

استفاده از شاخص $IRWQI_{SC}$ در ارزیابی کیفیت آب مخازن سدها (مطالعه موردی: مخزن سد گلابر زنجان)

شادی رسولی^{۱*}، جلال بازرگان^۲، سید محمد شعاعی^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۵/۱۱

چکیده

امروزه، بررسی کیفیت منابع آب با استفاده از مدل‌های عددی و شاخص‌های کیفی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. در این پژوهش، پدیده لایه‌بندی حرارتی و کیفی مخزن سد گلابر واقع در استان زنجان مورد بررسی قرار گرفته و همچنین کیفیت آب در مکان‌های مختلف مخزن و در زمان‌های مختلف با استفاده از شاخص $IRWQI_{SC}$ (Iran water quality index) ارزیابی شده است. به این منظور، از مدل دوبعدی-CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و پارامترهای اکسیژن محلول و کل مواد جامد محلول برای یک دوره یک‌ساله از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۴ استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از وجود یک دوره لایه‌بندی حرارتی تابستانه از اواخر فروردین تا اواخر شهریورماه می‌باشد. ارزیابی کیفیت آب بر اساس شاخص $IRWQI_{SC}$ نشان می‌دهد که کیفیت آب مخزن در رولایه و در شش ماهه گرم در کلاس کیفی خوب (شاخص در حدود ۷۵) قرار دارد. در این مدت، کیفیت آب در زیرلایه از رده‌بندی خوب (شاخص در حدود ۷۵) به رده‌بندی نسبتاً بد (شاخص در حدود ۴۰) افت پیدا می‌کند. همچنین در شش ماهه سرد سال، کیفیت آب از رده‌بندی متوسط (شاخص در حدود ۴۶) در ابتدا به رده‌بندی خوب (شاخص در حدود ۷۷) ترقی می‌یابد. بطور کلی، بررسی مکانی و زمانی کیفیت آب مخازن سدها با استفاده از شاخص‌های مختلف کیفی آب از جمله شاخص $IRWQI_{SC}$ می‌تواند کمک مؤثری در تعیین کیفیت آب، ارائه راهکارهای مدیریتی در زمینه تعیین رقم آبیگر و برداشت، استفاده بهینه از آب و ارائه راهکارهای علاج بخش برای افزایش کیفیت آب مخازن ارائه نماید.

واژه‌های کلیدی: سد مخزنی گلابر، شاخص کیفی $IRWQI_{SC}$ ، لایه‌بندی حرارتی، مدل CE-QUAL-W2

مقدمه

لحاظ تأمین نیازهای آبی مختلف از جمله شرب، کشاورزی، صنعت، تفریحات آبی و... دارای اهمیت زیادی هستند. مخازن سدها به لحاظ شرایط هیدرودینامیک، نسبتاً پایدارتر از آب‌های دیگر، مانند رودخانه‌ها، بوده و از این رو بخشی از آلاینده‌های حوضه‌های بالادست، خصوصاً مواد آلاینده معلق، در مخزن ته‌نشین شده و باقی می‌مانند. لذا از این منظر، مخازن سدها و دریاچه‌ها در مقایسه با سایر منابع آب، آسیب‌پذیرتر می‌باشند (Noori et al., 2015)؛ کیانی صدر، ۱۳۹۶). عموماً، کیفیت آب مخازن سدها به دو دلیل افزایش زمان ماند آب و وقوع پدیده لایه‌بندی حرارتی دستخوش تغییر می‌شود (نظری‌ها و همکاران، ۱۳۸۹). لایه‌بندی حرارتی یک پدیده رایج در مخازن و دریاچه‌های عمیق، خصوصاً در مناطق معتدل، به‌شمار می‌رود (Javid et al., 2015). به‌عبارت دیگر، لایه‌بندی حرارتی، لایه‌هایی از جرم‌های سیال است که در اثر اختلاف در دما یا دانسیته یا مواد محلول و معلق ایجاد می‌شود (خواجه پور و همکاران، ۱۳۹۳). در لایه‌بندی حرارتی، لایه‌های گرم‌تر (سبک‌تر) در ترازهای فوقانی و لایه‌های سردتر (سنگین‌تر) در ترازهای تحتانی مخزن قرار می‌گیرند.

امروزه، به دلیل آلودگی‌های زیست‌محیطی که نقش بشر در پیدایش آن‌ها غیرقابل انکار است، منابع آب، به‌خصوص آب‌های سطحی، در معرض انواع آلودگی‌ها قرار دارند. به همین دلیل، در حال حاضر، کیفیت آب بیش از پیش مورد توجه متولیان توسعه، بهره‌برداری و نگهداری منابع آب بوده و توجه به اهداف کیفی در کنار اهداف کمی به یک موضوع مهم در مطالعات پژوهشگران و ملاحظات متصدیان بهره‌برداری از منابع آب قرار گرفته است (Park Gamvroula et al., 2014; et al., 2014; Abbasi and Abbasi, 2012). در بین منابع آب، مخازن سدها به

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران-آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان
۲- دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان
۳- استادیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان
(* نویسنده مسئول: Email: shadirasouli100@gmail.com)

مخزن بر TDS نقطه مشخصی از مخزن مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل نشان از کاهش به ترتیب ۲۰ و ۱۴/۲ درصدی بیشینه سری زمانی TDS و کاهش به ترتیب ۱۹/۴ و ۱۳/۴ درصدی کمینه سری زمانی TDS را داشته است. ایشان همچنین از شاخص IRWQI_{SC} برای بررسی کیفیت آب تحت تأثیر سناریوهای فوق استفاده کردند. نتایج این بررسی نشان داده که کاهش TDS ورودی باعث بهبود کیفیت آب گردیده، در حالی که کلاس کیفی آب تغییری نکرده و همچنان در وضعیت خوب و نسبتاً خوب باقی مانده است (Rahimimovaghar et al., 2018).

شکوهی و همکاران ارزیابی کیفیت آب در مخزن سد آیدغوش واقع در شهرستان میانه با استفاده از شاخص کیفیت آب NSFQWI (National Sanitation Foundation Water Quality Index) پرداختند. آنها با استفاده از نمونه برداری و انجام آزمایشهای مربوطه، پارامترهای کیفی در ۸ ایستگاه در بهار و تابستان را اندازه‌گیری و مقادیر شاخص کیفی را محاسبه کردند. نتایج تحقیق ایشان نشان می‌دهد که کاهش مقدار شاخص در تابستان به دلیل افت مقدار DO در آب دریاچه پشت سد بوده است و غلظت عناصر آلاینده در ورودی بیشتر از خروجی سد است (شکوهی و همکاران، ۱۳۹۰).

جاوید و همکاران به بررسی کیفیت آب در سد در استان خوزستان پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری میدانی داده‌های کیفی نظیر هدایت الکتریکی (EC)، نیترات، آمونیوم، فسفات، کدورت، قلیائیت، کلیفرم، دما، DO و اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) در پنج ایستگاه در سال آبی ۹۰-۱۳۸۹ به بررسی کیفیت آب و تغذیه‌گرایی مخزن سد با استفاده از شاخص کیفی آب و شاخص تروفیک (TSI) پرداختند. نتایج نشان داد که ایستگاه واقع در وسط مخزن سد در دی‌ماه بهترین کیفیت و ایستگاه ورودی مخزن سد در فروردین‌ماه دارای بدترین شرایط کیفی است. شاخص تغذیه‌گرایی هم در حالت بینابینی و مغزی در بهار و تابستان متغیر است و در بقیه فصول وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن در شرایط ثابتی قرار دارد که علت اصلی آن را می‌توان برهم خوردن سیستم لایه‌بندی دانست (Javid et al., 2015).

در مطالعه پیش رو، شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و کیفی آب مشتمل بر پارامترهای دما، TDS و DO با مدل CE-QUAL-W2 در بازه زمانی مهرماه ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ در مخزن سد گلابر زنجان صورت گرفته و با استفاده از شاخص کیفیت آب‌های سطحی ایران (IRWQI_{SC}) به بررسی مکانی و زمانی کیفیت آب بر اساس شرایط لایه‌بندی مخزن سد مذکور پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

سد مخزنی گلابر در موقعیت ۱۹° و ۴۸° طول شرقی و ۱۹°

در بیش‌تر مخازن و دریاچه‌ها، لایه‌بندی نتیجه موازنه حرارتی بین آب مهار شده و سایر ورودی‌ها به مخزن است. حرارت ورودی شامل تشعشع اتمسفری (Atmospheric radiation) و خورشیدی، تبادل حرارتی بین آب و اتمسفر و حرارت حاصل از جریان‌های ورودی به مخزن است (Samal et al., 2012). تأثیر مستقیم دما در کلیه فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیک غالباً موجب به وجود آمدن لایه‌بندی کیفی در مخازن سدها نیز می‌شود و با توجه به افزایش زمان ماند آب، آب مخازن عمدتاً دچار کاهش کیفیت می‌شود (Javid et al., 2015).

با شناخت دقیق پدیده لایه‌بندی حرارتی و کیفی و در نظر گرفتن تأثیر عوامل دیگر کاهش کیفیت آب مخازن سدها می‌توان با ارائه منحنی فرمان، نسبت به بهره‌برداری از لایه‌های با کیفیت بهتر در زمان‌های مختلف اقدام نمود (رضازاده و همکاران، ۱۳۹۳). همچنین، با رویکردهای مختلف مدیریتی در حوضه آبریز بالادست برای کاهش ورود آلاینده‌های مختلف به مخازن سدها، برنامه‌ریزی برای کاهش زمان ماند آب در مخازن و اقدامات علاج‌بخش برای افزایش کیفیت آب مخازن سدها، مانند استفاده از تجهیزات هوادهی، می‌توان کیفیت آب مخازن را بهبود بخشید (حمزه پور، ۱۳۹۱).

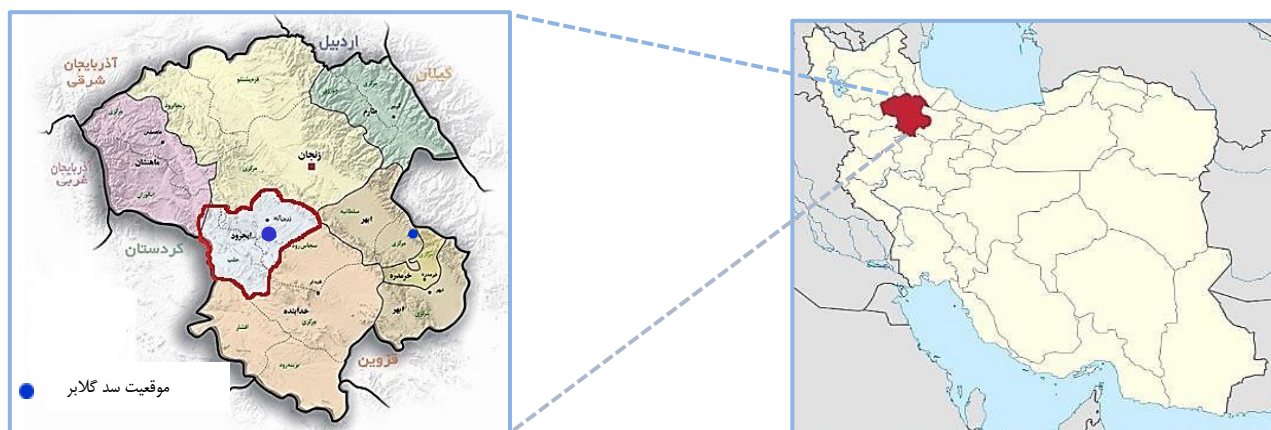
توسعه مدل‌های عددی و شاخص‌های کیفی مختلف در دهه‌های اخیر کمک شایانی در زمینه شبیه‌سازی فعل و انفعالات کیفی و بررسی کیفیت آب پیکره‌های آبی، از جمله مخازن سدها، نموده است. از بین مدل‌های عددی می‌توان به HEQ-5Q، SWMM، WASP، CE-QUAL-W2، WQRRS و ELCOM اشاره کرد که مدل CE-QUAL-W2 به دلیل قابلیت‌های فراوان با استقبال بیشتری روبه‌رو شده است (Xu and Grizzard., 2007). در سالهای اخیر، استفاده از شاخص‌های کیفی آب (Water quality index) WQI برای ارزیابی کیفیت آب نیز رشد چشمگیری را در بین محققین داشته است (مفتاح هلقی، ۱۳۹۰). مزیت اصلی این شاخص‌ها، ساده بودن استفاده از آن‌ها با تجمع تعداد زیادی داده کیفی در یک شاخص واحد و ارایه یک توصیف ساده از کیفیت آب مورد بررسی است (et al., 2014).

Goher)، شاخص‌های کیفی مختلفی در دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند که یکی از آنها شاخص کیفی آب‌های ایران IRWQI می‌باشد که برای تعیین کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی و با در نظر گرفتن پارامترهای متعارف کیفی و پارامترهای سمی در چهار بخش جداگانه توسعه یافته است. (صمدی، ۱۳۹۴؛ هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰).

رحیمی موقر و همکاران به شبیه‌سازی دما، (Dissolved oxygen) DO و (Total Dissolved Solids) TDS در مخزن سد شهید رجایی واقع در استان مازندران با به‌کارگیری مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. ایشان در سناریوهای، تأثیر کاهش TDS ورودی به مخزن را مبتنی بر کاهش ۲۰ درصدی در دو رودخانه ورودی و همچنین کاهش ۲۰ درصدی در رودخانه اصلی ورودی به

توسعه جمعیت و صنایع مختلف منطقه سبب بررسی تغییر تخصیص بخشی از آب تنظیمی سد برای تأمین نیازهای شرب و صنعت منطقه نیز شده است. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب موقعیت سد گلابر در منطقه و ایران و تصویر ماهواره ای مخزن سد و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد.

۳۶ عرض شمالی، با تراز تاج ۱۷۱۰ متر از سطح آزاد دریا در شهرستان ایجرود واقع در جنوب استان زنجان قرار دارد. مخزن این سد به طول حدود ۱۱ کیلومتر، گنجایش حدود ۹۵ میلیون متر مکعب آب را دارا بوده و عملیات اجرایی آن با هدف توسعه اراضی کشاورزی منطقه از سال ۱۳۷۴ شروع شده و در سال ۱۳۸۸ آبیگری شده است.



شکل ۱- موقعیت استان زنجان در ایران و شهرستان ایجرود در استان زنجان



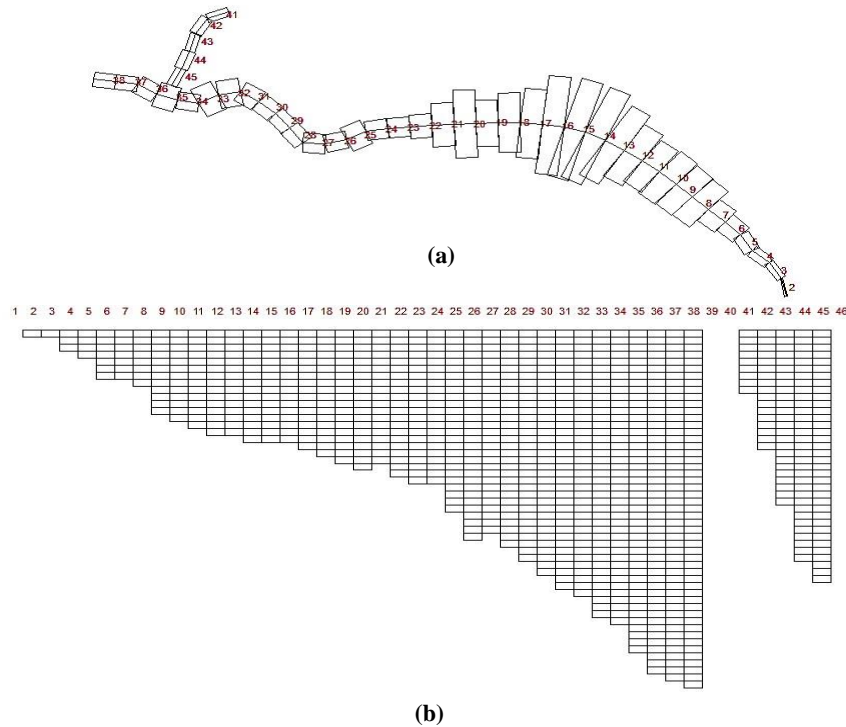
شکل ۲- عکس هوایی از مخزن سد گلابر و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

آماده‌سازی مدل شبیه‌سازی

اطلاعات مورد نیاز در مدل CE-QUAL-W2 برای انجام شبیه‌سازی به شش گروه از اطلاعات شامل اطلاعات هندسی مخزن سد، داده‌های هواشناسی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، پارامترهای جنبشی، پارامترهای هیدرولیکی و داده‌هایی جهت واسنجی مدل تقسیم‌بندی می‌شوند (Cole and Wells, 2013). هندسه مخزن سد گلابر با استفاده از نقشه توپوگرافی مخزن سد و با استفاده از نرم‌افزار Arc GIS(10.4.1) مطابق شکل ۳ بصورت یک پیکره آبی شامل دو شاخه و در قالب ۴۶ المان (Segment) به طول حدود ۳۰۰ متر و ۵۳ لایه (Layer) یک متری در مدل CE-QUAL-W2 المان‌بندی شده است.

نمونه‌برداری

نمونه‌برداری در بازه زمانی مهر ۱۳۹۳ تا شهریور ۱۳۹۴ (معادل روز ژولین ۲۶۶ تا ۶۳۰) از ایستگاه‌های واقع در ابتدا (ایستگاه ۳۴)، وسط (ایستگاه ۳۳) و انتهای مخزن واقع در نزدیکی بدنه سد (ایستگاه ۳۲) و در اعماق مختلف از سطح آب تا عمق ۴۰ متری انجام شده است. شایان ذکر اینکه اعماق نمونه برداری با توجه به شرایط توپوگرافی مخزن و نوسانات تراز سطح آب در ماه‌های مختلف، متفاوت بوده است. مقادیر پارامترهای دما و DO با استفاده از دستگاه پرتابل به صورت درجا و در محل اندازه‌گیری شد و مقادیر TDS با ارسال نمونه‌های آب به آزمایشگاه و اندازه‌گیری به روش تبخیری تعیین شد.



شکل ۳- پلان (a) و پروفیل (b) المان بندی مخزن سد گلابر در مدل CE-QUAL-W2

شاخص کیفی آب ایران (IRWQI_{SC})

برای تعیین وضعیت کیفی آب‌های سطحی بر مبنای شاخص کیفی آب ایران (IRWQI_{SC}) در حالت کلی از مقادیر ۱۱ پارامتر مختلف شامل درصد اکسیژن اشباع، هدایت الکتریکی، کلی فرم مدفوعی، نیترات، آمونیوم، فسفات، کدورت، سختی کل، pH، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی (COD) و میزان اکسیژن‌خواهی بیوشیمیایی (BOD) استفاده می‌شود که هر پارامتر دارای وزن مخصوص به خود می‌باشد. بعد از یافتن وزن اختصاص داده شده به هر پارامتر از جدول ارائه شده در راهنمای شاخص، مجموع وزن پارامترها از رابطه ۳ به دست می‌آید. همچنین، از منحنی‌های رتبه‌بندی ارائه شده در راهنمای استفاده از شاخص، مقدار شاخص برای هر پارامتر محاسبه می‌شود که با استفاده از رابطه ۴، مقدار نهایی شاخص IRWQI_{SC} محاسبه می‌گردد و در نهایت با استفاده از جدول ۱ کلاس کیفی آب مشخص می‌شود. با وجود ۱۱ پارامتر فوق، می‌توان در مورد کیفیت آب اظهار نظر کرد. اما زمانی که پارامترهایی به غیر از این پارامترها در بررسی‌ها وارد شود دیگر نمی‌توان از این شاخص استفاده کرد و باید از شاخص دیگری که پارامترهای جدید را هم شامل می‌شود بهره گرفت. همچنین، اگر تعداد پارامترهای مورد بررسی کمتر از ۱۱ پارامتر تعیین شده در شاخص مذکور باشد، شاخص مذکور بدون هیچ‌گونه اصلاحی قابل استفاده می‌باشد (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰) که در

داده‌های مورد نیاز هواشناسی شامل دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت و جهت باد و میزان پوشش ابر از داده‌ها و اطلاعات اخذ شده از ایستگاه سینوپتیک قیدار و متناظرسازی مکانی با محل مخزن سد گلابر تهیه شد. اطلاعات مربوط به دبی ورودی و خروجی مخزن سد نیز به ترتیب از ایستگاه هیدرومتری زرزر واقع در بالادست مخزن سد و دفتر بهره‌برداری سد گلابر استخراج گردید. اطلاعات مربوط به پارامترهای دما، DO و TDS آب ورودی به مخزن سد نیز که داده‌های آنها به‌صورت ماهانه تهیه شده بود با ایجاد رابطه همبستگی بین داده‌های مذکور و داده‌های دمای هوا و دبی ورودی به‌صورت روزانه استخراج گردید که در شکل ۴ نشان داده شده است.

معیار ارزیابی

برای ارزیابی میزان اختلاف بین داده‌های شبیه‌سازی با مشاهداتی از میانگین خطای مطلق (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) مطابق با رابطه‌های ۱ و ۲ استفاده شده است.

$$MAE = \frac{\sum |\text{Predicted} - \text{Observed}|}{\text{Number of observations}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{observed}} - X_{\text{predicted}})^2} \quad (2)$$

استاندارد 1atm، P (atm) فشار هیدرواستاتیک، T (°K)، p_{wv} (atm) فشار نسبی بخار آب و DO (mg/l) میزان اکسیژن محلول می‌باشد (Mortimer, 1956).

نتایج و بحث

پس از اجرای اولیه مدل و واسنجی هندسه مخزن و تراز آب، مدل برای شبیه‌سازی دما، DO و TDS اجرا و نتایج شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه و واسنجی‌های مورد نیاز انجام گردید. شکل ۵ مقادیر مشاهداتی و مقادیر شبیه‌سازی شده را توسط مدل برای سه پارامتر دما، DO و TDS نشان می‌دهد.

نتایج شبیه‌سازی دما

نتایج شبیه‌سازی دما نشان‌دهنده وقوع پدیده واژگونی لایه‌بندی حرارتی مخزن از اواسط آبان ماه ۱۳۹۳ با شروع فصل سرما و وزش بادهای سرد فصلی تا اواخر فروردین ماه سال ۱۳۹۴ است که این پدیده عمدتاً به علت کاهش دمای لایه‌های سطحی و متعاقباً افزایش چگالی لایه‌های مذکور و جابجایی با لایه‌های زیرین به وقوع می‌پیوندد. در نتیجه، تغییرات پارامترهای مختلف کیفی از جمله دما در اعماق مختلف مخزن ناچیز است. کمترین میزان دما در سطح آب مخزن ۲/۳ درجه سانتی‌گراد است. لایه‌بندی حرارتی تابستانه از اواخر فروردین سال ۱۳۹۴ و هم‌زمان با گرم‌تر شدن هوا شروع شده و در اواخر مردادماه به اوج خود می‌رسد که در این شرایط حداکثر اختلاف دما بین سطح آب و اعماق مخزن به ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. حداکثر ضخامت رولایه و زیرلایه در شبیه‌سازی مذکور به ترتیب ۱۵ و ۳۲/۵ متر است. با توجه به مقاومت لایه‌های تحتانی مخزن در برابر نفوذ لایه‌های فوقانی، فعل و انفعالات شیمیایی و بیولوژیک مخزن در رولایه و زیرلایه با هم متفاوت بوده و منجر به تفاوت نسبتاً معنی‌دار مقادیر پارامترهای مختلف کیفی در لایه‌های فوق‌الذکر می‌گردد. از این‌رو، کیفیت کلی آب در لایه‌های مذکور در طول دوران لایه‌بندی تابستانه با هم متفاوت خواهد بود.

تحقیق صورت گرفته، شاخص کیفیت آب بر اساس دو پارامتر EC و درصد اکسیژن محلول اشباع مورد بررسی قرار گرفته است.

$$\gamma = \sum_{i=1}^n W_i \quad (3)$$

$$IRWQI_{SC} = \left[\prod_{i=1}^n I_i^{W_i} \right]^{\frac{1}{7}} \quad (4)$$

که در آن، W_i وزن پارامتر i ام، N تعداد پارامترها، I_i مقدار شاخص برای پارامتر نام از منحنی رتبه‌بندی و γ مجموع وزن پارامترها است.

جدول ۱- طبقه‌بندی مقادیر عددی شاخص IRWQIsc (هاشمی و همکاران، ۱۳۹۰)

مقدار عددی شاخص IRWQIsc	کلاس کیفی
15-29/9	بد
30-44/9	نسبتاً بد
45-55	متوسط
55/1-70	نسبتاً خوب
70/1-85	خوب
> 85	خیلی خوب

برای یافتن مقادیر EC از رابطه بدست آمده از برازش خطی داده‌های نمونه برداری EC و TDS به شرح زیر استفاده شده است (Azad et al, 2019).

$$EC = 1.46 TDS \quad (5)$$

میزان درصد اکسیژن محلول اشباع نیز با استفاده از رابطه‌های ۶ تا ۹ به دست آمده است:

$$\ln P = 5.25 \times \ln \left(1 - \frac{h}{44.3} \right) \quad (6)$$

$$C_p = C \times P \left[\frac{(1 - P_{wv})P(1 - \theta P)}{(1 - P_{wv})(1 - \theta)} \right] \quad (7)$$

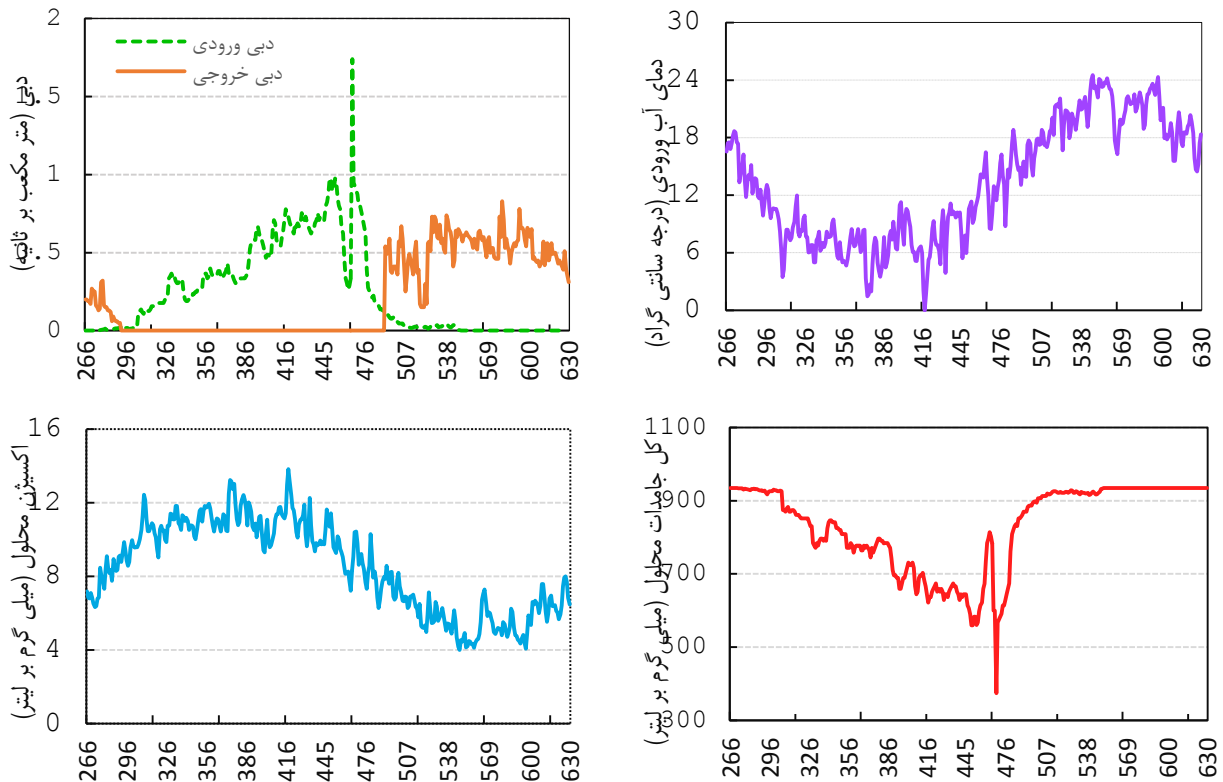
$$\ln P_w = 11.8571 - \left(\frac{3840.70}{T} \right) - \left(\frac{216.961}{T^2} \right) \quad (8)$$

$$DO_{\%sat} = \frac{(100 \times DO)}{C_p} \quad (9)$$

که در آن، P فشار (اتمسفیر) در ارتفاع h (برحسب کیلومتر) از سطح دریا نسبت به فشار استاندارد (Pst) در ۷۶۰ mmHg یا kpa فشار هیدرواستاتیک، C (mg/l) تعادل غلظت اکسیژن در فشار

جدول ۲- نتایج واسنجی مدل CE-QUAL-W2 برای مخزن سد گل‌آبر

نام پارامتر	تعداد داده	MAE	RMSE
هندسه مخزن	۵۱	۰/۴	۰/۵
تراز سطح آب	۳۶۵	۰/۰۰۹	۰/۰۳
دما	۱۱۲	۱/۱۳	۲/۲
DO	۱۱۲	۱/۲	۱/۴۵
TDS	۱۱۲	۱۹/۷	۲۲/۶



شکل ۴- نمودار سری زمانی برحسب روز میلادی (Julian day) دبی ورودی و خروجی و پارامترهای کیفی آب ورودی به مخزن سد گلابر

$$K_a = \frac{K_1}{H} = \frac{0.864W}{H} \quad (10)$$

که در آن، W (ms⁻¹) سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین، H (m) عمق آب و K_1 (m day⁻¹) سرعت هوادهی می‌باشد. در شبیه‌سازی صورت گرفته، اختلاط کامل DO از اواخر آبان ماه ۱۳۹۳ تا اواخر فروردین ۱۳۹۴ به دلیل رخداد پدیده واژگونی صورت می‌گیرد. از اواخر فروردین ماه ۱۳۹۴ و هم‌زمان با شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی، تغییرات غلظت DO در اعماق مخزن نیز شروع می‌گردد و در اوایل شهریور به اوج خود می‌رسد که حداکثر و حداقل میزان DO در این زمان ۶/۵ و صفر می‌باشد. در این شرایط، رشد زیاد جلبک‌ها در سطح آب مانع نفوذ نور خورشید به لایه‌های پایین‌تر شده و فعالیت فتوسنتز جلبک‌ها محدود به سطح آب می‌شود. همچنین تشکیل لایه ضخیم جلبک در سطح آب مخزن، هوادهی سطحی به آب مخزن را نیز دچار اختلال می‌کند. از سوی دیگر، تنفس موجودات زنده دیگر، فعل و انفعالات شیمیایی و اکسیژن‌خواهی رسوبات در لایه‌های تحتانی و کف مخزن، شرایط کمبود یا فقدان اکسیژن محلول را در این نواحی رقم می‌زند. حداقل میزان DO در مخزن برابر با صفر در شهریور و در زیرلایه و بیشترین میزان آن برابر ۱۰/۶۳ میلی‌گرم در لیتر در رولایه در اوایل اسفند ماه است.

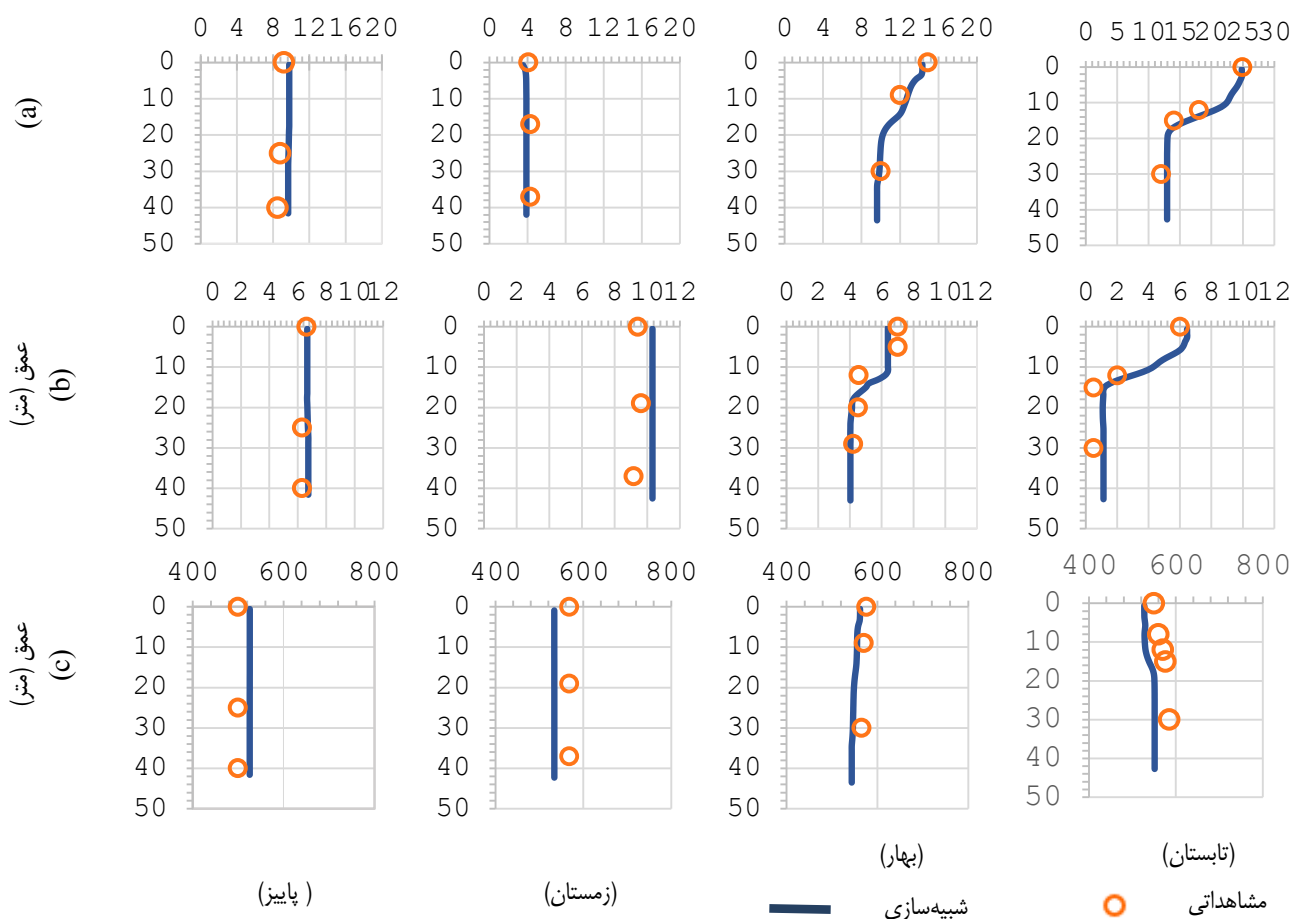
نتایج شبیه‌سازی DO

اکسیژن محلول یکی از پارامترهای مهم کیفی است که تغییرات آن، تأثیر زیادی در شرایط شیمیایی و بیولوژیک اکوسیستم‌های آبی دارد (Arend et al., 2011; Hupfer and Lewandowski., 2008). DO از طریق جریان ورودی، هوادهی سطحی و عمل فتوسنتز گیاهان سبزینه‌دار وارد پیکره‌های آبی شده و غلظت آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، فرآیندها و عوامل مختلف مصرف‌کننده DO مانند تجزیه مواد آلی و تنفس موجودات آبی گیاهی و جانوری سبب کاهش غلظت DO می‌شوند (Cole and Wells, 2000). در مخازن سدها، افزایش میزان اکسیژن در رولایه عمدتاً به دلیل تماس با اکسیژن موجود در اتمسفر و هوادهی تحت عوامل سرعت جریان آب، شیب کف مخزن، سرعت وزش باد و فتوسنتز گیاهان سبزینه‌دار است (خواجه پور و همکاران، ۱۳۹۲). کاهش اکسیژن که اغلب در زیرلایه بوقوع می‌پیوندد، عمدتاً به دلیل مصرف اکسیژن توسط عوامل شیمیایی و بیولوژیک می‌باشد (Shoaei et al., 2015). در مرحله واسنجی، بعد از آنالیز حساسیت برای فرآیند هوادهی سطحی، مناسب‌ترین رابطه به شرح زیر شناخته شده و مورد استفاده قرار گرفت (Cole and Wells., 2013):

نتایج شبیه‌سازی TDS

اعماق مخزن نیز شروع می‌گردد و در مرداد ماه به اوج خود به میزان حدود ۱۵ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد. در حالت کلی، با توجه به تأثیر افزایشی غلظت TDS در افزایش چگالی آب، انتظار می‌رود با افزایش عمق، میزان TDS نیز افزایش یابد. البته تأثیر سایر پارامترها مانند دما و مواد معلق در چگالی آب و تأثیر سرعت جریان را نباید نادیده گرفت. حداقل میزان TDS در مخزن برابر با ۵۲۹ میلی‌گرم در لیتر در اواخر مهر و بیشترین میزان آن برابر ۵۶۴ میلی‌گرم در لیتر در شهریورماه است.

TDS عامل مهمی در کیفیت آب است و تأثیر زیادی بر جابه‌جایی، تبدیل شیمیایی و یونیزه شدن مواد دارد. همچنین میزان غلظت املاح محلول در مناسب بودن آب در مصارف شرب، کشاورزی و صنعت نقش مهمی دارد. در شبیه‌سازی صورت گرفته، اختلاط کامل TDS از اواسط آبان ماه ۱۳۹۳ تا اواخر فروردین ۱۳۹۴ به دلیل رخداد پدیده واژگونی صورت می‌گیرد. از اواخر اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۴ و هم‌زمان با شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی، تغییرات غلظت TDS در



شکل ۵- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دما (a) برحسب درجه سانتی‌گراد، اکسیژن محلول (b) برحسب میلی‌گرم بر لیتر و کل جامدات محلول (c) برحسب میلی‌گرم بر لیتر در ایستگاه ۳۲ مخزن سد گلابر برای دوره شبیه‌سازی ۱۳۹۳-۱۳۹۴

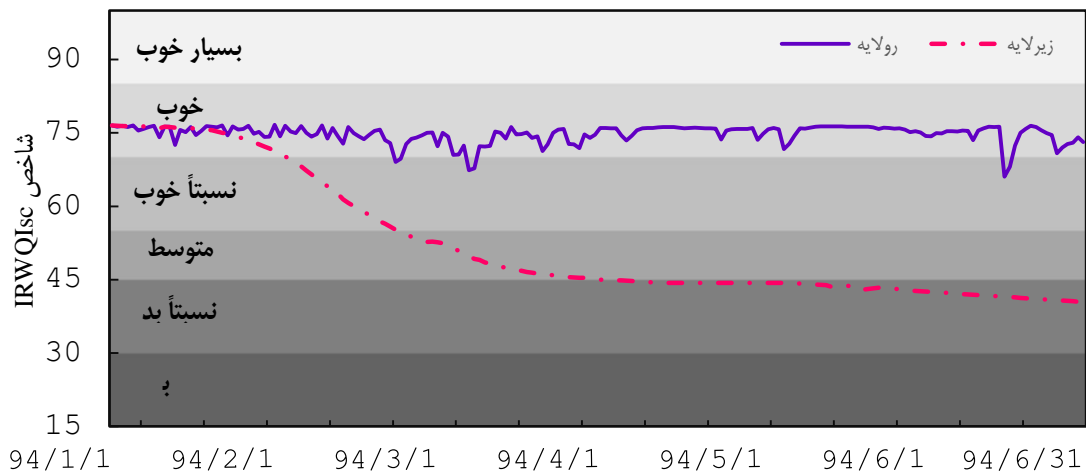
به بخشهای مختلفی قابل تقسیم است. تقسیم‌بندی زمانی با توجه به تأثیر وقوع پدیده لایه‌بندی حرارتی در نیمه گرم سال (شش ماهه اول سال) و اختلاط ناشی از واژگونی لایه‌بندی حرارتی در نیمه سرد سال (شش ماهه دوم سال) در کیفیت آب لایه‌های مختلف مخزن می‌باشد. همچنین، تقسیم‌بندی مکانی صرفاً در نیمه گرم سال و با توجه به تفاوت معنی‌دار پارامترهای مختلف کیفی تأثیرگذار در شاخص IRWQIsc در رولایه و زیرلایه قابل انجام است. لذا در

بررسی کیفیت آب در مخزن سد با استفاده از شاخص IRWQIsc

کیفیت آب برای اهداف شرب، کشاورزی و موجودات زنده اکوسیستم بسیار ضروری است. بنابراین ارزیابی کیفی منابع آب با استفاده از شاخص‌های کیفی، برای مدیریت پیکره‌های آبی و اتخاذ برنامه‌ای منظم برای حفاظت کیفی منابع آب، اجتناب‌ناپذیر است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، کیفیت آب مخزن به لحاظ زمانی و مکانی

بازه زمانی از مقادیر میانگین پارامترهای EC و DO کل مخزن در محاسبه شاخص کیفی فوق‌الذکر استفاده شده است. سری زمانی متوسط مقادیر شاخص کیفی آب در المان ۳۸ واقع در مجاورت بدنه سد در شش‌ماهه گرم سال در رولایه و زیرلایه در شکل ۶ نشان شده است.

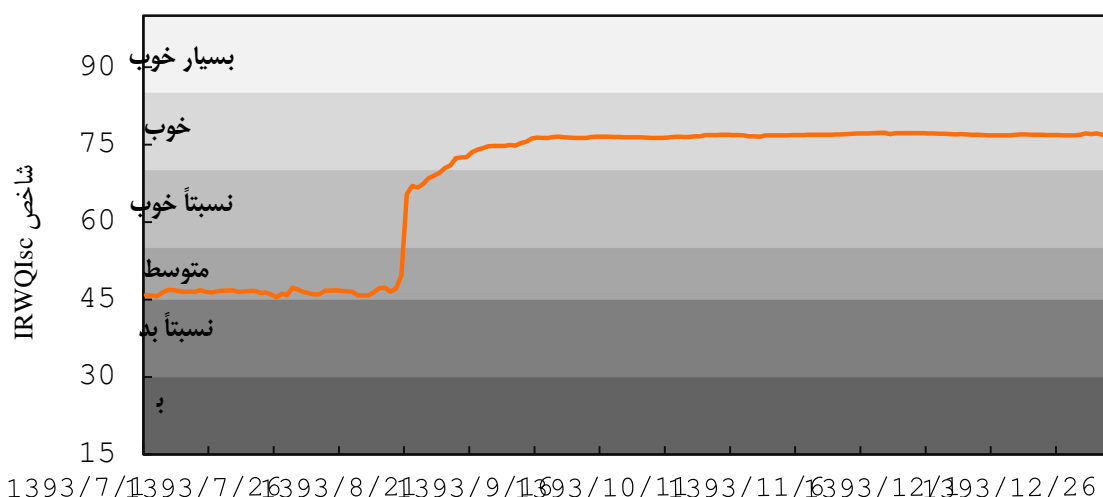
تحقیق حاضر، در شش‌ماهه گرم سال، مقادیر متوسط پارامترهای EC و DO در رولایه و زیرلایه به‌صورت جداگانه در تعیین شاخص IRWQI_{sc} مورد استفاده قرار گرفته است. شایان ذکر است که در نیمه سرد سال، به دلیل اختلاط مخزن ناشی از واژگونی لایه‌بندی حرارتی، مقادیر پارامترهای مختلف کیفی تأثیرگذار در شاخص IRWQI_{sc} در بخش‌های مختلف مخزن نسبتاً ثابت بوده و در این



شکل ۶- نمودار سری زمانی شاخص IRWQI_{sc} در رولایه و زیرلایه در نیمسال اول ۱۳۹۴ در المان ۳۸

شروع لایه‌بندی حرارتی در مخزن، متوسط مقدار شاخص کیفی آب در زیرلایه از حدود ۷۵ (رده‌بندی خوب) به حدود ۴۰/۴۲ (رده‌بندی نسبتاً بد) کاهش پیدا می‌کند. سری زمانی متوسط مقادیر شاخص کیفی آب در المان ۳۸ واقع در مجاورت بدنه سد در شش‌ماهه سرد سال در شکل ۷ آورده شده است. بر اساس این شکل، میزان متوسط شاخص کیفی IRWQI_{sc} از اول مهر تا ۱۶ آبان ۱۳۹۳ در کلاس حدود ۴۶ (رده‌بندی متوسط) قرار دارد که نشان‌دهنده تداوم شرایط لایه‌بندی تابستانه در مخزن و اختلاف زیاد کیفیت آب رولایه و زیرلایه است. با سرد شدن هوا از اوایل آبان ماه، شرایط برای واژگونی لایه‌بندی فراهم شده و با اختلاط کامل مخزن به علت وقوع واژگونی و تأثیر پارامترهای محیطی از جمله وزش بادهای نسبتاً سرد فصلی و علاوه بر آن تأثیر شروع افزایش جریان‌های با کیفیت ورودی در مخزن پس از یک دوره نسبتاً خشک، مقدار شاخص کیفی آب مخزن روند رو به رشدی را تجربه می‌کند، به طوری که در مدت کمتر از یک ماه از حدود ۴۶ (رده‌بندی متوسط) به حدود ۷۷ (رده‌بندی خوب) ترقی می‌کند.

بر اساس نتایج شکل مذکور، میزان شاخص IRWQI_{sc} از ابتدای فروردین تا اوایل اردیبهشت ۱۳۹۴ در رولایه و زیرلایه باهم برابر است که علت آن امتداد شرایط واژگونی زمستانه مخزن تا اواخر فروردین ماه می‌باشد. مقدار شاخص کیفی آب در این ایام در حدود ۷۶/۵ می‌باشد و طبق جدول ۱ در کلاس کیفی خوب قرار دارد. با شروع اردیبهشت و افزایش دمای هوا، لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد گلابر شروع شده و به دلیل تفاوت مقادیر EC و DO در رولایه و زیرلایه، مقادیر شاخص کیفی آب در لایه‌های مذکور متفاوت شده و شاخص کیفی آب در زیرلایه، روند نزولی دارد. نوسانات جزئی ایجاد شده در شاخص کیفی رولایه ناشی از تأثیر مستقیم شرایط جوی در میزان پارامتر DO است و حال آنکه در زیرلایه، به دلیل وجود یک محیط نسبتاً بسته، فعل و انفعالات کیفی تأثیرگذار در شاخص کیفی IRWQI_{sc} دارای روند نسبتاً ثابتی بوده و مصرف و کاهش مداوم ذخیره DO در زیرلایه تحت عوامل مختلف شیمیایی و بیولوژیک موجب کاهش تدریجی شاخص کیفی می‌گردد. متوسط مقدار شاخص کیفی در رولایه حدود ۷۵ است که با توجه به جدول ۱ کیفیت آب در رده خوب قرار می‌گیرد. همچنین، از زمان



شکل ۷- نمودار سری زمانی شاخص IRWQIsc در نیمسال دوم ۱۳۹۳ در آلمان ۳۸

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، پارامترهای مختلف دما، TDS و DO در مخزن سد گلابر در بازه زمانی ابتدای مهرماه ۱۳۹۳ تا انتهای شهریورماه ۱۳۹۴، توسط مدل CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی گردید و با استفاده از داده‌های میدانی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته، تطابق خوبی با داده‌های میدانی داشته که مقادیر خطاهای به‌دست‌آمده مؤید این مطلب است. نتایج بدست آمده نشان دهنده وقوع لایه‌بندی دما و پارامترهای کیفی تحت بررسی در بخش اعظمی از شش ماهه گرم سال (لایه‌بندی تابستانه) و واژگونی لایه‌بندی در اکثر ایام شش ماهه سرد سال (واژگونی زمستانه) بوده است. شروع لایه‌بندی تابستانه از اواخر فروردین و همزمان با گرمتر شدن دمای هوا و اوج آن در اواخر مرداد با تشکیل رولایه و زیرلایه نسبتاً ضخیم در مخزن به وقوع پیوسته است. به‌طوری که حداکثر اختلاف مقادیر پارامترهای دما، TDS و DO در شرایط اوج لایه‌بندی تابستانه به ترتیب برابر با ۱۲/۲ درجه سانتی‌گراد، ۱۵ میلی‌گرم در لیتر و ۶/۵ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. با رسیدن فصل سرما و کاهش دمای هوا از اواخر مهر لایه‌بندی حرارتی ضعیف شده و واژگونی و اختلاط لایه‌های مختلف مخزن اتفاق افتاده و این اختلاط تا شروع فصل گرما ادامه پیدا می‌کند. با توجه به تغییرات مکانی و زمانی پارامترهای تحت بررسی، TDS و DO در مخزن در طول دوره شبیه‌سازی به علت وقوع لایه‌بندی تابستانه و واژگونی زمستانه، کیفیت آب مخزن متغیر بوده و بر این اساس، در تحقیق حاضر، شاخص کیفی IRWQIsc در مخزن سد گلابر محاسبه شده و تغییرات زمانی و مکانی شاخص مذکور مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج این ارزیابی نشان‌دهنده کاهش زیاد کیفیت آب در زیرلایه نسبت به رولایه در

شرایط وقوع لایه‌بندی تابستانه می‌باشد. به‌طوری که بر اساس شاخص کیفی مذکور از رده‌بندی خوب در رولایه به نسبتاً بد در زیرلایه کاهش می‌یابد. نکته حائز توجه، کاهش مداوم و تدریجی کیفیت آب در زیرلایه بدلیل مصرف DO توسط عوامل مختلف شیمیایی و بیولوژیک می‌باشد. لذا در تعیین تراز برداشت آب می‌بایست تفاوت کیفیت آب مخزن در زیرلایه و رولایه متناسب با نوع مصرف آب مورد توجه جدی واقع شود. اختلاط مخزن ناشی از وقوع واژگونی و افزایش ورود جریان باکیفیت آب از رودخانه بالادست، موجب همسانی کیفیت آب در عمق و افزایش شاخص کیفی آب مخزن از اواخر آبان ماه تا شروع لایه‌بندی تابستانه می‌شود و در طول این دوره می‌توان از ترازهای مختلف مخزن برای برداشت آب مصرفی استفاده نمود.

منابع

- حمزه پور، ص. ۱۳۹۱. بررسی تأثیر پدیده لایه‌بندی حرارتی و تغذیه گرایبی باکیفیت آب مخزن. اولین همایش ملی تصفیه آب و پساب‌های صنعتی. آذر ماه، دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد ماهشهر.
- خواجه پور، م.، کریمی، ل.، شیباسی ارانی، م.، انصاری، ح. ۱۳۹۲. بررسی تغذیه گرایبی مخازن سدها با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 (مطالعه موردی: سد شیرین دره بجنورد، استان خراسان شمالی). آبیاری و زهکشی ایران. ۱۰۸: ۹۶-۱۰۷.
- خواجه پور، م.، اقبال زاده، ا.، شیباسی ارانی، م.، افتخاری، م.، جوان، م. ۱۳۹۳. مقایسه مدل‌های CE-QUAL-W2 و DYRESM در شبیه‌سازی توزیع دما در مخزن سد پانزده خرداد. آب و خاک. ۲۸

- Gamvroula, D., Alexakis, D., Stamatis, G. 2013. Diagnosis of groundwater quality and assessment of contamination sources in the Megara basin (Attica, Greece). *Arab J Geosci.* 7.6:2367–2381. ۲: ۳۴۳–۳۵۲.
- Goher, M.E., Hassan, A.M., Abdel-Moniem, I.A., Fahmy, A.H., El-sayed, S.M. 2014. Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal, Nile River, Egypt. *The Egyptian Journal of Aquatic Research.* 40.3:225–233.
- Hupfer, M., Lewandowski, J. 2008. Oxygen controls the phosphorus release from lake sediments—a long-lasting paradigm in limnology. *International Review of Hydrobiology.* 93.4-5:450-532.
- Javid, A. H., Mirbagheri, S.A., Karimian, A. 2014. Assessing Dez Dam reservoir water quality by application of WQI and TSI indices. *Iranian Journal of Health and Environment.* 7.2:133-142.
- Mortimer, C.H. 1956. The oxygen content of air-saturated fresh waters, and aids in calculating percentage saturation. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Mitteilungen.* 6.1:1-20.
- Noori, R., Yeh, H.D., Ashrafi, K., Rezazadeh, N., Bateni, S.M., Karbassi, A., Kachooangi, F.T., Moazami, S. 2015. A reduced-order based CE-QUAL-W2 model for simulation of nitrate concentration in dam reservoirs. *Journal of Hydrology.* 530.1:645-656.
- Park, Y., Cho, K. H., Kang, J., Lee, S. W., Kim, J. H. 2014. Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model. *Science of the Total Environment.* Vol. 466–467.1:871–880.
- Rahimi-Movaghar, M., Mirbagheri, S. A., and Kerachian, R. 2019. Total dissolved solid and dissolved oxygen modeling, thermocline calculation and applying reservoir salinity reduction scenarios in Shahid Rajaei reservoir using CE-QUAL-W2. *Water Supply.* 19.2:424-433.
- Samal, N. R., Pierson, D. C., Schneiderman, E., Huang, Y., Read, J.S., Anandhi, A., and Owens, E.M. 2012. Impact of climate change on Cannonsville Reservoir thermal structure in the New York City water supply. *Water Quality Research Journal.* 47.3-4:389-405.
- Shoaei, S. M., Mirbagheri, S.A., Zamani, A., Bazargan, J. 2015. Seasonal variation of dissolved heavy metals in the reservoir of Shahid Rajaei dam, Sari, Iran. *Desalination and Water Treatment.* 56.12:3368-3379.
- Tsakiris, G. 2015. The status of the European waters in 2015: a review. *Environ Process.* 3.2:543–557.
- Xu, Z., Godrej, A. N., Grizzard, T.J. 2007. The
- رضازاده، ن.، نظری‌ها، م.، سارنگ، ا. ۱۳۹۳. مدیریت کیفیت آب خروجی از مخزن سد کرخه با انتخاب تراز تخلیه مناسب. *مجله پژوهش‌های محیط‌زیست.* ۹. ۵: ۱۲۵–۱۳۶.
- شکوهی، ر.، حسین زاده، ا.، روشنائی، ق.، علیپور، م.، حسین زاده، س. ۱۳۹۰. بررسی کیفیت آب دریاچه پشت سد آیدگموش با استفاده از شاخص ملی کیفیت آب (NSFWQI) و تغییرات پارامترهای کیفی آب. *فصلنامه سلامت و محیط زیست.* ۴. ۴: ۴۳۹–۴۵۰.
- صمدی، ج. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر مکانی-زمانی کاربری اراضی بر کیفیت آب تالاب چغاخور با استفاده از شاخص IRWQI و روش‌های آماری. *مجله تحقیقات منابع آب ایران.* 11. 3: 159–171.
- کیانی صدر، م. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول با کاربرد مدل CE-QUAL-W2 (مطالعه موردی: سد گرشا). *مجله علمی و پژوهشی اکوبیولوژی تالاب.* ۹. ۲: ۳۹–۵۲.
- مفتاح هلقی، م. ۱۳۹۰. پهنه‌بندی کیفی آب با استفاده از شاخص‌های متفاوت کیفی (مطالعه موردی: رودخانه اترک). *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی).* ۱۸. ۲: ۲۱۱–۲۲۰.
- نظری‌ها، م.، دانایی، ع.، هاشمی، ح.، ایزد دوستدار، ا. ۱۳۸۹. پیش‌بینی لایه‌بندی حرارتی سد در دست احداث بختیاری با استفاده از مدل CE-QUAL-W2. *مجله محیط‌شناسی.* ۵۴. ۳۶: ۱۱–۱۸.
- هاشمی، س.ح.، فرزاد پوراسگرت، ر.، رضائی، س.، خوشرو، غ.، ۱۳۹۰. راهنمای محاسبه شاخص کیفیت منابع آب ایران. سازمان حفاظت محیط زیست ایران.
- Abbasi, T., Abbasi, S.A. 2012. *Water quality indices.* Elsevier. P: 363.
- Arend, K.K., Beletsky, D., DePINTO, J.V., Ludsins, S.A., Roberts, J.J., Rucinski, D.K., Hook, T.O. 2011. Seasonal and interannual effects of hypoxia on fish habitat quality in central Lake Erie. *Freshwater Biology.* 56.2:366-383.
- Azad, A., Karami, H., Farzin, S., Mousavi, S. F., Kisi, O. 2019. Modeling river water quality parameters using modified adaptive neuro fuzzy inference system. *Water Science and Engineering.* 12.1: 45-54.
- Cole, T.M., Wells, S.A., 2013. *CE-QUAL-W2: a Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Hydrodynamic and Water Quality Model (3.71 edition).* Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland.

Occoquan watershed, Virginia. Journal of Hydrology. 345.3-4:167-183.

hydrological calibration and validation of a complexly-linked watershed-reservoir model for the

Application of IRWQI_{SC} Index in the Water Quality Evaluation of Dam Reservoirs (Case Study: Golabar Dam Reservoir, Zanjan)

S. Rasouli^{1*}, J. Bazargan², S. M. Shoaei³

Received: Jun.13, 2019

Accepted: Aug.02, 2019

Abstract

The Evaluation of the quality of water resources using numerical models and qualitative indices has recently been considered by many researchers. In the present study, the thermal and qualitative stratification of the Golabar Dam reservoir, located in Zanjan, Iran, was investigated. In addition, the water quality was evaluated at different points of the reservoir at different times using the IRWQI_{SC} (Iran Water Quality Index) index. For this purpose, the 2-D CE-QUAL-W2 numerical model was used for the hydrodynamic as well as the dissolved oxygen and total dissolved solid simulation for the 1-year period of 2014 to 2015. The simulation results indicated a summer thermal stratification period from mid-March to mid-September. The water quality evaluation indicated a good water quality of the top layer of the reservoir during the six warm months of the year with an index of 75. On the other hand, the water quality of the sub layer dropped from the good with an index of 75 to a rather bad class with an index of about 40/5. In addition, in the six cold months of the year, the water quality improved from the middle class with an index of 46 to the good class with an index of about 77. In general, the spatial and temporal study of the water quality of the dam reservoirs using different water quality indices such as IRWQI_{SC} can significantly help in determination of the water quality and providing management strategies for the verification of the water draw-off elevation, optimal water usage as well as providing solutions for improving the water quality in the reservoirs.

Keywords: Golabar storage dam, IRWQI_{SC} qualitative index, thermal stratification, CE-QUAL-W2 numerical model

1- M.Sc. Student in Hydraulic Structures Engineering., Civil Engineering Department, Zanjan University, Zanjan, Iran
2- Associate Professor, Civil Engineering Department, Zanjan University, Zanjan, Iran
3- Assistant Professor, Civil Engineering Department, Zanjan University, Zanjan, Iran
(* - Corresponding Author Email: shadirasouli100@gmail.com)