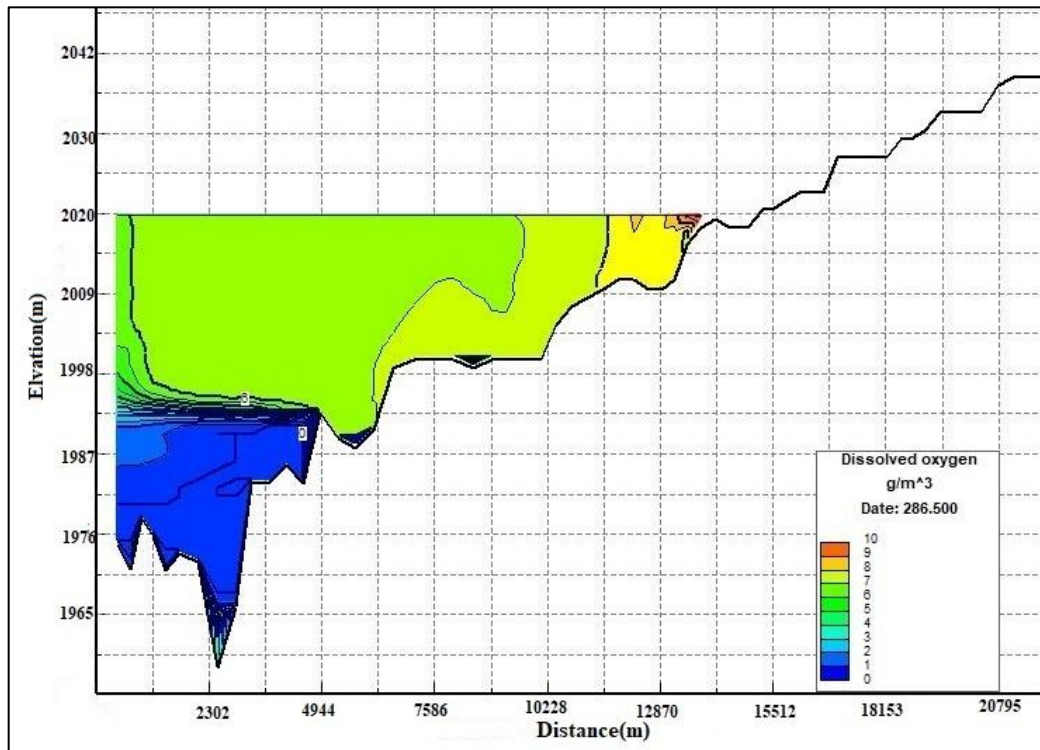
در این پژوهش، به منظور درک پاسخ مخزن زاینده رود به بحران کم آبی، سه سناریوی کاهش دبی ورودی (۱۰٪، ۲۰٪ و ۳۰٪) با سناریوی پایه (Baseline) در بحرانی ترین زمان لایه بندی حرارتی، اوایل مهر ماه (روز ۲۸۶) مورد بررسی قرار گرفتند. برهم کنش هیدرودینامیک مخزن و اکسیژن محلول، تعیین کننده اصلی سلامت اکولوژیک است و نتایج نشان دهنده یک پاسخ غیرخطی<sup>۲۱</sup> در ساختار عمودی اکسیژن محلول نسبت به افت تراز آب می باشد. تحلیل ها نشان می دهد که کاهش دبی ورودی مستقیماً بر پارامترهای اصلی هیدرولیکی مخزن اثرگذار است. با کاهش دبی ورودی، زمان ماند هیدرولیکی به طور متناسب افزایش می یابد که این تغییر، بستر اصلی برای تغییرات در ساختار لایه بندی حرارتی و دینامیک اکسیژن محلول را فراهم می کند. این سناریوها مبنای تحلیل های بعدی در خصوص تغییرات غلظت اکسیژن و شناسایی آستانه های بحرانی مخزن قرار گرفته اند.

### سناریوی پایه: تحلیل پایداری اکسیژنی و الگوی توزیع کاهش (تراز ۲۰۲۰ متر)

در سناریوی پایه، با استقرار مخزن در تراز ۲۰۲۰ متر و جریان ورودی ۱۰۰ درصد، یک ساختار هیدرودینامیکی متعادل مشاهده می شود. در این شرایط، مطابق با خروجی های ارائه شده در شکل ۱۰، الگوی توزیع کاهش اکسیژن در عمق به وضوح قابل شناسایی است.

پخش عددی در حل معادلات انتقال جرم است که تمایل به هموارسازی گرادیان های شدید دارد. علاوه بر این، فرض توزیع یکنواخت اکسیژن خواهی رسوبات کف در طول سگمنت ها و عدم لحاظ ناهمگونی های ریزمقیاس مواد آلی در بستر مخزن، در کنار نوسانات ناشی از امواج داخلی که مرز لایه ها را به صورت محلی جابه جا می کنند، از دلایل اصلی این تفاوت های موضعی به شمار می روند. در نهایت، پروفیل مربوط به دسامبر ۲۰۲۰ (شکل ۹) نشان دهنده گذار کامل مخزن به وضعیت اختلاط کامل است. در این دوره، مدل فرآیند حذف کامل گرادیان غلظت و توزیع یکنواخت اکسیژن در کل ستون آب را در محدوده ۸ تا ۹ mg/L را با دقت بالایی شبیه سازی کرده است. این انطباق ساختاری در شبیه سازی هم زمان فرآیندهای تولید اکسیژن (فتوسنتز) و مصرف اکسیژن (تنفس و تجزیه مواد آلی)، اعتبار مدل را برای تحلیل سناریوهای مدیریت مخزن تأیید می کند. یافته های این بخش با نتایج مطالعات Mi و همکاران (۲۰۲۰) در زمینه شبیه سازی دقیق اکسی کلاین در مخازن عمیق هم خوانی کامل دارد.

<sup>21</sup> Non-linear Response



شکل (۱۰): الگوی توزیع کاهشی اکسیژن در عمق مخزن سد زاینده‌رود در سناریوی پایه در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

تقریبی ۲۵ متر (در عمیق‌ترین بخش) و تداوم غلظت‌های بالای ۵ mg/L در بخش بزرگی از ستون آب (ترازهای بالای ۱۹۹۵ متر)، مانع از گسترش شرایط بی‌هوازی به کل مخزن شده است. در این سناریو، حجم ذخیره در تراز ۲۰۲۰ متر به‌عنوان یک تعدیل‌کننده حرارتی<sup>۲۳</sup> عمل کرده و مطابق با اصول Wetzel (۲۰۰۱)، پایداری لایه‌بندی مانع از انتقال سریع مواد آلی و مصرف اکسیژن در کل ستون آب شده است. اگرچه ناحیه بی‌هوازی در مجاورت بستر کاملاً شکل گرفته است، اما با توجه به اینکه بیش از ۷۰ درصد از ارتفاع ستون آب در مقاطع عمیق دارای غلظت اکسیژن مطلوب (بالای ۵ mg/L) است، سیستم هنوز به آستانه بحرانی کمبود اکسیژنی که توسط Jane و همکاران (۲۰۲۱) توصیف شده، نرسیده است

در لایه‌های سطحی، غلظت اکسیژن محلول به‌دلیل فرآیندهای بازتغذیه جوی<sup>۲۲</sup> و اختلاط ناشی از باد، در بازه مطلوب ۸ تا ۱۰ mg/L تثبیت شده است که این امر نشان‌دهنده پتانسیل بالای خودپالایی در لایه‌های فوقانی است. با افزایش عمق و عبور از لایه اکسی‌کلاین که در این مقطع در تراز تقریبی ۱۹۹۳ تا ۱۹۹۵ (عمق ۵ تا ۷ متری از سطح) شکل گرفته است، غلظت اکسیژن با شیب تندی کاهش می‌یابد. اگرچه طبق پروفیل‌های شکل ۱۰، در نزدیکی بستر و نواحی عمیق مجاور بدنه سد، یک ناحیه بی‌هوازی با غلظت کمتر از ۲ mg/L در اعماق پایین‌تر از تراز ۱۹۹۰ متری شکل گرفته است، در نواحی عمیق مجاور بدنه سد (فاصله ۰ تا ۵۰۰۰ متر از تاج)، ضخامت این ناحیه بی‌هوازی به حدود ۱۵ تا ۲۰ می‌رسد که نشان‌دهنده کمبود اکسیژن در لایه‌های تحتانی است. با این حال، وجود لایه هیپولیمنیون با ضخامت

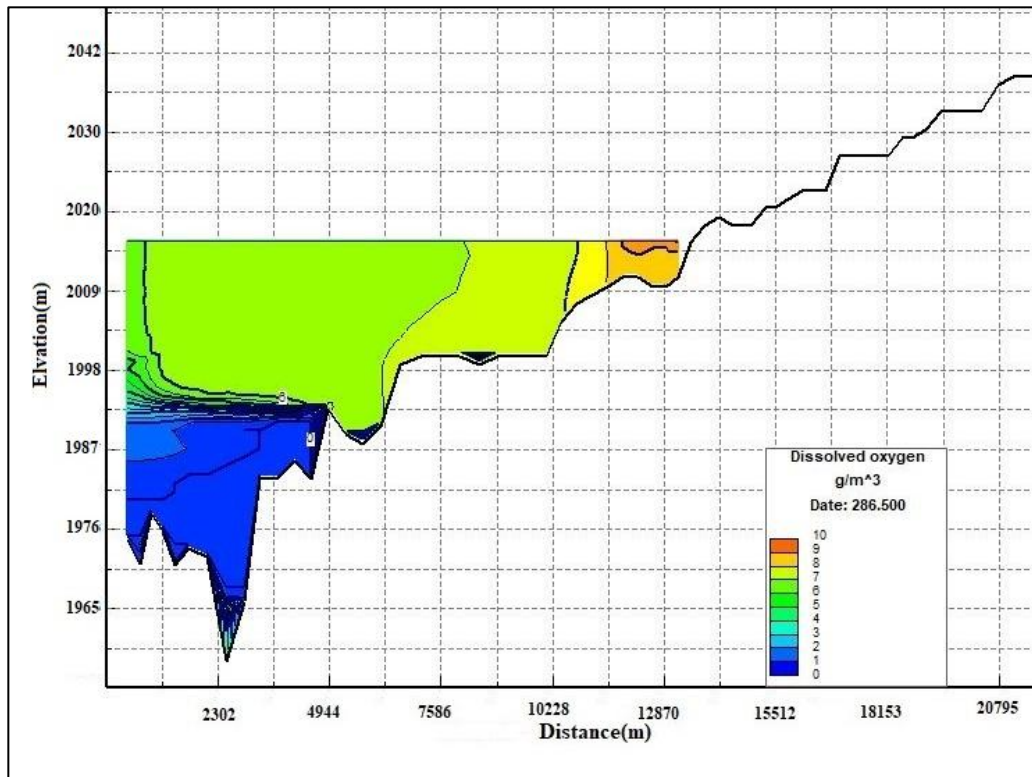
<sup>23</sup> Thermal Buffer

<sup>22</sup> Atmospheric Reaeration

### سناریوی اول: تحلیل فشرده سازی اکسی کلاین در پاسخ به افت تراز آب (۲۰۱۷ متر)

در این سناریو، با کاهش ۱۰ درصدی دبی ورودی افت ۳ متری تراز مخزن (از تراز ۲۰۲۰ به ۲۰۱۷ متر)، نخستین نشانه های تغییر در ساختار لایه بندی اکسیژن مشاهده می شود. مطابق با شکل ۱۱ پدیده فشرده سازی لایه اکسی کلاین به وضوح قابل مشاهده است؛ وضعیتی که در آن مرز میان لایه فوقانی (غنی از اکسیژن) و لایه تحتانی (بدون اکسیژن) از تراز ۱۹۹۳ در سناریوی پایه به تراز تقریبی ۱۹۹۸ متری در این سناریو جابه جا شده است. این به معنای صعود ۵ متری مرز بی هوازی به سمت سطح است. تحلیل پروفیل های شکل ۱۱ نشان می دهد که با کاهش انرژی جنبشی ناشی از افت دبی، توان اختلاط عمودی تضعیف شده و ناحیه بی هوازی ( $DO < 2 \text{ mg/L}$ ) از سمت بستر پیشروی کرده است. در این وضعیت، ضخامت لایه اپی لیمنیون (محدوده ۸-۱۰  $\text{mg/L}$ ) از حدود ۷ متر در سناریوی پایه به کمتر از ۴ متر کاهش یافته است. همچنین، ناحیه بی هوازی

در نواحی عمیق سد، تا ترازهای بالاتر گسترش یافته و حجمی از مخزن را در بر گرفته است که پیش از این دارای غلظت های متوسط (۴-۵  $\text{mg/L}$ ) بودند. این تغییرات نشان دهنده آغاز حساسیت مخزن است؛ زیرا با افت ۳ متری تراز، حجم لایه هیپولیمنیون کاهش یافته و در نتیجه نسبت نرخ تقاضای اکسیژن رسوبات (SOD) به حجم آب در دسترس افزایش یافته است. یافته های این بخش با نتایج Woolway و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد که نشان دادند حتی افت ترازهای کم (کمتر از ۵ متر) می تواند از طریق تغییر در ضرایب پخش عمودی، ساختار اکسیژن را تغییر دهد. بر این اساس، افت تراز به ۲۰۱۷ متر را می توان نقطه شروع کمبود اکسیژنی در مخزن زاینده رود در نظر گرفت که در آن، ناحیه بی هوازی حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد نسبت به حالت پایه به سمت لایه های فوقانی گسترش یافته است.



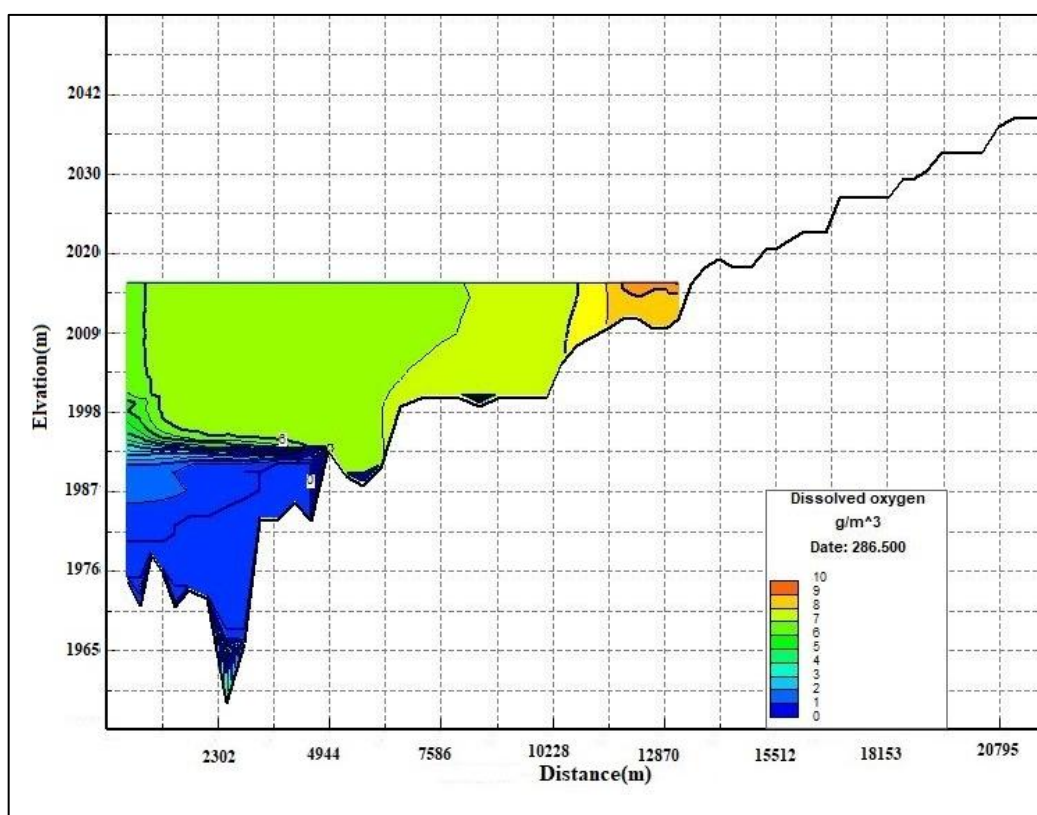
شکل (۱۱): الگوی توزیع کاهشی اکسیژن در عمق مخزن سد زاینده‌رود در سناریوی اول در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

این سناریو، منجر به غالب شدن فرآیندهای بیوشیمیایی شده و نرخ تقاضای اکسیژن رسوبات (SOD) به دلیل کاهش حجم آب در دسترس، اثرگذاری شدیدی یافته است. در این تراز، مساحت ناحیه آبی تیره (محدوده بی‌اکسیژنی) در مقطع عرضی نسبت به سناریوی قبلی (۲۰۱۷ متر)، حدود ۳۰ درصد گسترش یافته است. این وضعیت، شرایط محیطی بستر را به یک محیط به شدت احیاکننده تبدیل کرده است. نتایج این بخش با نظریه  $M_i$  و همکاران (۲۰۲۰) در خصوص اثر کاهش حجم محدود، تطابق عددی دارد؛ زیرا با افت ۷/۵ متری تراز، نسبت سطح تماس رسوب به حجم آب ( $SA/V$ ) به میزان قابل توجهی افزایش یافته و نقش SOD را در کاهش غلظت اکسیژن لایه‌های میانی تا ۲ برابر نسبت به حالت پایه تقویت کرده است. بر این اساس، تراز ۲۰۱۲/۵ متر به عنوان یک آستانه بحرانی شناسایی می‌شود؛ زیرا در این تراز، حجم ناحیه

سناریوی دوم: ارزیابی تشکیل قلمرو کم‌اکسیژنی حاد و افزایش زمان ماند (۲۰۱۲/۵ متر)

با افزایش افت تراز مخزن به ۲۰۱۲/۵ متر (افت ۷/۵ متری نسبت به تراز پایه) و کاهش ۲۰ درصدی دبی ورودی، مخزن وارد مرحله بحرانی از نظر افت کیفیت آب می‌شود. مطابق با خروجی‌های مدل در شکل ۱۲، پروفیل عمودی اکسیژن به طور محسوسی تغییر کرده است؛ به طوری که مرز ناحیه بی‌هوازی ( $DO < 2 \text{ mg/L}$ ) از تراز ۱۹۹۳ در حالت پایه به تراز ۲۰۰۳ متر افزایش یافته است. این جابه‌جایی ۱۰ متری اکسی‌کلاین به سمت سطح، نشان‌دهنده اختصاص بیش از ۴۵ درصد از عمق مفید مخزن توسط ناحیه بی‌هوازی در مقطع نزدیک به دیواره سد است. تحلیل کمی پروفیل‌ها نشان می‌دهد که لایه اپی‌لیمنیون (منطقه اشباع اکسیژن) تحت تأثیر کاهش حجم، به لایه‌ای نازک با ضخامت تقریبی ۳ تا ۳/۵ متر محدود شده است. افزایش زمان ماند مانند هیدرولیکی در

مرده<sup>۲۴</sup> از نظر کیفی به بیش از ۱/۵ برابر شرایط استاندارد  
رسیده و سیستم در وضعیت پایداری پایین زیست محیطی  
قرار می گیرد.



شکل (۱۲): الگوی توزیع کاهشی اکسیژن در عمق مخزن سد زاینده رود در سناریوی دوم در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

آب در این سناریو ۲۰۰۶ متر است، این بیانگر آن است که ناحیه بی هوایی حدود ۹۰ درصد از کل ستون آب را در عمیق ترین مقطع مخزن فرا گرفته و تنها لایه ای بسیار نازک (حدود ۲/۵ متر) در سطح دارای اکسیژن است. در این شرایط، مخزن عملاً توان خودپالایی خود را از دست داده است؛ زیرا نسبت سطح تماس رسوبات به حجم کل آب به حداکثر مقدار خود رسیده و نرخ تقاضای اکسیژن رسوبات (SOD) بر تمامی فرآیندهای بازتغذیه اکسیژن فراتر رفته است. طیف های رنگی

سناریوی سوم: واکاوی فروپاشی توان خودپالایی در شرایط خشکسالی شدید (تراز ۲۰۰۶ متر)

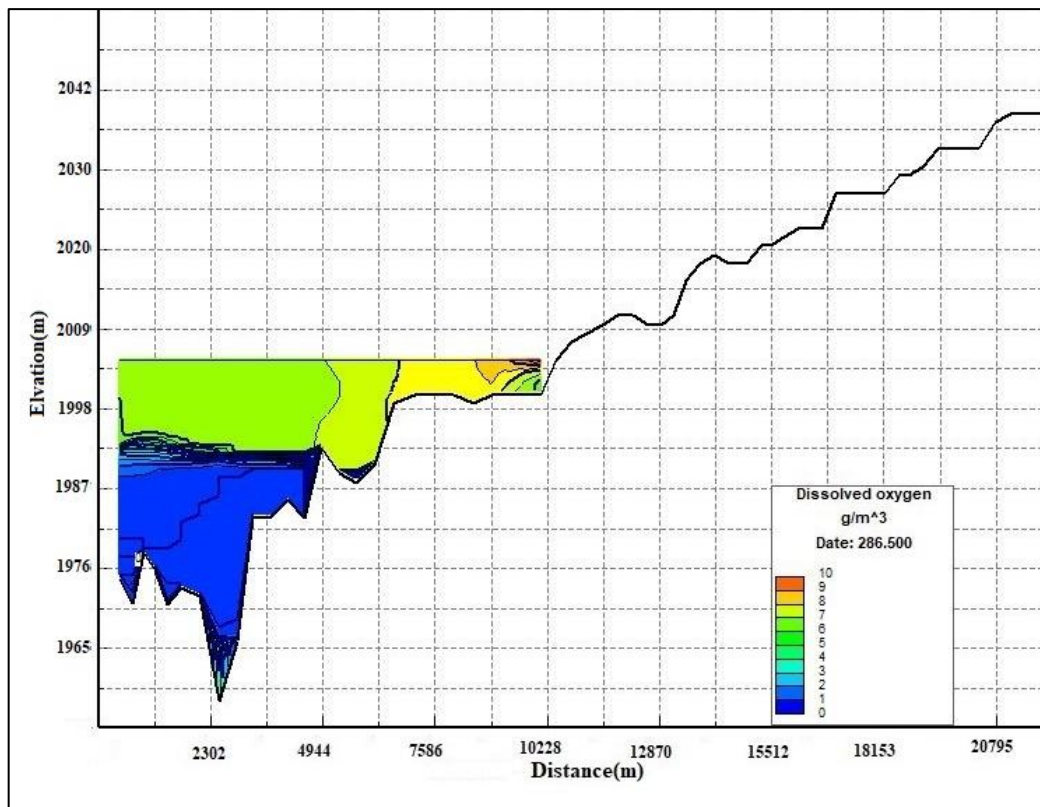
این سناریو بیانگر بدترین وضعیت هیدرودینامیکی و کیفی مخزن در طول دوره شبیه سازی است. در تراز ۲۰۰۶ متر (افت ۱۴ متری نسبت به تراز پایه)، سیستم با کمبود اکسیژنی مواجه شده است. مطابق با خروجی های مدل در شکل ۱۳، مرز ناحیه بی هوایی ( $DO < 2 \text{ mg/L}$ ) به تراز ۲۰۰۳/۵ متر افزایش یافته است. با توجه به اینکه تراز سطح





داده است. در مقایسه با سناریوی پایه ناحیه بی‌هوازی تنها محدود به لایه‌های عمقی (ترازهای زیر ۱۹۹۳) بود، در سناریوی سوم این توده با گسترشی معادل ۴ برابر حالت پایه، سلامت اکوسیستم را به‌طور کامل با تهدید مواجه کرده است. برخلاف شرایط تراز بالا که تعادل میان بارگذاری مواد آلی و ظرفیت پذیرش مخزن برقرار بود، در تراز ۲۰۰۶ متر، سیستم با نابودی اکولوژیک مواجه شده و توانایی حفظ استانداردهای کیفی آب شرب را از دست داده است.

تیره در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که لایه کم‌اکسیژن (رنگ آبی تیره) از تراز پایه (۱۹۹۳ متر) حدود ۱۰/۵ متر به سمت بالا پیشروی کرده و به نزدیکی لایه‌های سطحی رسیده است. این وضعیت از نظر بهره‌برداری، به معنای خروج آب از دریچه‌های تحتانی با غلظت اکسیژن نزدیک به صفر و پتانسیل بالای آزادسازی آلاینده‌های داخلی (فسفر و منگنز) است. یافته‌های این بخش با نتایج Zhang و همکاران (۲۰۱۵) مطابقت عددی دارد. در این تراز، مخزن از یک سیستم تولیدکننده به یک سیستم مصرف‌کننده اکسیژن تغییر رژیم



شکل (۱۳): الگوی توزیع کاهشی اکسیژن در عمق مخزن سد زاینده‌رود در سناریوی سوم در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۲۱

درصد (تراز ۲۰۰۶ متر)، سیستم دچار کمبود اکسیژنی شده و توان خودپالایی خود را از دست می‌دهد. در این حالت، پیشروی ناحیه بی‌هوازی کل ستون آب را در بر گرفته و مخزن به یک محیط احیاکننده مستعد برای آزادسازی فسفر تبدیل می‌شود. لذا جهت حفظ حیات اکولوژیک مخزن و جلوگیری

### نتیجه‌گیری

نتایج این تحقیق نشان داد که مخزن زاینده‌رود نسبت به کاهش دبی ورودی دارای یک آستانه تحمل بحرانی است. نتایج مدل‌سازی ثابت کرد که کاهش دبی تا ۲۰ درصد، مخزن را در وضعیت هشدار قرار می‌دهد، اما با فراتر رفتن از مرز ۳۰

از بحران‌های کیفی، حفظ تراز آب بالای ۲۰۱۷ متر به عنوان  
یک ضرورت مدیریتی پیشنهاد می‌گردد.

## منابع

- Adrian, R. O. Reilly., H. Zagarese, S. B. Baines, D. O. Hessen, W. Keller. and G. A. Weyhenmeyer. 2009. Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6), 2283-2297.
- Azadi, F., P.-S. Ashofteh, and X. Chu. 2020. Evaluation of the effects of climate change on thermal stratification of reservoirs. *Journal pre-proof*.
- Cole, T. M., and S. A. Wells. 2015. CE-QUAL-W2: A hydrodynamic and water quality model for rivers, estuaries, lakes, and reservoirs. Version 3.7. US Army Corps of Engineers.
- Ebrahimi, M., E. Jabbari, H. Abbasi. et al. 2015. Simulation of thermal structure in Baft Dam reservoir using CE-QUAL-W2. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 5(1), 07-11.
- IPCC. 2021. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jane, S. F., G.J. Hansen, B.M. Kraemer, P.R. Leavitt, J.L. Mincer, R.L. North, and R.I. Woolway. 2021. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861), 66-70.
- Mi, C., T. Shatwell, J. Ma, Wentzky, B. Xu. Y. Boehrer, K. Rinke. 2020. The formation of a metalimnetic oxygen minimum exemplifies how ecosystem dynamics shape bio- geochemical processes: a modelling study. *Water Res.*
- Noori, R., R. Berndtsson, J. F. Adamowski, and M. Rabiee Abyaneh. 2018. Temporal and depth variation of water quality due to thermal stratification in Karkheh Reservoir, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume (19), 279-286.
- O'Reilly, C. M., S. Sharma, D. K. Gray, S. E. Hampton, J. S. Read, R. J. Rowley, and G. Zhang. 2023. Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe. *Nature Climate Change*, 13(5), 456-464.
- Sadeghian, A., S.C. Chapra, J. Hudson, H. Wheeler, K.-E. Lindenschmidt. 2018. Improving in-lake water quality modeling using variable chlorophyll a/algal biomass ratios. *Environ. Modell. Softw.* 101, 73-85.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd ed.). Academic Press.
- Woolway, R. I., and C. J. Merchant, 2019. Amplification of lake surface warming by lake size: Implications for high-latitude lake eutrophication. *Geophysical Research Letters*, 46(1), 162-171.
- Woolway, R. I., S. Sharma, G. A. Weyhenmeyer, A. Creighton, T. Shatwell, and J. D. Lenters. 2021. Phenological shifts in lake stratification under climate change. *Nature Communications*, 12(1), 2318.
- Zhang, Y., X. Liu, and J. Chen. 2022. Reservoir sediment nutrient release under hypoxia: A review of mechanisms and controlling factors. *Journal of Environmental Management*, 318, 115598.
- Ziaei, M., B. Mohammadnezhad, M. Taheriyoun, A. Karimi, and S. Amiri. 2019. Evaluation of eutrophication in Zayandeh-Rood Dam reservoir using numerical modeling. *Journal of Environmental Science and Technology*, 21(5), 112-126.