Vol 13, No. 4, Winter 2023

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Modeling of Dissolved Oxygen in Ekbatan Reservoir Using CE-QUAL-W2 Model

Seyedeh Zahra Hassani[1] | Parisa-Sadat Ashofteh[2]✉

1. Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: sz.hasani@stu.qom.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran. E-mail: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 27 May 2023
Received in revised form
28 August 2023
Accepted 22 September 2023
Published online 17 January 2024

Keywords:
CE-QUAL-W2 model
Dam reservoir
Dissolved oxygen
Thermal stratification

ABSTRACT

This research, using the CE-QUAL-W2 hydrodynamic model, investigates and simulates the dissolved oxygen (DO) parameter in the Ekbatan dam reservoir under the influence of thermal stratification and temperature changes. Ekbatan Reservoir plays an important role in providing drinking and agriculture water in Hamedan city, so checking its water quality seems essential. The results show that the CE-QUAL-W2 model simulates well the temperature changes of the reservoir by considering the volume and geometry of the reservoir and meteorological parameters. Due to the fact that dissolved oxygen is affected by thermal stratification, the relationship between these two parameters has been investigated and the possibility of evaluating water quality through thermal stratification of the reservoir has been presented. The results show that thermal stratification in Ekbatan reservoir has periods of thermal stratification change and is complete in summer, while complete mixing occurs in autumn and early winter. These changes also affect the DO stratification in the reservoir. With a 68 percent increase in temperature, the DO concentration decreases by about 37.5 percent, and with a decrease in temperature, the DO concentration increases in the same proportion. In addition, the research results show that changes in air temperature have a significant effect on the concentration of DO in the reservoir. The change in temperature leads to a decrease in the density of water and a decrease in the solubility of oxygen in water, which in turn leads to a decrease in the concentration of DO in the reservoir water, and this issue is widely considered in environmental studies and water resources management.

Cite this article: Hassani, S. Z., & Ashofteh, P. S. (2023). Modeling of Dissolved Oxygen in Ekbatan Reservoir Using CE-QUAL-W2 Model. *Journal of Water and Irrigation Management*, 13 (4), 983-1000.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359526.1077

© The Author(s).
Publisher: The University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359526.1077

دوره سیزدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۴۰۲

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

مدل‌سازی اکسیژن محلول در مخزن اکباتان با استفاده از مدل CE-QUAL-W2

سیده زهرا حسنی[۱] | پریساسادات آشفته[۲]✉

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: sz.hasani@stu.qom.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران. رایانامه: PS.Ashofteh@qom.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۳۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۲۷

کلیدواژه‌ها:

اکسیژن محلول

لایه‌بندی حرارتی

مخزن سد

مدل CE-QUAL-W2

چکیده

این پژوهش، با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CE-QUAL-W2، به بررسی و شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول (DO) در مخزن سد اکباتان و تحت تأثیر تغییرات لایه‌بندی حرارتی و دما می‌پردازد. مخزن اکباتان در تأمین آب شرب و کشاورزی شهرستان همدان نقش مهمی ایفا می‌کند. از این‌رو، بررسی کیفیت آب آن امری ضروری به‌نظر می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که مدل CE-QUAL-W2 با درنظرگرفتن حجم و هندسه مخزن و پارامترهای هواشناسی، به‌خوبی تغییرات دمایی مخزن را شبیه‌سازی می‌کند. با توجه به این‌که اکسیژن محلول تحت تأثیر لایه‌بندی حرارتی قرار دارد، ارتباط میان این دو پارامتر موردبررسی قرار گرفته و امکان ارزیابی کیفیت آب از طریق لایه‌بندی حرارتی مخزن ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که لایه‌بندی حرارتی در مخزن اکباتان دارای دوره‌های تغییر لایه‌بندی حرارتی است و در فصل تابستان کامل می‌شود، درحالی‌که در فصل‌های پاییز و اوایل زمستان اختلاط کامل رخ می‌دهد. این تغییرات هم‌چنین تأثیری بر لایه‌بندی DO در مخزن دارند. با افزایش ۶۸ درصدی دما، غلظت DO حدود ۳۷/۵ درصد کاهش می‌یابد و با کاهش دما، غلظت DO به همین نسبت افزایش می‌یابد. علاوه‌بر این، نتایج پژوهش نشان می‌دهند که تغییرات دمای هوا تأثیر قابل‌توجهی بر غلظت DO در مخزن دارد. تغییر دما منجر به کاهش چگالی آب و کاهش حلالیت اکسیژن در آب می‌شود، که به‌نوبه خود منجر به کاهش غلظت DO در آب مخزن گردیده و این مسأله به‌طور گسترده‌ای در مطالعات محیط زیست و مدیریت منابع آب موردتوجه قرار دارد.

استناد: حسنی، سیده زهرا و آشفته، پریسا سادات (۱۴۰۲). مدل‌سازی اکسیژن محلول در مخزن اکباتان با استفاده از مدل CE-QUAL-W2. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۳ (۴)، ۱۰۰۰-۹۸۳. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2023.359526.1077

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت، رشد و توسعه صنعت و اقتصاد (در بُعد جهانی)، تقاضای جهانی برای آب چندین برابر شده است، به‌گونه‌ای که آب رودخانه‌ها، مصب‌ها و دریاچه‌های طبیعی از نظر کمی، کیفی و پراکندگی جغرافیایی دیگر پاسخگوی نیاز انسان نیست و به‌همین دلیل سرانه آبی برای مردم جهان رو به کاهش است. برای غلبه بر این مشکل مخازن به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین نیاز آبی در سراسر دنیا احداث می‌شوند. ساخت و بهره‌برداری از سدها اثرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی بر رودخانه‌ها دارد. این اثرات دارای ویژگی‌های مثبت و منفی مانند کنترل سیلاب، تولید انرژی برق آبی، تأمین آب برای بخش‌های کشاورزی و شرب، و هم‌چنین تغییرات در ساختار کیفی آب خروجی است (Khonok *et al*., 2021; Yigzaw *et al*., 2019). از سوی دیگر، آلاینده‌هایی هم‌چون پساب‌های صنعتی، زه‌آب‌های کشاورزی و فاضلاب‌های شهری و روستایی، منابع آبی را آلوده و از استانداردهای مصرف خارج می‌کنند. مخازن با آلاینده‌هایی که رودخانه‌ها آن‌ها را به‌ویژه در مواقع سیلابی حمل می‌کنند، آلوده می‌شوند و زمان ماند بالای این آلاینده‌ها، باعث کاهش کیفیت آب مخازن می‌شود. افزایش مواد محلول و جامد در آب، خطر آلوده‌شدن آن را افزایش می‌دهد. بنابراین می‌توان دریافت که یکی از مسائل مهم مربوط به مخازن سدها، پیش‌بینی کیفیت آب مخزن و خروجی آن در حین بهره‌برداری است. غلظت اکسیژن محلول[۱]، جزو مؤلفه‌های مهم برای بررسی کیفیت آب در مخازن به‌شمار می‌رود. کاهش غلظت اکسیژن باعث کاهش کیفیت آب و به‌وجودآوردن مشکلاتی در برآوردن نیازهای مختلف محیطی است که حیات آبزیان زیست‌بوم پایین‌دست رودخانه را به‌خطر می‌اندازد. این پدیده باعث کاهش کیفیت آب و افزایش رشد جلبک‌ها و گیاهان آبزی در مخازن و باعث بروز پدیده‌هایی هم‌چون افزایش رسوب‌گذاری در مخزن می‌شود، که دوباره میزان اکسیژن محلول در آب را کاهش می‌دهد (Sun *et al*., 2022; Yigzaw *et al*., 2019). در ادامه به بررسی پژوهش‌های پیشین در ارتباط با مطالعات کیفی منابع آب همراه با مدل‌سازی‌های مربوطه پرداخته می‌شود.

Afshar *et al.* (2011) با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات[۳] (PSO) به واسنجی خودکار پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی دما در مدل CE-QUAL-W2 پرداختند که برای شبیه‌سازی دما در مخزن سد کرخه استفاده شده بود. با توجه به تحلیل حساسیت انجام‌گرفته، پارامترهای ضریب پوشش باد[۴] (WSC) در طی روزهای شبیه‌سازی، ضریب محوشدن نور در آب[۵] (EXH2O) و ضریب جذب نور در سطح آب[۶] (Beta) به‌عنوان پارامترهای مؤثر در واسنجی دما معرفی شدند. Berger and Wells (2014) به بررسی و شبیه‌سازی اکسیژن موردنیاز رسوبات و هم‌چنین انتقال جرم آمونیاک، فسفات، متان، سولفیدهیدروژن، اکسیژن محلول در ستون آب و رسوبات بر روی مخزن وایاوا در آمریکا با استفاده از CE-QUAL-W2 پرداختند. Ebrahimi *et al.* (2015) شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و شوری در مخزن سد بافت را با استفاده از CE-QUAL-W2 موردمطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش نشان دادند، لایه‌بندی حرارتی در نُه ماه از سال رخ می‌دهد، که این پدیده از آوریل شروع و در اوت و سپتامبر به اوج خود می‌رسد. هم‌چنین نتایج حاصل از پژوهش نشان دادند، نتایج نشان دادند بین شوری و لایه‌بندی حرارتی همبستگی وجود داشت. بیش‌ترین مقدار شوری در مخزن نشان‌دهنده وضعیت مطلوب برای مخزن سد بافت از نظر آب آشامیدنی و کشاورزی بود. Torres *et al.* (2016) با استفاده از CE-QUAL-W2 به بررسی تغییرات اکسیژن ناشی از اکسیدشدن یون Fe^{2+} در مخزن سانچوی اسپانیا پرداختند. نتایج نشان دادند که اکسیدشدن آهن عامل اصلی کاهش اکسیژن در مخزن سد سانچو بود. He *et al.* (2017) به مدل‌سازی اثر پرده کنترل دما۷ (TCC) بر ساختار حرارتی عمق مخزن پرداختند. ایشان از یک مدل هیدرودینامیکی دوبعدی استفاده کردند که در آن شبیه‌سازی جریان تحت سناریوهای مختلف و قوانین ناپایداری و جریان‌های خروجی به‌دست آوردند. نتایج نشان دادند هنگامی که نسبت آب نگهدارنده (Pr) پایین‌تر ازTCC افزایش پیدا می‌کند، تفاوت دما بین جریان ورودی و خروجی به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد، در حالی‌که پایداری

حرارتی ابتدا افزایش می‌یابد و در مرحله بعد کاهش می‌یابد. Sabeti *et al.* (2017) لایه‌بندی حرارتی و شوری سد ماملو در استان تهران را با استفاده از CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی نمودند. نتایج نشان دادند که مخزن در تابستان لایه‌بندی حرارتی[1] و در فصل زمستان اختلاط عمودی را تجربه خواهد کرد. هم‌چنین نتایج نشان دادند که لایه‌بندی حرارتی و شوری در یک زمان، غالب شدند. Shabani *et al.* (2017) برای تخمین بیلان آب دریاچهٔ دویلز در آمریکا و هم‌چنین دما و غلظت سولفات محلول در آن از مدل تلفیقی CE-QUAL-W2 و SWAT استفاده کردند و این آلاینده را به‌صورت پایستار در پیکرهٔ آبی شبیه‌سازی نمودند. Ramos-Fuertes *et al.* (2018)، CE-QUAL-W2 را برای شبیه‌سازی آثار هیدرودینامیک و وضعیت لایه‌بندی حرارتی مخزنی در اسپانیا استفاده کردند و برای واسنجی مدل از داده‌های اندازه‌گیری‌شده در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ استفاده شد. Rezaei Barandagh *et al.* (2018) به بررسی لایه‌بندی حرارتی و کیفی سد تهم زنجان با استفاده از CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج نشان‌دهنده وجود یک دوره هشت ماهه لایه‌بندی حرارتی در مخزن بود. این پدیده از اواخر فروردین‌ماه شروع و در ماه‌های مرداد و شهریور با اختلاف ۲۰ درجه سانتی‌گرادی بین رولایه و زیرلایه به اوج خود می‌رسد. هم‌چنین در ماه‌های دی تا فروردین در مخزن اختلاط کامل رخ داد. نتایج وجود لایه‌بندی شوری هم‌زمان با لایه‌بندی حرارتی در مخزن را نشان دادند. Talakesh *et al.* (2019) کیفیت آب مخزن سد کارون۳ استان خوزستان را با استفاده از CE-QUAL-W2 بررسی کردند. نتایج نشان دادند، دوره لایه‌بندی حرارتی در این مخزن از اواخر فروردین‌ماه شروع شده و در اواسط تابستان به اوج خود می‌رسد. با ورود به فصول سرد سال، لایه‌بندی تشکیل‌شده به‌تدریج از بین رفته و در اسفند ماه اختلاط کامل در مخزن رخ داد. تغییرات غلظت اکسیژن محلول نیز با افزایش عمق روند نزولی را نشان داد، به‌طوری‌که غلظت آن از ۷/۰۷ به ۴/۳۷ میلی‌گرم در لیتر در شهریور می‌رسد. این حالت در نهایت باعث تغییر رنگ و ایجاد بوی نامطبوع در مخزن می‌شود. Salehi *et al.* (2019) کیفیت آب مخزن سد مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی را با استفاده از CE-QUAL-W2 بررسی کردند. نتایج نشان دادند، مخزن سد مهاباد در تابستان دارای لایه‌بندی به‌نسبت قوی بود که در مرداد ماه به اوج خود می‌رسد. با شروع پاییز و هم‌زمان با کاهش تشعشعات خورشیدی به مخزن، لایه‌بندی حرارتی به اختلاط کامل در مخزن در آذرماه می‌انجامد. هم‌چنین نتایج نشان دادند، تغییرات TDS با افزایش عمق روند صعودی داشت، به‌طوری‌که بیشینه غلظت در کف مخزن، در طول بازه زمانی بررسی رخ داده بود. درحالی‌که، غلظت اکسیژن محلول با افزایش عمق مخزن کاهش می‌یابد. تغییرات غلظت اکسیژن محلول از خردادماه شروع شده و تا اواخر تابستان ادامه می‌یابد، به‌طوری‌که در این زمان از سال غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه۸ به صفر می‌رسد و در نهایت منجر به تولید رنگ و بوی نامطبوع در مخزن می‌شود. Duka *et al.* (2021) به بررسی پاسخ‌های لایه‌بندی حرارتی مخزنی در ژاپن پرداختند. تحلیل داده‌های بلندمدت ۶۰ ساله نشان داد که رژیم حرارتی مخزن با فصل و طرح برداشت متفاوت بود.

پژوهش‌های بررسی‌شده قبلی، به شبیه‌سازی دما، لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول و کیفیت آب در مخازن آبی با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها در سطوح مختلفی، جزییاتی از عوامل مؤثر بر کیفیت آب و تغییرات محیطی سامانه‌های آبی مختلف را بررسی می‌کنند. از نقاط قوت این پژوهش‌ها می‌توان به متنوع‌بودن موضوع‌ها در مطالعات از جمله تأثیر دما، لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول و کیفیت آب بر روی مخازن آبی و هم‌چنین در برخی از پژوهش‌ها با انجام تحلیل حساسیت، پارامترهای مؤثر در تغییرات کیفیت آب و دما در سامانه‌های آبی مختلف را مشخص کرده‌اند، اشاره کرد. نقاط ضعف این مطالعات را می‌توان عدم‌یکنواختی در داده‌ها و اعتماد به داده‌های اندازه‌گیری دانست. اگر دقت و کیفیت این داده‌ها مناسب نباشد، مدل‌سازی نیز به دقت و اعتبار خود ضربه می‌زند.

هدف این پژوهش‌ها بررسی و تحلیل رفتارها و ویژگی‌های حرارتی و شیمیایی مخازن آبی (مانند سدها) با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفیت آب CE-QUAL-W2، به‌منظور درک بهتر از پدیده‌های لایه‌بندی حرارتی،

اختلاط شیمیایی، تغییرات اکسیژن و شوری در مخازن آبی در طول زمان و شرایط مختلف فصلی و طرح‌های برداشت، برای بهبود مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی تحت تغییرات آبی و محیطی انجام می‌شود. در این پژوهش به‌دنبال پاسخ به سوالاتی از قبیل چه ویژگی‌های حرارتی و شیمیایی‌در طول زمان و با توجه به فصول مختلف در مخازن آبی نمایان می‌شوند؟ آیا تغییرات در پارامترهای مهمی مانند اکسیژن محلول، دما و لایه‌بندی حرارتی در مخازن آبی تأثیر چشم‌گیری دارند؟ چگونه با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هیدرودینامیکی و کیفیت آب مانند CE-QUAL-W2 می‌توان رفتارها و ویژگی‌های مخازن را مدل‌سازی کرد؟ هم‌چنین، این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که اطلاعات حاصل از آن‌ها چگونه می‌توانند به بهبود مدیریت و بهره‌برداری منابع آبی در شرایط مختلف آبی و محیطی کمک کنند و در نهایت به ما اطلاعات مفیدی را درباره عملکرد و واکنش مخازن در مقابل تغییرات آبی و محیطی ارائه می‌دهند و به برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی کمک می‌کنند.

با توجه به اُفت شدید نزولات جوی در دوره‌های زمانی اخیر و پیش‌رو و هم‌چنین استفاده از مخزن اکباتان برای مصارف شرب و کشاورزی در شهر همدان، هدف اصلی از انجام این پژوهش، بررسی کیفیت آب مخزن اکباتان است. با توجه به نیاز به تأمین منابع آبی مناسب برای اهداف مختلف، ضرورت نظارت دقیق بر غلظت اکسیژن محلول در مخازن آبی بسیار اهمیت دارد، زیرا این پارامتر تأثیر به‌سزایی بر زیست‌بوم آبزیان و جلبک‌ها در مخزن دارد. در این پژوهش، تأثیر عوامل کلیدی مانند دما، لایه‌بندی حرارتی و تغذیه‌گرایی بر کیفیت آب در پشت مخزن سد اکباتان بررسی شده است. برای دست‌یابی به این اهداف، از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 استفاده شده است که تاکنون در این زمینه به‌عنوان یک ابزار پیش‌فرض مورداستفاده قرار نگرفته بود. به‌منظور اطلاعات دقیق و به‌روز در سال‌های ۲۰۲۰–۲۰۱۹ شبیه سازی در این بازه زمانی انجام شده است تا بتواند بهبود مدیریت و بهره‌برداری از منابع آبی در شرایط تغییرات آبی و محیطی را ممکن سازد.

۲. مواد و روش‌ها

در این بخش، به روش انجام پژوهش و مدل‌سازی هیدرودینامیکی و کیفیت آب با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداخته خواهد شد.

۲. ۱. مدل CE-QUAL-W2

در این مطالعه از نسخه ۳/۷ مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی غلظت اکسیژن محلول استفاده شد. روندنمای فرایند مدل‌سازی مدل CE-QUAL-W2 در شکل (۱) ارائه شده است. CE-QUAL-W2، یک مدل هیدرودینامیکی میانگین‌گیری‌شده در عرض و دوبعدی است و به زبان FORTRAN نوشته شده است. این مدل، برای مطالعه کیفیت آب و برای پیکره‌های آبی به نسبت طولانی و باریک، مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن، مصب‌ها و هم‌چنین کل حوضه‌های رودخانه‌ای با مخازن متعدد مناسب است. اطلاعات موردنیاز برای شبیه‌سازی شامل اطلاعات هندسی مدل، داده‌های هواشناسی، شرایط اولیه (دما و عمق آب مربوط به اولین روز شبیه‌سازی)، شرایط مرزی (دبی ورودی به مخزن و خروجی از آن و دمای آب ورودی) و غیره هستند (Wells, 2021). CE-QUAL-W2، معادلات عرضی میانگین را با استفاده از روش تفاضل محدود حل می‌کند. معادلات اصلی حاکم بر مدل، شامل معادلات هیدرودینامیک جریان (معادلات پیوستگی و اندازه حرکت) و معادلات پخش–انتقال در جدول (۱) ارائه شده است. مدل CE-QUAL-W2 یک مدل هیدرودینامیکی–کیفی برای تحلیل و پیش‌بینی رفتار سامانه‌های آبی است. این مدل با درنظرگرفتن تأثیرات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در فرایندهای آبی، امکان مطالعه تغییرات مختلف متغیرهای کیفیت آب را فراهم می‌کند. در ادامه، برخی از فرضیات اصلی مدل CE-QUAL-W2 آورده شده است:

۱- فرایندهای هیدرودینامیکی: مدل از معادلات هیدرودینامیکی برای شبیه‌سازی جریان آب و تغییرات سطح آب در مخزن یا آب‌های رودخانه استفاده می‌کند. این فرایندها شامل حرکت جریان، تراز آب، سرعت آب و دیگر ویژگی‌های هیدرولیکی است.

۲- فرایندهای کیفی: مدل به مطالعه تغییرات کیفیت آب در طول زمان می‌پردازد. این شامل غلظت‌های مختلف آلاینده‌ها (مثل مواد آلی، نیتروژن، فسفر و ...) و غلظت اکسیژن محلول (DO) است.

۳- تعادل شیمیایی: مدل از تعادل‌های شیمیایی برای پیش‌بینی غلظت‌های آلاینده‌ها در آب استفاده می‌کند. این تعادل‌ها شامل فرایندهای آبی و شیمیایی هم‌چون تبادل یونی، اکسیداسیون-کاهش و تشکیل ترکیبات شیمیایی مختلف می‌شود.

۴- فرایندهای زیست‌شناسی: مدل قادر به شبیه‌سازی تأثیرات زیست‌شناسی از جمله رشد آبزیان و جلبک‌ها در آب مخزن است. این تأثیرات می‌توانند موجب تغییرات در غلظت‌های آلاینده‌ها و DO شوند.

۵- اعمال شرایط محیطی: مدل از اطلاعات محیطی مثل دما، نور، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی آب و غیره برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب استفاده می‌کند.

در کل، مدل CE-QUAL-W2 با ترکیب معادلات هیدرودینامیکی، شیمیایی، زیست‌شناختی و شرایط محیطی، امکان مطالعه و پیش‌بینی تغییرات کیفیت آب در مخزن‌ها یا منابع آبی را فراهم می‌کند و در تحلیل و مدیریت منابع آب و محیط زیست بسیار مفید است.

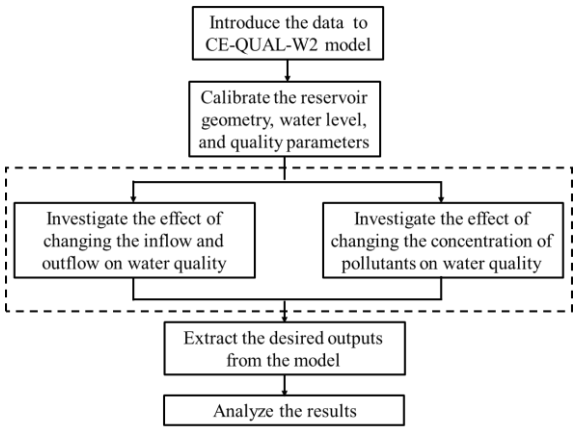


Figure 1. Flowchart of reservoir modeling process

Table 1. Main equations governing the model

Type	Equation
x-Momentum	$\frac{\partial UB}{\partial t}+\frac{\partial UUB}{\partial x}+\frac{\partial WUB}{\partial z}=gBsin\alpha+gcos\alpha B\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{gcos\alpha B}{\rho}\int_n^z\frac{\partial \rho}{\partial x}dz+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}+qBU_x$
Water Quality Transport	$\frac{\partial UB}{\partial t}+\frac{\partial UUB}{\partial x}+\frac{\partial WUB}{\partial z}=gBsin\alpha+gcos\alpha B\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{gcos\alpha B}{\rho}\int_n^z\frac{\partial \rho}{\partial x}dz+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xx}}{\partial x}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z}+qBU_x$
z-Momentum	$0=gcos\alpha-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z}$
state	$\rho=F(T_W,\Phi_{TDS},\Phi_{SS})$
Continuity	$\frac{\partial UB}{\partial x}+\frac{\partial WB}{\partial Z}=qB$
Free surface	$B_\eta\frac{\partial \eta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\int_n^h UBdz-\int_n^h qBdz$

Where, η = water level (meters); W and U = Average speed in the longitudinal and vertical directions (meters per second), respectively; B = Width of control volume; τ = Stress at xx and xz (Newtons per square meter); α = Slope; q = Inlet flow to control volume (cubic meters per second); T_W = Water temperature (degrees Celsius); Φ = Contaminant concentration; D_x و D_z = Respectively heat dissipation coefficient and pollution in the longitudinal and vertical directions; q_Φ = Water inlet (infiltration) or outlet (seepage); B_η = Width in level (meters), and s_Φ = Input or output pollution from other sources (cubic meters per second).

۲. ۲. لایه‌بندی حرارتی

لایه‌بندی حرارتی، به تغییر ناهموار دمای آب در نیم‌رخ‌های عمودی یک پیکره آبی اشاره دارد. دما بر نحوه پخش و انتقال آلاینده در مخزن مؤثر است. تغییرات دمایی سبب ایجاد تغییر در دانسیته آب و ایجاد لایه‌بندی حرارتی می‌شود. این لایه‌بندی به‌دلیل اختلاف دانسیته مانع از اختلاط آب در مخزن می‌شود. در مخزن لایه‌بندی حرارتی کامل، شامل سه لایه حرارتی رولایه (اپیلیمنیون)[۹]، میان‌لایه (متالیمنیون)[۱۰] و زیرلایه (هیپولیمنیون) است (Zhang *et al.*, 2022; Yigzaw *et al.*, 2019). اثرات لایه‌بندی حرارتی مخازن بر تغییرات غلظت اکسیژن محلول غیرقابل انکار است (Yigzaw *et al.*, 2019; 2022) که در این مطالعه به بررسی آن پرداخته خواهد شد. مشخصات کلی لایه‌های مخزن در شکل (۲) نمایش داده شده است. دما در مخزن سد تأثیر مستقیمی بر چگالی آب دارد. هنگامی‌که دما افزایش می‌یابد، چگالی آب کاهش می‌یابد و برعکس. این تغییرات در چگالی می‌توانند توزیع و حرکت آلاینده‌ها در آب را تحت تأثیر قرار دهند. در رابطه با DO نیز دما نقش مهمی دارد. زمانی‌که دما افزایش می‌یابد، ظرفیت حل‌شدن اکسیژن در آب کاهش می‌یابد، به‌عبارت دیگر، غلظت DO کاهش می‌یابد. این ممکن است منجر به کمبود اکسیژن در آب و اختلال در فرایندهای زیستی گوناگون شود که تأثیرات منفی بر زیست‌بوم‌های آبی دارد. به‌طور کلی، تغییرات دما در مخزن سد می‌توانند توزیع و رفتار آلاینده‌ها و میزان اکسیژن محلول را تحت تأثیر قرار دهند و بر زیست‌بوم‌های آبی منطقه تأثیر بگذارند.

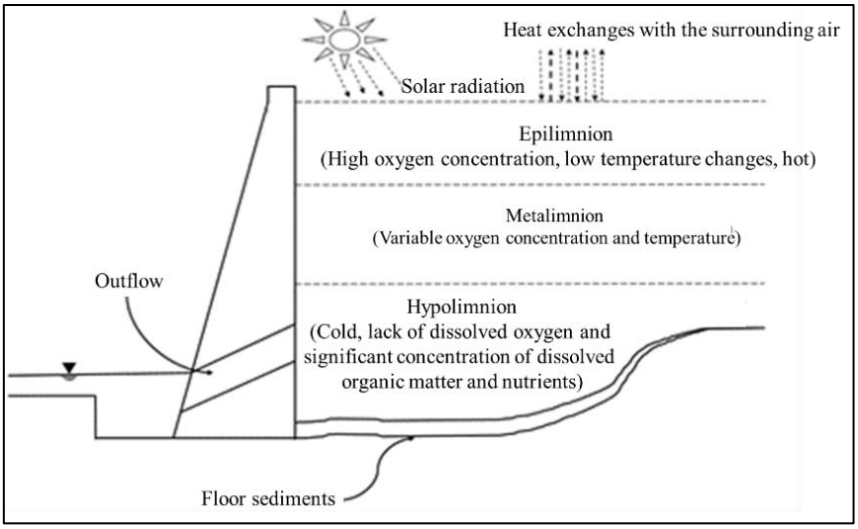


Figure 2. General specifications of different reservoir layers

۲. ۳. منطقه مطالعاتی

سد اکباتان بر روی رودخانه آبشینه در فاصله ۱۳ کیلومتری حوضه آبریز سد اکباتان به وسعت ۲۱۳ کیلومترمربع در جنوب شرقی شهرستان همدان قرار گرفته است. این سد بتنی یکی از اصلی‌ترین منابع تأمین‌کننده آب شرب و کشاورزی همدان به‌شمار می‌رود که طول تاج آن به ۶۳۷ متر می‌رسد. سد اکباتان در سال ۱۳۴۲ با ارتفاع ۵۴ متر و ظرفیت مفید شش میلیون مترمکعب مورد بهره‌برداری قرارگرفت و در سال ۱۳۸۶، ۲۵ متر به ارتفاع سد افزوده شد و ارتفاع آن به ۷۹ متر و ظرفیت مفید آن به ۳۶/۲ میلیون مترمکعب رسید. هدف از احداث این سد در درجه اول تأمین آب آشامیدنی شهر همدان و سپس تأمین بخشی از نیازهای آبی زمین‌های کشاورزی پایین‌دست سد بوده است. آبشینه و آبرو مهم‌ترین

ورودی‌های سد اکباتان هستند. سایر مشخصات سد در جدول (۲) آورده شده است. موقعیت حوضه آبریز سد اکباتان در شکل (۳) نمایش داده شده است. هم‌چنین، مخزن موردمطالعه در دو راستای طولی و عمقی به‌ترتیب در ۵۴ بخش و ۲۸ لایه توسط مدل CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی و پارامترهای هندسه مخزن که بیانگر حجم مخزن است، تراز سطح آب در مخزن و پارامترهای کیفی اکسیژن محلول و دما واسنجی گردید. در این پژوهش، از مجموعه‌ای چندگانه از داده‌ها و اطلاعات برای پارامترهای مختلف مدل CE-QUAL-W2 استفاده شده است. این داده‌ها از منابع مختلف جمع‌آوری شده‌اند تا تأثیر متغیرهای مختلف بر رفتارها و ویژگی‌های مخازن آبی موردمطالعه را به‌طور دقیق بررسی کنیم. اطلاعات هیدرومتری مخزن شامل عمق‌ها، مساحت‌ها، حجم‌ها و تغییرات مکانیکی در ساختار مخزن جهت مدل‌سازی تغییرات حرارتی و جریان آب، اطلاعات هندسی شامل جزییات هندسی مخازن آبی از جمله تراکم و جریانات سه‌بعدی آب در مخازن به‌منظور مدل‌سازی انتقال حرارت و جریان، اطلاعات کیفیت آب که داده‌های مربوط به غلظت‌های مختلف مواد شیمیایی مانند اکسیژن محلول، نیترات، فسفات و دیگر عناصر آلاینده به‌منظور مدل‌سازی کیفیت آب و تأثیر آلاینده‌ها بر زیست‌بوم مخزن استفاده شده‌اند، اطلاعات هواشناسی مانند دما، رطوبت، باد و تابش نور به‌منظور مدل‌سازی تأثیر شرایط هواشناسی بر تغییرات حرارتی و انتقال حرارت در مخزن مورداستفاده قرار گرفته‌اند.

Table 2. Location and specifications of Ekbatan Dam

Dam specifications	
Longitude (UTM)	280385 Meters
Latitude (UTM)	3848678 Meters
Total capacity	39 Million cubic meters
Dam basin level	1935 Meters above sea level
River bed level	1897 Meters above sea level
Normal level	1970 Meters above sea level

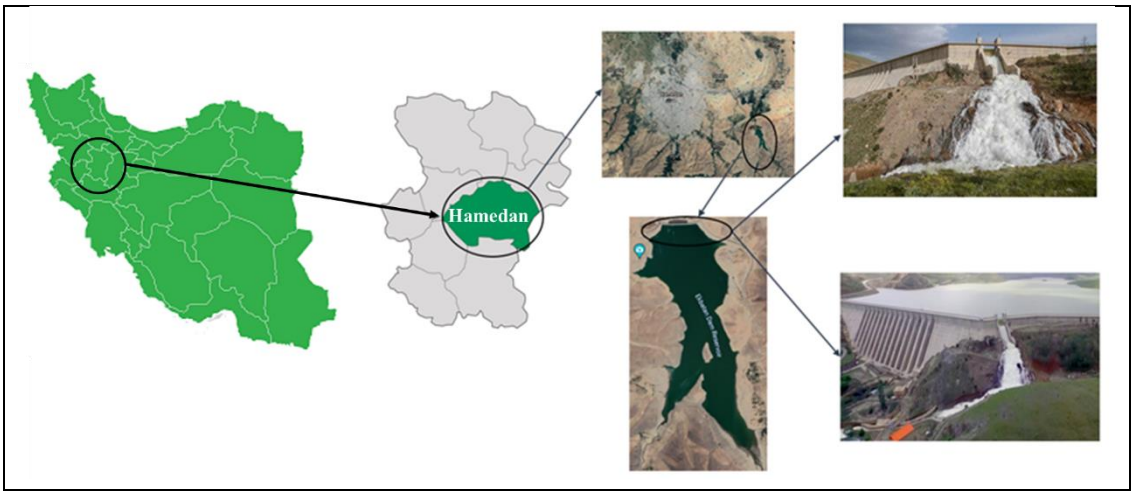


Figure 3. Location of the basin of Ekbatan Dam in Hamedan

۲. ۴. معیارهای ارزیابی

۲. ۴. ۱. خطای میانگین مطلق (*AME*) [11]

این معیار طبق راهنمای مدل Cole and Well (2015) یکی از بهترین معیارهای خطای ارزیابی می‌باشد. این معیار مقدار متوسط خطا در مجموعه پیش‌بینی‌ها را بدون در نظر گرفتن جهت، اندازه‌گیری می‌کند (رابطه ۱):

$$AME = \frac{\sum|Predicted - Observed|}{number\ of\ observed}$$ رابطه ۱)

۲. ۴. ۲. خطای ریشه میانگین مربعات[۱۲] (*RMS*)

یکی دیگر از معیارهای آماری که در ارزیابی‌ها مورداستفاده قرار می‌گیرد، خطای ریشه میانگین مربعات می‌باشد که برای بیان تفاوت مقادیر پیش‌بینی‌شده و شبیه‌سازی‌شده در مدل بوده و معیاری برای درک کارایی آن می‌باشد:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum|Predicted - Observed|^2}{number\ of\ observed}}$$ رابطه ۲)

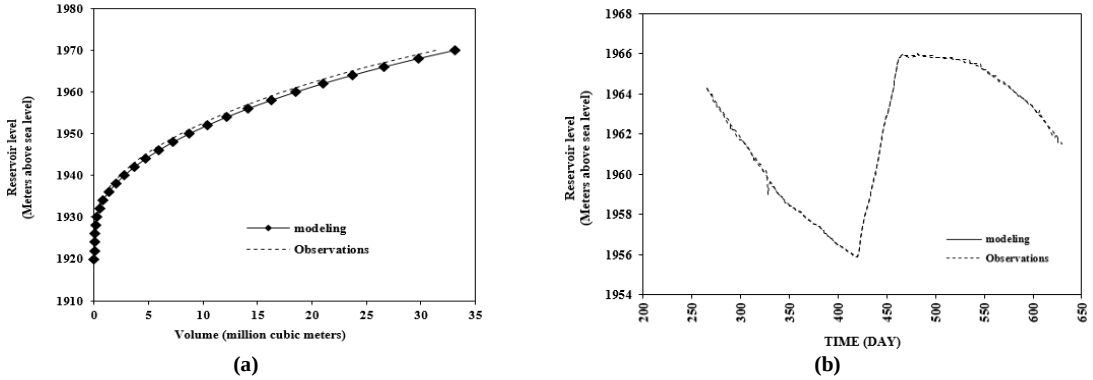
۳. نتایج و بحث

۳. ۱. واسنجی هندسه و تراز سطح آب مخزن سد اکباتان در مدل CE-QUAL-W2

در شبیه‌سازی کیفی مخزن سد اکباتان داده‌های شامل دبی‌های ورودی و خروجی، داده‌های هواشناسی، اکسیژن محلول، نیترات، فسفات، دمای آب ورودی به مخزن و دمای آب پشت مخزن برای مدل‌کردن مخزن سد به CE-QUAL-W2 معرفی شدند. نتایج مدل محاسباتی مخزن استخراج و با نتایج داده‌های مشاهداتی مقایسه گردید. برای این کار از داده‌های مشاهداتی اندازه‌گیری‌شده، نزدیک به دیواره سد در سال آبی ۲۰۲۰-۲۰۱۹ (واقع در دوره خشک‌سالی) به‌دلیل دسترسی کامل‌تر به اطلاعات کیفی و هم‌چنین نزدیکی به زمان حال، استفاده شده است. برای واسنجی هندسه مخزن که نشان‌دهنده حجم مخزن است اطلاعات از منحنی حجم- سطح- ارتفاع برای هندسه و از اطلاعات تراز سطح آب برای واسنجی تراز سطح آب استفاده شد و به‌منظور محاسبه میزان خطای میان نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط مدل و داده‌های مشاهداتی، سه معیار ضریب کارایی نش-ساتکلیف[۱۳] (*NSE*)، *AME* و *RMS* و ضریب همبستگی (R^2) به‌کار رفت که برای حجم مخزن و تراز سطح آب مخزن در جدول (۳) ارائه شده است. شکل (۴) نتایج حاصل از واسنجی را نشان می‌دهد. با توجه به مقایسه صورت‌گرفته و بررسی داده‌های مدل‌سازی‌شده و مشاهداتی که در جدول (۳) ارائه شده است، نتایج کارکرد مناسب و قابل اطمینان‌بودن مدل را نشان می‌دهد.

Table 3. Calibration errors of reservoir volume compared to observational data

Water level errors				Reservoir volume errors			
RMS **(m)**	***AME*** **(Meters)**	R^2 **(Dimensionless)**	***NSE*** **(Dimensionless)**	***RMS*** **(MCM)**	***AME*** **(MCM)**	R^2 **(Dimensionless)**	***NSE*** **(Dimensionless)**
0.092	0.009	0.999	1	0.676	0.878	0.999	0.99



(a) (b)

Figure 4. Calibration (a) geometry of Ekbatan dam reservoir and (b) water level of the reservoir

خطای مطلق واسنجی هندسه که بیانگر حجم مخزن است و تراز سطح آب در مخزن اکباتان به‌ترتیب برابر با ۰/۸۷۸ میلیون‌مترمکعب و ۰/۰۰۹ متر محاسبه شد که هر دو مقدار در بازه قابل‌قبول *AME* قراردارند. میزان محاسبه‌شده *RMS* در واسنجی هندسی و تراز سطح آب در مخزن اکباتان به‌ترتیب برابر با ۰/۶۷۶ میلیون‌مترمکعب و ۰/۰۹۲ متر محاسبه گردید که هر دو مقدار در بازه قابل‌قبول *RMS* قرار دارند. ضریب تعیین واسنجی هندسی و تراز سطح آب در مخزن اکباتان برابر با ۰/۹۹۹ محاسبه گردید با توجه به این‌که R^2 و *NSE* محاسبه‌شده به عدد یک نزدیک است و نشان‌دهنده میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی است و داده‌های مدل‌سازی تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات داده‌های مشاهداتی را تبیین کنند.

۳. ۲. صحت‌سنجی مخزن سد اکباتان در مدل CE-QUAL-W2

نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای دما و اکسیژن محلول برای صحت‌سنجی مدل در ماه‌های اکتبر ۲۰۱۹، فوریه ۲۰۲۰، ژوئن ۲۰۲۰ و سپتامبر ۲۰۲۰ (به‌دلیل در اختیارداشتن داده‌های میدانی به‌صورت عمقی در این ماه‌ها) در قطعه ۵۳، که نقطه موردعلاقه برای بهره‌برداری از مخزن است، انجام گرفت. در بخش مربوط به واسنجی راهنمای مدل Cole and Well (2015) برای شبیه‌سازی‌ها در شرایط مختلف، میزان خطاهای قابل‌قبول در واسنجی پارامترهای دما و اکسیژن محلول برای مخازن ذکر شده است. نتایج به‌دست‌آمده از واسنجی پارامترهای دما و اکسیژن محلول مدل با نتایج موجود در کتابچه راهنمای مدل نشان دادند که در محدوده قابل‌قبول است (Cole and Well, 2015). نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای دما و اکسیژن محلول در شکل‌های (۵) و (۶) ارائه شده است.

نتایج شکل (۵) نشان دادند که خطاهای به‌دست‌آمده از واسنجی دما در فصل پاییز (ماه اکتبر) ۰/۳۶ درجه سانتی‌گراد، در فصل زمستان (ماه فوریه) ۰/۸۶ درجه‌سانتی‌گراد، در فصل بهار (ماه ژوئن) ۰/۴ درجه‌سانتی‌گراد و در فصل تابستان (ماه سپتامبر) ۰/۵۴ درجه‌سانتی‌گراد محاسبه شده که تمامی خطاها در بازه قابل‌قبولی قرار دارند. همان‌طورکه در شکل (۶) نشان داده شده است، بیش‌ترین غلظت اکسیژن محلول در فصل زمستان رخ داده است، علت این امر می‌تواند بالابودن میزان گازهای محلول در آب در دماهای کم‌تر، دانست. در فصل زمستان با افزایش ارتفاع آب در مخزن، اکسیژن محلول کاهش پیدا کرده است، اما در لایه میانی میزان کاهش ناگهانی غلظت بیش‌تر است که دلیل آن تغییرات دمایی این لایه نسبت به سایر لایه‌ها می‌باشد. خطاهای به‌دست‌آمده از واسنجی اکسیژن محلول در فصل پاییز به میزان ۰/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر، در زمستان ۰/۴۲ میلی‌گرم بر لیتر خواهد بود که در فصل بهار و تابستان به‌ترتیب ۰/۸ و ۰/۶۳ میلی‌گرم بر لیتر به‌دست آمده است که با توجه به مقایسه نتایج با نتایج قابل‌قبول ارائه‌شده در کتابچه راهنمای مدل Cole and Well (2015) می‌توان نتیجه گرفت، نتایج هر دو پارامتر در محدوده قابل‌قبولی قرار گرفته‌اند.

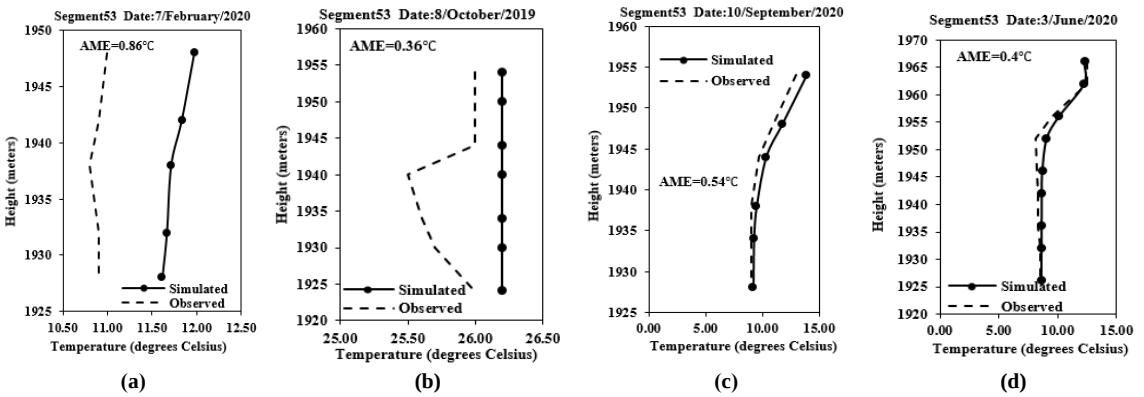
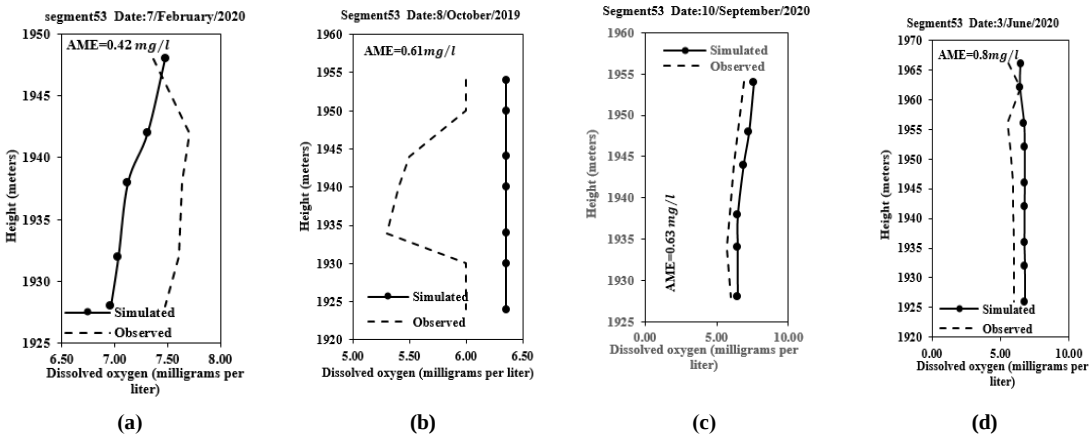


Figure 5. Temperature profile calibration results

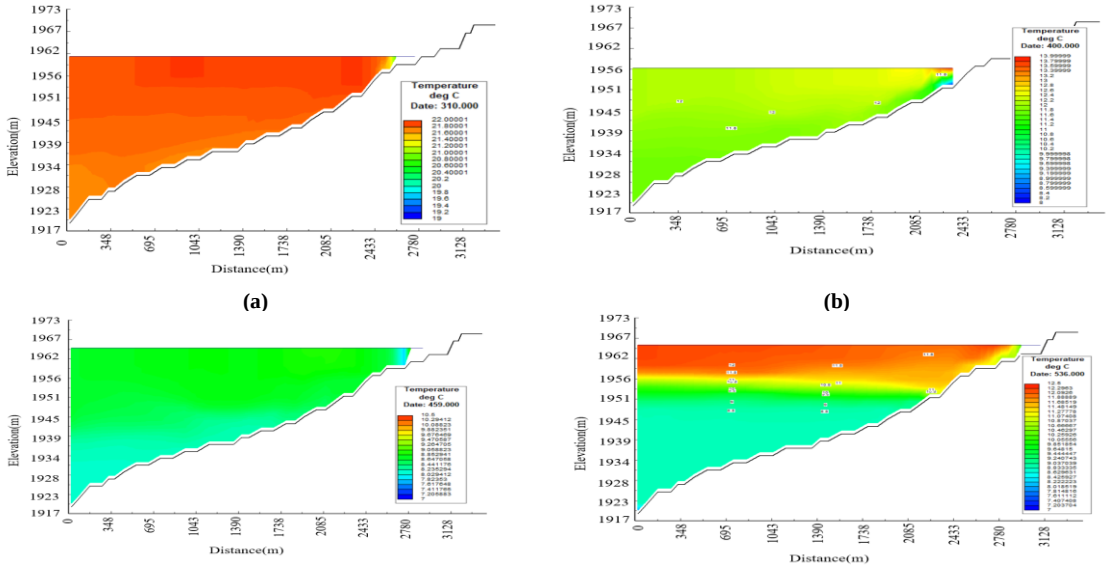


(a) (b) (c) (d)

Figure 6. The results of dissolved oxygen calibration

۳. ۳. وضعیت لایه‌بندی مخزن اکباتان

مقایسه تغییرات دمایی در مقطع عرضی مخزن اکباتان در شکل (۷)، نشان داده شده است.



(a) (b) (c) (d)

Figure 7. Thermal stratification in cross section for Ekbatan reservoir in (a) November 2019, (b) February 2019, (c) June 2020 and (d) September 2020

لایه‌بندی حرارتی زمانی اتفاق می‌افتد که اختلاف دما در رولایه و زیرلایه زیاد باشد و لایه ترموکلاین[۱۴] مانع انتقال گرما و اکسیژن از رولایه به زیرلایه می‌شود. همان‌طورکه در شکل (۶) مشاهده می‌شود. مخزن سد اکباتان در یک دوره لایه‌بندی به‌طور تقریبی یک‌ساله را سپری می‌کند، به‌دلیل کاهش دمای آب ورودی و افزایش چگالی آب، شاهد میل ورود آب به لایه‌های پایینی مخزن و در نتیجه، افزایش عمق رولایه و در نتیجه آن کاهش عمق میان‌لایه خواهد بود. این روند ادامه می‌یابد تا به‌تدریج عمق و دانسیته رولایه افزایش یافته و مقاومت میان‌لایه در مقابل اختلاط کاهش پیدا کرده تا این‌که مخزن از حالت لایه‌ای خارج می‌شود و شروع به همگن شدن در عمق می‌کند که با شروع فصل پاییز و شروع روندکاهش دمای هوا

اختلاط کامل در مخزن رخ داده و این روند در فصل زمستان نیز ادامه پیدا کرده است، و با شروع فصل بهار و نزدیک‌شدن به فصل تابستان و افزایش دما و تشعشات خورشیدی در سطح آب و کاهش چشم‌گیر سرعت باد، اختلاط لایه‌ها کاهش می‌یابد، بنابراین دما در رولایه افزایش پیدا می‌کند و در لایه‌های پایین‌تر دما کاهش می‌یابد. در تابستان به‌علت گرادیان شدید حرارتی، لایه‌بندی حرارتی کامل اتفاق افتاده است و اختلاف دمایی تا شش درجه سانتی‌گراد اتفاق می‌افتد. با توجه به این توضیحات در ادامه به بررسی لایه‌بندی حرارتی بر غلظت اکسیژن محلول پرداخته می‌شود.

۳. ۴. بررسی غلظت اکسیژن محلول

در شکل (۸)، در قطعه ۵۳ که نقطه مورد علاقه برای بهره‌برداری از مخزن است، به بررسی تأثیر دما بر اکسیژن محلول پرداخته می‌شود. برای این بررسی تاریخ‌های نوامبر ۲۰۱۹ فصل پاییز، فوریه ۲۰۱۹ فصل زمستان، ژوئن ۲۰۲۰ فصل بهار، سپتامبر ۲۰۲۰ فصل تابستان انتخاب شدند. قابل ذکر است، محور افقی در شکل (۸) نشان‌دهنده دما برحسب گرم بر مترمکعب، محور عمودی ارتفاع از سطح دریا برحسب متر و محور طوسی رنگ، تراز سطح آب را نشان می‌دهد.

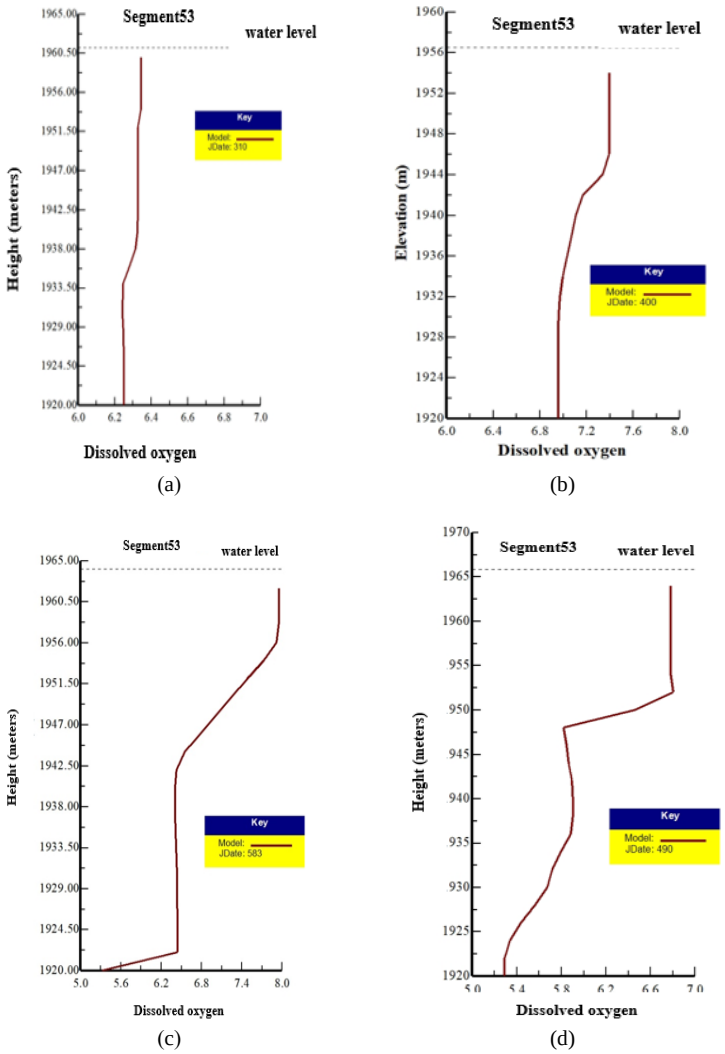


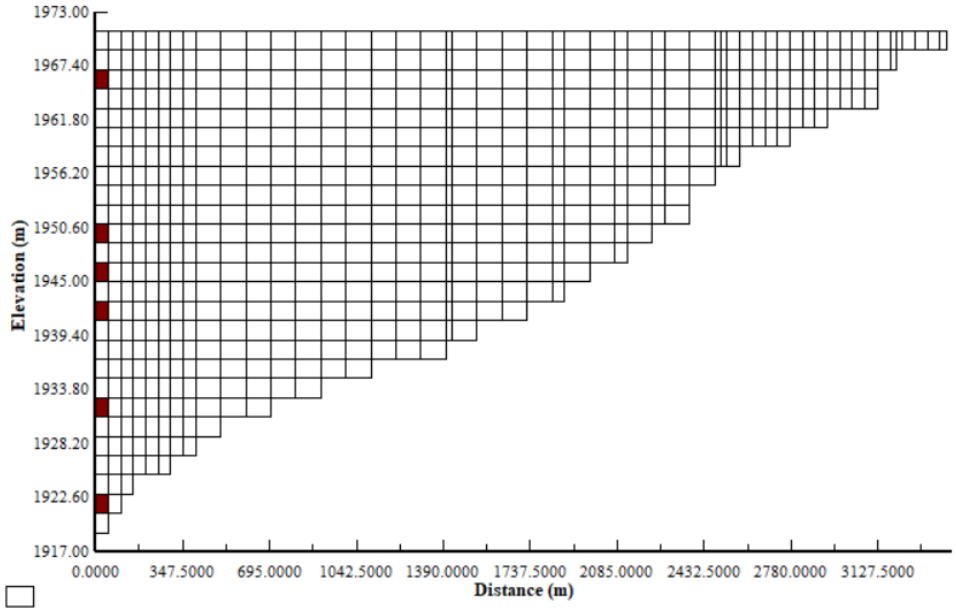
Figure 8. Temperature depth profile in (a) November 2019, (b) February 2019, (c) June 2020 and (d) September 2020

همان‌طورکه در شکل (۸) مشاهده می‌شود، کم‌ترین مقدار غلظت اکسیژن محلول برابر با ۵/۱ گرم بر مترمکعب در فصل تابستان و در روز ۵۸۳ شبیه‌سازی در مخزن رخ داده است و بیش‌ترین غلظت اکسیژن محلول برابر با ۶/۹۵ گرم بر مترمکعب مربوط به روز ۴۰۰ شبیه‌سازی و در فصل زمستان رخ داده است. با شروع فعالیت میکروارگانیزم‌ها در فصل بهار، مقدار اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن کاهش می‌یابد و با گرم‌شدن هوا در اواخر فصل بهار مقدار اکسیژن محلول در زیر لایه کاهش بیش‌تری پیدا می‌کند، اما به‌دلیل نفوذ نور در اعماق اولیه، فرایند فتوسنتز هم‌چنان انجام و همین امر موجب افزایش اکسیژن محلول در میان‌لایه می‌شود. در فصل تابستان با تشدید دمای هوا اکسیژن محلول به کم‌ترین مقدار خود می‌رسد. از نتایج به‌دست‌آمده در این بخش می‌توان دریافت افزایش یا کاهش دمای هوا میزان غلظت اکسیژن محلول در مخزن تأثیر مستقیم دارد.

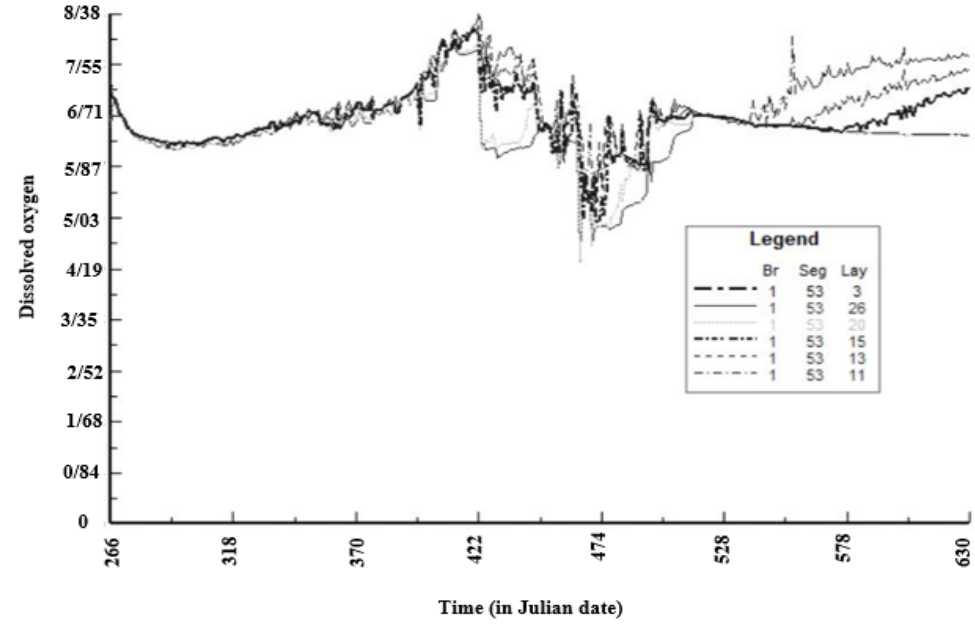
شکل (۹–الف) نشان‌دهنده موقعیت لایه‌های موردبررسی در قطعه ۵۳ است. شکل (۹–ب) تغییرات اکسیژن محلول در طول کل دوره شبیه‌سازی در قطعه ۵۳ که نقطه مورد علاقه برای بهره‌برداری از مخزن است را در لایه‌های سه، ۱۱، ۱۳، ۱۵، ۲۰، ۲۶ را نشان می‌دهد. هر سه لایه رولایه، لایه میانی و زیرلایه در این بخش موردبررسی قرار گرفته است. همان‌طورکه در شکل (۹–ب) مشاهده می‌شود در لایه ۳ که در رولایه قرار دارد غلظت اکسیژن محلول روند ثابت‌تری نسبت به سایر لایه‌ها داشته که علت آن نزدیکی این لایه به اتمسفر و تبادل حرارتی با اتمسفر است. لایه‌های ۲۰ و ۲۶ واقع‌شده در زیرلایه، کم‌ترین مقدار غلظت اکسیژن محلول را دارند که به‌علت پایین‌بودن میزان دسترسی به اتمسفر و کاهش نفوذ نور خورشید در این لایه‌ها بوده است، اما همان‌طور که در شکل (۹–ب) مشاهده می‌شود در لایه‌های ۱۱، ۱۳ و ۱۵ گرادیان شدید اکسیژن محلول رخ می‌دهد و مطابق شکل (۹) مشاهده می‌شود در فصل تابستان بیش‌ترین غلظت اکسیژن محلول در این لایه‌ها رخ داده است و می‌توان نتیجه گرفت که در آن‌ها لایه‌بندی حرارتی رخ می‌دهد. در بین این لایه‌ها بیش‌ترین غلظت اکسیژن محلول در لایه ۱۱ رخ می‌دهد، لایه ۱۱ آخرین لایه در رولایه است و نتایج نشان می‌دهند بیش‌ترین غلظت اکسیژن محلول در آخرین لایه در رولایه شروع شده که از دلایل این اتفاق می‌توان به تغییرات شدید دمایی بین رولایه و میان‌لایه اشاره کرد. همان‌طور که در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود در ماه‌های سرد سال دامنه تغییرات غلظت اکسیژن محلول در عمق مخزن زیاد نیست، اما به‌تدریج با گرم‌شدن هوا و شروع تابستان دمای آب افزایش می‌یابد و لایه‌بندی حرارتی رخ می‌دهد. با توجه به نمودارهای به‌دست‌آمده از تغییرات غلظت اکسیژن محلول و نمودارهای غلظت اکسیژن محلول در عمق می‌توان دریافت که لایه‌بندی حرارتی بر افزایش یا کاهش مقدار غلظت اکسیژن محلول تأثیرگذار است.

مقایسه تغییرات اکسیژن محلول در مقطع عرضی مخزن برای مخزن اکباتان در شکل (۱۰) نشان داده شده است. برای این بررسی تاریخ‌های نوامبر ۲۰۱۹ فصل پاییز، فوریه ۲۰۱۹ فصل زمستان، ژوئن ۲۰۲۰ فصل بهار، سپتامبر ۲۰۲۰ فصل تابستان انتخاب شدند. همان‌طورکه در شکل (۱۰) مشاهده می‌شود، در فصل پاییز به‌علت بروز پدیده اختلاط کامل در مخزن غلظت اکسیژن محلول در سرتاسر مخزن مقدار ثابتی است، اما با شروع فصل زمستان و کاهش چشم‌گیر دمای هوا، مقدار غلظت اکسیژن محلول در مخزن بیش‌تر شده که این غلظت در لایه‌های فوقانی بیش‌تر است. در فصل بهار با شروع لایه‌بندی حرارتی اکسیژن محلول نیز شروع به تقسیم‌شدن در لایه کرده و در فصل تابستان این لایه‌بندی کامل شده که همان‌طورکه در شکل (۱۰) مشخص است بیش‌ترین غلظت مربوط به رولایه است. درنظرگرفتن این نکته ضروری است، در فصل بهار با بالارفتن فاضلاب‌های روستایی و کشاورزی ورودی به سد، غلظت اکسیژن محلول کاهش پیدا کرده اما هرچه به سمت تاج سد پیش می‌رویم و غلظت اکسیژن محلول بیش‌تر می‌شود، فاضلاب‌ها و پساب‌های صنعتی و خانگی، حاوی مقادیر زیادی مواد آلی هستند که در قسمت ورودی مخزن باعث کاهش غلظت اکسیژن محلول شده‌اند. تخلیه فاضلاب‌ها در آب‌ها، باعث

آلودگی آب و کاهش کیفیت آب می‌شود. آب‌های راکد یا آبی که نزدیک کف یک دریاچه عمیق است، به‌طور تقریبی عاری از اکسیژن است، زیرا با ماده آلی واکنش دارد و هیچ سازوکاری برای تجدید آن وجود ندارد. پس می‌توان دریافت علاوه‌بر دما و لایه‌بندی حرارتی، پدیده تغذیه‌گرایی در مخازن نیز بر غلظت اکسیژن محلول تأثیرگذار است.



(a)



(b)

Figure 9. (a) The position of the investigated layers in Segment 53, (b) Comparison of temperature changes in depth for Segment 53 in different layers

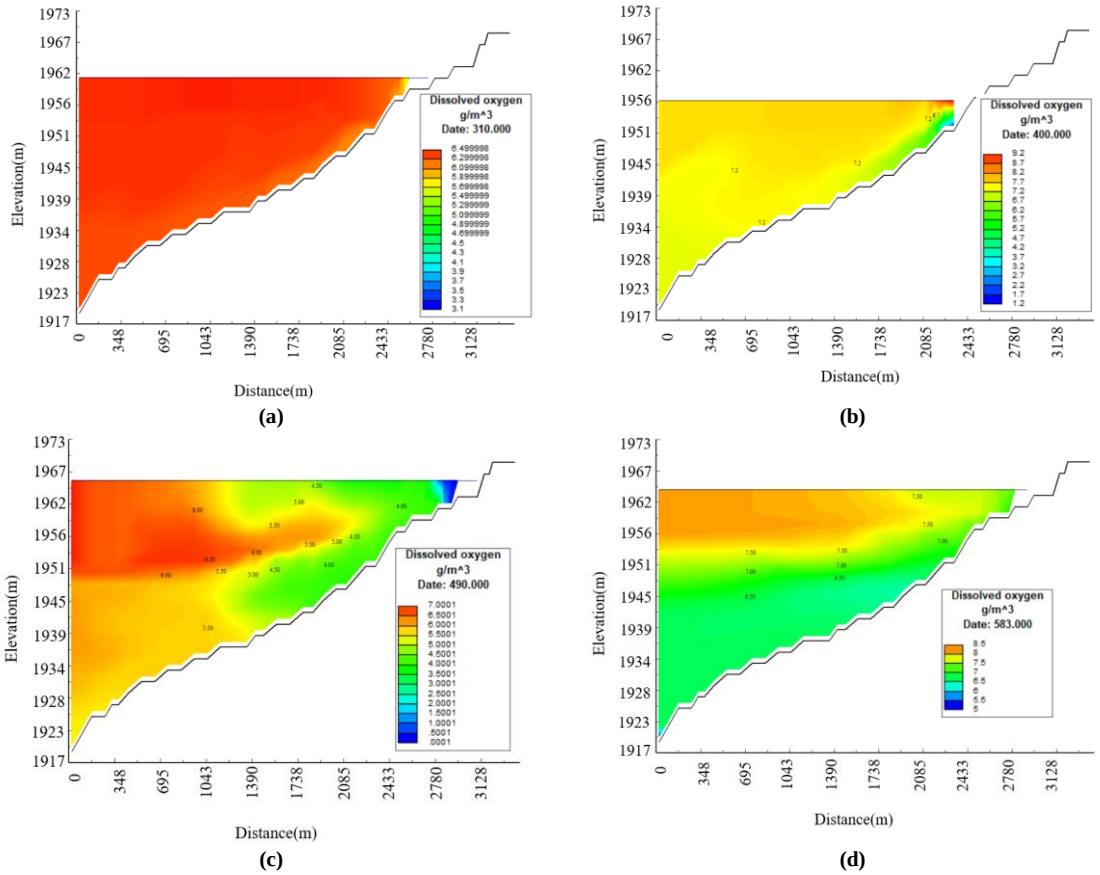


Figure 10. Dissolved oxygen concentration in the cross section of the reservoir for the baseline period in (a) November 2019, (b) February 2019, (c) June 2020 and (d) September 2020

۴. نتیجه‌گیری

مدیریت مخزن نیازمند شناخت کافی نسبت به وضعیت موجود می‌باشد. ابزار لازم برای شناخت وضعیت کیفی یک مخزن بررسی پارامترهای کیفی مخزن است که در این مطالعه با استفاده از مدل هیدرودینامیکی CE-QUAL-W2 برای یک دوره یک سال پارامتر اکسیژن محلول، تحت تأثیر پارامترهای لایه‌بندی حرارتی و دما موردبررسی قرار گرفته است. با توجه به اهمیت مخزن اکباتان در تأمین آب شرب و کشاورزی شهرستان همدان، بررسی پارامترهای کیفیت آن ضروری است. اولین و مهم‌ترین پارامتر کیفی آب که کلیه فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی در آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دمای آب است. نتایج این مطالعه نشان دادند که مدل CE-QUAL-W2 با دریافت اطلاعات مربوط به حجم و هندسه مخزن و هم‌چنین پارامترهای هواشناسی، به‌خوبی تغییرات دمایی مخزن را شبیه‌سازی می‌کند. ازآنجاکه پارامتر اکسیژن محلول که فعل و انفعالات بیولوژیکی پیکره آبی متأثر از آن است، تابعی از لایه‌بندی حرارتی است، پس می‌توان این شاخص کیفی آب را با بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن ارزیابی کرد. نتایج نشان دادند پدیده لایه‌بندی حرارتی در مخزن اکباتان همدان دارای یک دوره لایه‌بندی حرارتی بوده و در فصل تابستان کامل شده و در فصل پاییز و اواسط زمستان در مخزن پدیده اختلاط کامل رخ می‌دهد. با بروز پدیده لایه‌بندی حرارتی در مخزن، لایه‌بندی اکسیژن محلول نیز در آن رخ داده است. در فصول گرم سال و با افزایش دمای هوا غلظت اکسیژن محلول در مخزن به کمینه مقدار خود رسیده و با کاهش دما، میزان غلظت اکسیژن محلول در مخزن افزایش پیدا می‌کند. همان‌طورکه از نتایج این مطالعه

استخراج شد غلظت اکسیژن محلول در رولایه، به‌علت ارتباط این لایه با اتمسفر بیش‌تر بوده است. یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار شناسایی‌شده در این مطالعه پدیده تغذیه‌گرایی در مخزن بود، که وجود آلاینده‌هایی مانند فاضلاب‌های کشاورزی و روستایی در آب باعث کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب می‌شوند.

تأثیر دمای هوا بر غلظت اکسیژن محلول (DO) در مخزن، یک ارتباط مستقیم و مهم را نمایان می‌سازد. غلظت اکسیژن محلول در آب تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد، و دما یکی از این عوامل اساسی است. دما، به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در فیزیک و شیمی محیط زیست، تأثیر زیادی بر ویژگی‌های آب دارد. هنگامی‌که دمای هوا افزایش می‌یابد، دمای آب نیز به‌طور معمول افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما منجر به کاهش چگالی آب می‌شود. چراکه آب در دمای بالاتر به حالت کم‌چگال‌تر و گرم‌تر تبدیل می‌شود و به بالا صعود می‌کند. این مسأله باعث می‌شود که لایه‌های آبی گرم‌تر و کم‌چگال‌تر به بالا حرکت کنند و آب‌های سردتر به پایین. این تغییرات در توزیع دما و چگالی آب در مخزن، در نتیجه آن تغییراتی در حرکت و ترکیبات شیمیایی آب ایجاد می‌کند. به‌عبارت دیگر، با افزایش دما، حلالیت اکسیژن در آب کاهش می‌یابد، به این معنی که آب قادر به جذب و حفظ اکسیژن کم‌تر می‌شود. این امر می‌تواند منجر به کاهش غلظت اکسیژن محلول در آب گردد. این وضعیت به‌ویژه در توده‌های آبی عمیق‌تر از مخزن به‌طور قابل‌توجهی تأثیرگذار است. به‌طور خلاصه، تغییر دمای هوا تأثیرات چشم‌گیری بر غلظت اکسیژن محلول در مخزن آبی ایجاد می‌کند. افزایش دما منجر به کاهش چگالی آب و کم‌شدن حلالیت اکسیژن در آن می‌شود، که در نتیجه می‌تواند منجر به کاهش میزان غلظت اکسیژن محلول در آب مخزن گردد. این پدیده به‌طور گسترده در مطالعات محیط زیست و مدیریت منابع آب برای حفظ کیفیت آب و حیات زیستی در مخازن آبی موردتوجه قرار دارد. پژوهش‌گرانی هم‌چون Tavera-Quiroz *et al.* (2023) و Rahimi-Movaghar *et al.* (2019) به شبیه‌سازی دما و اکسیژن محلول و واسنجی پارامترها با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 و Sabeti *et al.* (2017) به بررسی تأثیرات دبی، دما و شوری پرداختند. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده پیشینه مطالعاتی مشابه با مطالعه حاضر در زمینه مدل‌سازی کیفیت آب و تأثیرات اکسیژن محلول، دما و پارامترهای دیگر در مخازن آبی می‌باشند. تطابق نتایج این پژوهش‌ها با نتایج حاضر، به تقویت اعتماد به دقت و قابلیت تعمیم نتایج پژوهش کمک می‌کند.

با توجه به نتایج این پژوهش، می‌توان به سوالات مطرح‌شده در ابتدای پژوهش به این شکل پاسخ داد؛ تحلیل و مدل‌سازی ویژگی‌های حرارتی و شیمیایی مخازن آبی، از جمله تغییرات دما، لایه‌بندی حرارتی، غلظت مواد شیمیایی، اکسیژن محلول و سایر پارامترها، در طول زمان و در فصول مختلف انجام گرفته است. تغییرات در پارامترهای اساسی مثل اکسیژن محلول در آب، دما و لایه‌بندی حرارتی، تأثیر زیادی بر زیست‌بوم و کیفیت آب مخازن دارند که می‌توانند با تغییر فصول و طول زمان متغیر باشند. با استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی هم‌چون CE-QUAL-W2 و با درنظرگرفتن معادلات ریاضی و پارامترهای تأثیرگذار بر رفتارها و ویژگی‌های مخازن، می‌توان با درنظرگرفتن ورودی‌های مختلف و شرایط محیطی، تغییرات و رفتارها را پیش‌بینی نمود. اطلاعات به‌دست‌آمده از این پژوهش‌ها می‌توانند مدیران و برنامه‌ریزان منابع آبی را در بهره‌برداری بهینه و تطابق با تغییرات محیطی و آبی یاری کنند، تا در نهایت به بهبود مدیریت و بهره‌وری منابع آبی دست یابند. خطاها در مطالعات می‌توانند در انواع مختلفی رخ دهند و تأثیر منفی بر نتایج پژوهش‌ها را ایجاد کنند. این خطاها می‌توانند دقت نتایج پژوهش را کاهش دهند. در پژوهش حاضر، منابع خطا به دسته‌بندی‌های مختلف تقسیم می‌شوند که می‌توان به مدیریت مخزن یا پارامترهای کیفی مخزن، خطای نمونه‌برداری و خطاهای مرتبط با منابع اطلاعاتی از مواردی هستند که می‌توان به آن‌ها اشاره کرد. با توجه به محدودیت‌ها و کاستی‌های این مطالعه، به پژوهش‌گران علاقمند پیشنهاد می‌شود که با ارتقای مجموعه داده‌های کیفیت آب به دوره‌های زمانی بیش‌تر، تأثیر عواملی چون تغییرات اقلیمی در طولانی‌مدت، تغییرات جمعیت و فعالیت‌های انسانی، و جنبه‌های مختلف بیولوژیکی و اکولوژیکی، بر کیفیت آب تحلیل شوند.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Dissolved Oxygen
2. Thermal Stratification
3. Particle Swarm Optimization
4. Wind Coverage Factor
5. Extinction for Pure Water
6. Fraction of Incident Solar Radiation Absorbed at the Water Surface
7. Temperature-Control Curtain
8. Hypolimnion
9. Epilimnion
10. Metalimnion
11. Absolute Mean Error
12. Root Mean Square Error
13. Nash–Sutcliffe Efficiency
14. Thermocline

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Salehi, M., Khani Temeliyeh, 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. (In Persian).

Afshar, A., Kazemi, H., & Saadatpour, M. (2011). Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): *Application to Karkheh Reservoir*, Iran. *Water Resources Management*, 25, 2613-2632**.**

Berger, C., & Wells, S. (2014). Updating the CEMA Oil Sands Pit Lake Model. Report to Cumulative *Environmental Management Association*, Alberta, Canada.

Cole, T. M., & Wells, S. A. (2015). CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.71, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.

de Oliveira, T. F., de Sousa Brandao, I. L., Mannaerts, Ch. M., Hauser-Davis, R. A., de Ferreira Oliveira, A. A., Fonseca Saraiva, A. C., de Oliveira, M. A., & Ishihara, J. H. (2020). Using hydrodynamic and water quality variables to assess eutrophication in a tropical hydroelectric reservoir. *Journal of Environmental Management*, 256, 109932, DOI: 10.1016/j. jenvman.2019.109932

Duka, M. A., Shintani, T., & Yokoyama, K. (2021). "Thermal stratification responses of a monomictic reservoir under different seasons and operation schemes", *Science of The Total Environment*, 767, 144423, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144423.

Ebrahimi, M., Jabbari, E., & Abbasi, H. (2015). Simulation of thermal stratification and salinity in dam reservoir using CE-QUAL-W2 software (Case study: Baft Dam). *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, 5 (1), 07-11.

Khonok, A., Tabrizi, M. S., Babazadeh, H., Saremi, A., & Ghaleni, M. M. (2021). Sensitivity analysis of water quality parameters related to flow changes in regulated rivers. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-14.

Nazariha, M., Danaei, E., Hashemi, S. H., & Doustdar, A. H. I. (2009). Prediction of thermal stratification in proposed Bakhtyari Reservoir with CE-QUAL-W2. *World Environmental and Water Resources Congress: Great Rivers*, May 17-21, Kansas City, Missouri, United States.

Rahimi-Movaghar, M., Mirbagheri, S. A., & Kerachian, R. (2019). Total dissolved solid and dissolved oxygen modeling, thermocline calculation and applying reservoir salinity reduction scenarios in Shahid Rajaee reservoir using CE-QUAL-W2. *Water Supply*, 19 (2), 424-433.

Ramos-Fuertes, A., Palau, A., & Dolz, J. (2018). Application of a two-dimensional water quality model (CE-QUAL-W2) to the thermal impact assessment of a pumped-storage hydropower plant project in a mountainous reservoir (Matalavilla, Sil River, Spain). *Advances in Hydroinformatics*: SimHydro 2017-Choosing The Right Model in Applied Hydraulics.

Rezaei Barandagh, H., Salmasi, F., & Sahebi, F. (2018). "Water quality and temperature stratification of Zanjan Taham Dam with CE-QUAL-W2 software", *Iranian J. of Water and Soil Conservation*, 25(1), 127-146. (In Persian).

Sabeti, R., Jamali, S., and Jamali, H. H. (2017). Simulation of thermal stratification and salinity using the Ce-Qual-W2 model (case study: mamloo dam). *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7 (3), 1664-1669.

Shabani, A., Zhang, X., & Ell, M. (2017). Modeling water quantity and sulfate concentrations in the Devils Lake watershed using coupled SWAT and CE-QUAL-W2. *Journal of the American Water Resources Association*, 53 (4), 748-760.

Sun, W., Niu, X., Teng, H., Ma, Y., Ma, L., & Liu, Y. (2022). A 133-year record of eutrophication in the Chaihe Reservoir. Southwest China. *Ecological Indicators*, 134, 108469, DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108469.

Talakesh, Sh., 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 Research Journal*, 13 (1), 49-57 (In Persian).

Tavera-Quiroz, H., Rosso-Pinto, M., Hernández, G., Pinto, S., & Canales, F. A. (2023). Water quality analysis of a tropical reservoir based on temperature and dissolved oxygen modeling by CE-QUAL-W2. *Water*, 15(6), 1013.

Torres, E., Galván, L., Cánovas, C. R., Soria-Píriz, S., Arbat-Bofill, M., Nardi, A., Papaspyrou, S., & Ayora, C. (2016). Oxycline formation induced by Fe (II) oxidation in a water reservoir affected by acid mine drainage modeled using a 2D hydrodynamic and water quality model-CE-QUAL-W2. *Science of the Total Environment*, 562, 1-12.

Wells, S. A. (2021). CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 4.2.2, user manual part 2, hydrodynamic and water quality model theory. *Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University*, Portland, OR.

Yigzaw, W., Li, H.-Y., Fang, X., Leung, L. R., Voisin, N., Hejazi, M. I., & Demissie, Y. (2019). A multilayer reservoir thermal stratification module for earth system models. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11 (10), 3265-3283.

Zhang, Y., Gao, X., Sun, B., Liu, Ch., Li, B., & Liu, X. (2022). Tracking thermal structure evolution: An objective practice in a stratified reservoir based on high-frequency measurements. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 39, 100989, DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.100989.