

شبیه‌سازی عددی کیفیت آب مخزن سد علویان با نرم‌افزار CE-QUAL-W2

چکیده

کیفیت آب مخازن سدها به دلایل مختلف همچون لایه‌بندی حرارتی، تجمع مواد جامد محلول ناشی از آب‌های ورودی، زمان ماند بالا و تغذیه گرای همواره دستخوش تغییرات است. به همین دلیل تحقیق حاضر باهدف تعیین الگوی حرارتی و بررسی شرایط کیفی آب مخزن سد علویان با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 در سال ۱۳۹۴ (۲۰۱۶) انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد از میانه خرداد تا میانه شهریور مخزن لایه‌بندی حرارتی نسبتاً قوی را تجربه می‌کند به‌طوری‌که در این دوره اختلاف دمای لایه‌های فوقانی و زیرین سد به‌طور متوسط برابر ۱۲/۳۱ درجه سانتی‌گراد می‌گردد. همچنین با توجه به اکوسیستم فعال در رودخانه پایین‌دست و شناسایی انواع خاصی از ماهیان در آن، اختلاف دمای آب رودخانه با آب خروجی از آبگیرها موردبررسی قرار گرفت که این اختلاف برای آبگیر تراز ۱۵۳۰ متر در فصل تابستان به‌طور متوسط در حدود ۶/۷ درجه سانتی‌گراد محاسبه گردید که بالاتر از مقادیر مجاز می‌باشد. به دلیل وقوع طبقه‌بندی کیفی در مخزن هم‌زمان با لایه‌بندی حرارتی و کاهش غلظت اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن در تابستان به ۵/۳۵ میلی‌گرم در لیتر، پیش‌بینی وضعیت مخزن برای سال ۲۰۲۱ به ازای سناریوهای مختلفی ناشی از تغییرات اقلیمی و کاهش مقدار اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن هدف قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهند که در بحرانی‌ترین شرایط (۱۰ درصد افزایش دمای محیط و ۱۰ درصد کاهش اکسیژن محلول) مقدار این پارامتر تا ۴/۴ میلی‌گرم در لیتر افت خواهد داشت که وقوع شرایط بی‌هوازی و تولید بو، رنگ و طعم نامطبوع را می‌بایست انتظار داشت. در ارتباط با تغییرات شوری نتایج نشان می‌دهند که لایه‌های زیرین نسبت به لایه‌های بالاتر آب املاح بیشتر دارند، اما با این‌وجود به دلیل مقادیر پایین شوری در آب رودخانه صوفی‌چای، این مقدار در مخزن در بحرانی‌ترین حالت از ۱۲۵/۴۵ میلی‌گرم در لیتر تجاوز نمی‌کند و اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای با مقدار مجاز اعلام‌شده در استاندارد کیفی آب‌های ایران دارد.

واژگان کلیدی: کیفیت آب، سد علویان، نرم‌افزار CE-QUAL-W2.

مقدمه

آب ذخیره‌شده در مخازن سدها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع آب شیرین محسوب می‌شود که حفظ کیفیت آن در شرایط کنونی که جهان با کمبود این منابع مواجه است اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. لایه‌بندی عمودی دریاچه‌ها و وقوع چرخش سالانه به‌عنوان مؤثرترین عامل در تغییر ویژگی‌های زیستی و شیمیایی دریاچه‌ها شناخته می‌شوند (NALMS, 2001). لایه‌بندی به دلایل گوناگون همچون اختلاف چگالی ناشی از دما، شوری و مواد جامد معلق می‌تواند رخ دهد که متداول‌ترین آن‌ها تغییرات چگالی ناشی از اختلاف دمایی می‌باشد. لایه‌های سطحی آب در مخازن انرژی گرمایی را به‌طور مستقیم از نور خورشید و گرمای اضافی هوا جذب می‌کنند و در مقابل اختلاط ناشی از باد باعث توزیع این گرما در لایه‌های زیرین می‌شود. اما به دلیل عمق زیاد، اختلاط کامل در راستای عمودی رخ نمی‌دهد و محدود به آب‌های نزدیک به لایه سطحی می‌شود (Ji, 2017). وقوع لایه‌بندی موجب کاهش کیفیت آب در لایه‌های زیرین مخازن می‌گردد و به دنبال آن کاربری‌های مورد انتظار آب مانند شرب، کشاورزی، صنعت و حفظ اکوسیستم پایین‌دست مختل می‌گردد. جهت تشخیص شرایط لایه‌بندی حرارتی و کیفی دریاچه‌ها می‌توان از نمونه‌برداری‌های میدانی به‌طور مستقیم استفاده نمود، اما باید توجه داشت که پایش کیفی لایه‌های مختلف آب مخازن نیازمند استمرار و صرف

کامله آقاجانلو^{۱*}

علی اسدی آسیابدری^۲

۱. استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه مراغه،

مراغه، ایران.

۲. دانشجوی مهندسی مدیریت منابع آب، دانشگاه

مراغه، مراغه، ایران.

*مسئول مکاتبات:

aghajanloo@maragheh.ac.ir

کد مقاله: ۱۴۰۰۴۰۹۰۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۴

این مقاله پژوهشی و برگرفته از طرح

پژوهشی است.



هزینه بسیار است. بنابراین به نظر می‌رسد به‌کارگیری هم‌زمان مدل‌های ریاضی و نتایج نمونه‌برداری‌ها می‌تواند در برآورد وضعیت مخزن مؤثرتر واقع شود و همچنین پیش‌بینی وضعیت کیفی مخزن تحت شرایط مختلف اقلیمی و نیز تزریق بارهای آلودگی احتمالی را ممکن می‌سازد. در جدول ۱ رده‌بندی دریاچه‌ها بر اساس الگوی طبقه‌بندی حرارتی و اختلاط در آن‌ها ارائه گردیده است (Boehrer and Schultze, 2008):

جدول ۱: رده‌بندی دریاچه‌ها بر اساس شرایط چرخش آب.

نام رده	وضعیت دریاچه
دریاچه‌های هولومیکتیک	در این دریاچه‌ها حداقل سالی یک‌بار واژگون و اختلاط کامل صورت می‌گیرد و می‌توان آن‌ها را به سه گروه اصلی طبقه‌بندی نمود: دریاچه‌های مونومیکتیک: یک‌بار اختلاط کامل در این دریاچه‌ها رخ می‌دهد. بسته به تراز و عرض جغرافیایی به دودسته مونومیکتیک سرد و گرم طبقه‌بندی می‌شوند. دریاچه‌های دیمیکتیک: در سال دو بار اختلاط در آن‌ها رخ می‌دهد. دریاچه‌های پلی‌میکتیک: دریاچه‌هایی کم‌عمق که مدام در حال اختلاط هستند.
دریاچه‌های مرومیکتیک	دریاچه‌هایی هستند که در آن‌ها گردش آب به‌طور کامل در آن‌ها صورت نمی‌گیرد و معمولاً یک‌لایه زیرین بی‌اکسیژن دارند.
دریاچه‌های آمیکتیک	این دریاچه‌ها یک چرخش عمیق را تجربه نمی‌کنند و پخشیدگی باعث انتشار گرما و املاح می‌گردد. معمولاً دریاچه‌های دائمی پوشیده از یخ در این کلاس گنجانده می‌شوند.

بر این اساس تعیین رژیم حرارتی مخازن سدها و ارزیابی مقادیر اکسیژن محلول و دیگر پارامترهای کیفی در فصول مختلف، اهمیت بسیاری زیادی می‌یابد. در دهه‌های اخیر همراه با پیشرفت‌هایی که در زمینه مطالعات کیفیت آب صورت گرفته، مدل‌های ریاضی در این زمینه توسعه یافتند که می‌توانند به‌عنوان ابزار مناسبی جهت پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی و کیفیت آب دریاچه‌ها و مخازن در اختیار مهندسین محیط‌زیست و مدیریت منابع آب قرار بگیرند. یکی از این مدل‌های ریاضی، نرم‌افزار CE-QUAL-W2 می‌باشد که در دهه‌های اخیر قابلیت‌های آن در زمینه شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب در مخازن مورد تأیید بسیاری از محققین قرار گرفته است. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای که روی تغییرات دما در دریاچه سویانگ کره با استفاده از این نرم‌افزار انجام شد، برای کالیبراسیون از داده‌های سال ۱۹۹۶ و برای اعتبارسنجی از داده‌های سال‌های ۱۹۹۵-۲۰۰۵ استفاده گردید. نتایج این تحقیق اثبات‌کننده قابلیت بالای مدل در پیش‌بینی توزیع دمایی، حرکت جریان چگال و به‌طور کلی شبیه‌سازی کیفیت آب مخازن می‌باشد (Jin and Ji, 2004). در مطالعه‌ای دیگر، تغییرات شرایط دمایی در دریاچه لورانس نیز با این نرم‌افزار مدل‌سازی گردید و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، سناریوهایی را برای تغییر دبی خروجی به کار گرفته شد تا در رژیم حرارتی دریاچه تغییراتی ایجاد شود (Berger et al., 2005). در پروژه بررسی اثرات طرح‌های برداشت انتخابی آب بر لایه‌بندی حرارتی در سد کوریس در قبرس با نرم‌افزار CE-QUAL-W2 نتایج نشان دادند الگوی حرارتی و دمای آب پیش‌بینی‌شده در مخزن به‌طور محسوسی تحت تأثیر طرح‌های برداشت آب قرار می‌گیرند (Ma et al., 2008) همچنین این مدل برای مخزن سد شهید رجایی در مازندران با کاربری آب شرب مورد استفاده قرار گرفت که نتایج مطالعات نشان داد با استمرار وضعیت مخزن، در سال‌های بعد شرایط کاملاً بی‌هوازی در لایه‌های زیرین مخزن رخ می‌دهد (Saeidi et al., 2014). خواجه پور و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد پانزده خرداد از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 استفاده نمودند و علاوه بر تأیید قابلیت آن در شبیه‌سازی کیفی آب مخزن، دریافتند لایه‌بندی تابستانه در مخزن رخ می‌دهد که همراه با یک‌بار واژگونی در سال می‌باشد. در مطالعه بررسی رژیم حرارتی و شوری در مخزن سد ماملو در استان تهران با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2، تغییرات حرارتی و شوری این مخزن تا سال ۲۰۲۰ بر اساس سناریوهای مختلف دبی آب ورودی و خروجی پیش‌بینی گردید (Sabeti and Jamali, 2017). طلاکش و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعات خود بر روی مخزن سد کارون ۳ به این نتیجه رسیدند که لایه‌بندی حرارتی پایدار تابستانی در مخزن رخ می‌دهد که همراه با کاهش دما در فصول سرد این شرایط از بین رفته و مخزن اختلاط کامل را در فصل سرد تجربه می‌کند. همچنین

در تحقیقی که بر روی کیفیت آب در دو ایستگاه بالادست و پایین‌دست در سد جره در خوزستان در دوره ۵ ساله با مدل CE-QUAL-W2 انجام شد، کاهش فعالیت‌های کشاورزی به‌عنوان راهکاری جهت کاهش میزان آلودگی در مخزن پیشنهاد گردید (Neissi *et al.*, 2019). در تحقیق انجام‌شده بر روی کیفیت آب مخزن دیفن‌بیکر در کانادا، شش سناریو جهت برداشت آب از ترازهای مختلف مخزن طراحی شد و با مدل‌سازی کیفی آب با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 تأثیر سناریوهای استخراج بر خصوصیات مخزن موردبررسی قرار گرفت (Lindenschmidt *et al.*, 2019). در تکمیل این تحقیق، Carr و همکاران (۲۰۱۹) نتیجه گرفتند در طول تابستان به دلیل حجم بالای آب خروجی از سرریزها، آب با غلظت بالای مواد مغذی و دمای کم در طول سطح مخزن با بالاترین سرعت جریان می‌یابد و اختلاط در ستون آب به تأخیر می‌افتد. در تحقیقی دیگر روی مخزن سد کرخه، نتایج مدل‌سازی ریاضی CE-QUAL-W2 با تکنیک‌های داده‌کاوی ترکیب شد تا روش جدیدی برای شناسایی دامنه‌های کنترل زمانی و مکانی بحرانی ایجاد شود. برای این منظور، تغییرات طولانی‌مدت سه پارامتر کیفیت از جمله سطح نیتریت-نیتрат، سطح اکسیژن محلول و درجه حرارت آب در نزدیکی خروجی سد مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مخزن سد کرخه در هر سال دوره‌ای از لایه‌بندی حرارتی شدید را تجربه می‌کند که در طی آن لایه ترموکلاइन با ضخامت ۳۰ متر تشکیل می‌شود. این لایه‌بندی از ماه ژوئن آغاز می‌شود، در اگوست به اوج می‌رسد و تا اکتبر ادامه دارد (Yoosef Doost *et al.*, 2020). همچنین برای بررسی وضعیت کیفی آب مخزن سد امیرکبیر (Arefinia *et al.*, 2020) از تکنیک‌های برنامه‌ریزی ژنتیکی، شبکه عصبی مصنوعی و دستگاه بردار پشتیبانی برای مدل‌سازی کیفیت مخزن استفاده کردند که داده‌های ورودی موردنیاز با استفاده از نرم‌افزار CE-QUALW2 به دست آمد. این مطالعه قابلیت به‌کارگیری ابزارهای داده‌کاوی برای شبیه‌سازی غلظت املاح در مخازن را اثبات می‌کند. با توجه به اهمیت مطالعات کیفی آب مخازن سدها، در این تحقیق سد علویان بر روی رودخانه صوفی‌چای به‌عنوان نمونه مطالعاتی انتخاب گردید و تعیین الگوی حرارتی مخزن در طول سال و بررسی روند تغییرات کیفی تحت تأثیر تغییر شرایط اقلیمی و کیفیت آب رودخانه بالادست با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 هدف قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

رودخانه صوفی‌چای از ارتفاعات سه‌هند در شمال غرب ایران سرچشمه می‌گیرد و با عبور از شهرهایی همچون مراغه و بناب در نهایت به دریاچه ارومیه می‌ریزد. سد علویان بر روی رودخانه صوفی‌چای و در فاصله ۳/۵ کیلومتری از شهر مراغه، باهدف کنترل آب‌های سطحی، تأمین آب شرب شهرهای اطراف و آب موردنیاز کشاورزان منطقه احداث گردیده است. در جدول ۲ اطلاعات و مشخصات سد علویان و در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی سد آورده شده است.

جدول ۲: مشخصات ساختمان سد و مشخصات هیدرولیکی سد.

ارتفاع سد از پی	۷۶ متر	حجم مخزن	(میلیون مترمکعب) (MCM) ۵۷/۷
طول تاج	۹۳۵ متر	دریچه‌های تخلیه	در ترازهای ۱۵۲۵، ۱۵۳۰ و ۱۵۴۵ از سطح دریا



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی سد علویان.

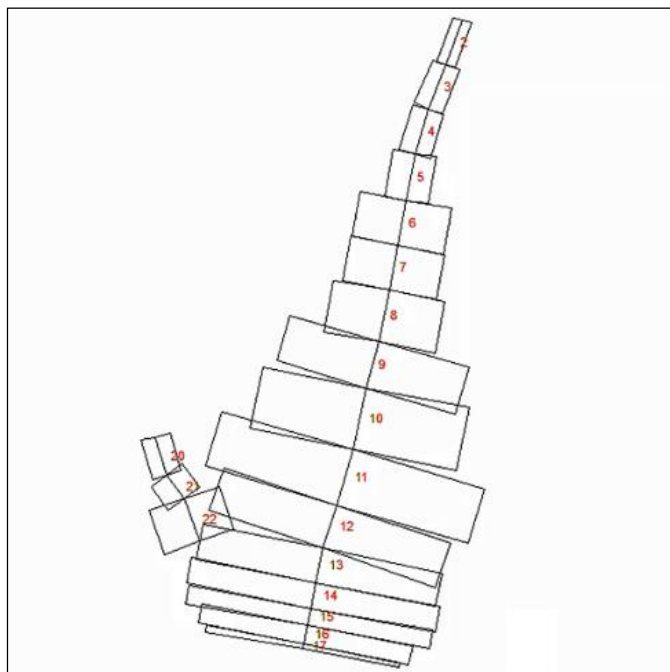
همان‌گونه که عنوان گردید، در تحقیق حاضر نرم‌افزار CE-QUAL-W2 که یک مدل دوبعدی (طولی/ عمودی) هیدرودینامیکی و کیفی آب با تکنیک حل اختلاف محدود می‌باشد، جهت شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن سد علویان انتخاب گردید. با توجه به فرضیات به‌کاررفته بر مبنای همگنی در راستای جانبی، این نرم‌افزار برای آب‌های به نسبت طولانی و باریک که دارای گرادیان کیفیت آب در راستای طولی و عمودی هستند، مناسب می‌باشد (Cole and Wells, 2008). این مدل قادر است تراز سطح آب، سرعت، دما و تعداد زیادی از پارامترهای کیفی آب مانند اکسیژن محلول، مواد مغذی، جلبک‌ها و غیره را پیش‌بینی نماید. همچنین انواع ورودی‌های جریان و آلودگی مانند منابع نقطه‌ای/ غیر نقطه‌ای، شاخه‌های فرعی و بارش و نیز انواع سازه‌های هیدرولیکی از قبیل سرریزها و لوله‌ها به‌عنوان خروجی در آن قابل تعریف هستند. از دیگر ویژگی‌های خاص آن می‌توان به وجود تعامل و ارتباطات پیچیده میان پارامترهای کیفی آب گنجانده‌شده در آن و درعین حال روش‌های ساده مورد استفاده برای شبیه‌سازی این پارامترها اشاره نمود که در نتیجه آن‌ها نرم‌افزار قابلیت بالایی در این زمینه پیدا کرده است (Cole and Wells, 2003).

در مرحله بعد، به‌منظور شبیه‌سازی کیفی مخزن سد علویان نیاز به داده‌هایی شامل اطلاعات هواشناسی (مانند دمای هوا، نقطه شبنم، سرعت و جهت باد و ساعات ابرناکی، در بازه‌های ۳ ساعته)، مقاطع عرضی برداشت‌شده از سد، بیلان آبی، داده‌های مربوط به پارامترهای کیفی آب (مانند دما، اکسیژن محلول و کل مواد جامد محلول) در رودخانه صوفی‌چای و مخزن سد علویان که این داده‌ها از سازمان آب منطقه‌ای و سازمان هواشناسی آذربایجان شرقی جمع‌آوری گردیدند. پس از بررسی داده‌های موجود، بازه زمانی دوساله از اول ژانویه ۲۰۱۶ (۱۱ دی ۱۳۹۴) الی ۳۱ دسامبر ۲۰۱۷ (۱۰ دی ۱۳۹۶) به‌عنوان دوره شبیه‌سازی انتخاب گردید.

با استناد به داده‌های دریافتی، بیشترین دبی ورودی به مخزن مربوط به دو ماه ابتدایی فصل بهار با مقدار متوسط $8/66$ مترمکعب در ثانیه می‌باشد و در بقیه ماه‌های سال متوسط دبی ورودی به مخزن در حدود $0/95$ مترمکعب در ثانیه گزارش گردید. علاوه بر این با توجه به نیاز آبی کشاورزی منطقه، بیشترین برداشت آب از مخزن سد مربوط به فصل بهار و تابستان با مقدار متوسط $5/81$ مترمکعب در ثانیه می‌باشد و در بقیه روزهای سال مقدار دبی خروجی متوسط $0/86$ مترمکعب در ثانیه اندازه‌گیری شد. بر این اساس در پرآب‌ترین و کم‌آب‌ترین حالت در دوره شبیه‌سازی دوساله، عمق متوسط آب در مخزن به ترتیب در حدود 38 و 18 متر گزارش گردید. همچنین طبق اطلاعات هواشناسی، دمای حداکثر، متوسط و حداقل منطقه به ترتیب $38/80$ ، $12/83$ و $-15/80$ درجه سانتی‌گراد در بازه دوساله شبیه‌سازی می‌باشد.

با تکمیل داده‌های ورودی، مدل‌سازی ریاضی مخزن سد علویان در نرم‌افزار CE-QUAL-W2 با پیاده‌سازی هندسه مخزن آغاز می‌شود. بر اساس اطلاعات مربوط به توپوگرافی منطقه (دریافتی از سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی مربوط به عملیات نقشه‌برداری هیدروگرافیک مخزن سد در سال ۱۳۹۴)، مخزن به‌صورت یک پیکره آبی با دو انشعاب شبیه‌سازی گردید که در انشعابات قطعه‌هایی بافاصله‌هایی مابین 50 الی 350 متر (بسته به عرض مقاطع و زوایای مسیر رودخانه در پلان) تعریف شدند. به این ترتیب کل بدنه سد با تعداد 22 قطعه پوشش داده شد (شکل

۲). همچنین برای بررسی دقیق‌تر پارامترهای کیفی آب در راستای عمودی، عمق مخزن به ۶۲ لایه با ضخامت‌های برابر یک متر تقسیم‌بندی گردید.



شکل ۲: قطعه‌بندی سد علویان در نرم‌افزار CE-QUAL-W2.

پس از ورود اطلاعات هندسه مخزن به نرم‌افزار CE-QUAL-W2 و اجرای آن، با استفاده از داده‌های حجم-تراز-سطح مخزن سد علویان کالیبراسیون هندسی مخزن صورت پذیرفت. این بخش در چندین مرحله و با اعمال ضرایب اصلاحی در عرض قطعه‌ها در عمق‌های مختلف انجام گرفت. جهت مقایسه نتایج این بخش، از شاخص‌های آماری میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب نش-ساتکلیف (NS) مطابق روابط زیر استفاده گردید:

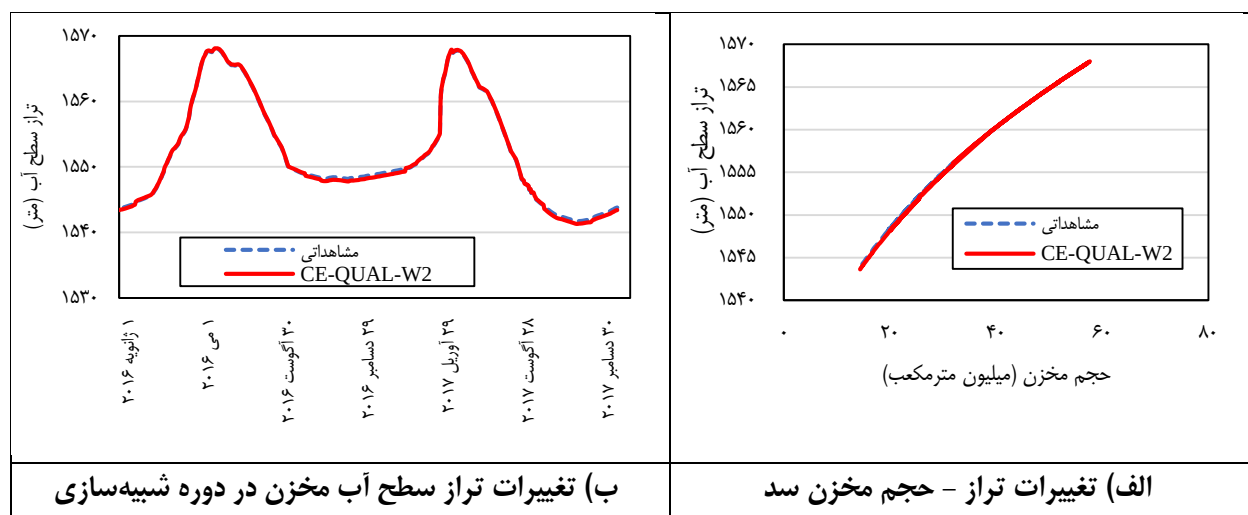
$$AME = \frac{\sum |X_{obs} - X_{comp}|}{N} \quad \text{رابطه ۱:}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{comp})^2}{N}} \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (X_{comp} - X_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (X_{comp} - X_{comp})^2} \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در آن‌ها X_{obs} مقدار مشاهداتی، X_{comp} مقدار محاسباتی و N تعداد نمونه‌های مشاهداتی می‌باشند. بر همین اساس، جهت بررسی صحت نتایج در شکل ۳-الف تغییرات تراز - حجم مخزن سد برای داده‌های مشاهداتی و نتایج مدل ریاضی بعد از کالیبراسیون با مقادیر نهایی MAE ، $RMSE$ و NS به ترتیب $0/632$ ، $0/756$ مترمکعب و $0/997$ نشان داده شده است. پس از این مرحله، نوبت به کالیبراسیون تراز سطح آب مخزن در بازه زمانی دوساله شبیه‌سازی می‌رسد. این مرحله از کالیبراسیون باید بسیار با دقت انجام شود زیرا وارد کردن مقادیر غیرواقعی ضرایب و داده‌ها می‌تواند نتایج شبیه‌سازی رفتار حرارتی و پارامترهای کیفی مخزن را با خطا همراه سازد. در شکل ۳-ب تغییرات تراز سطح آب مخزن سد در بازه زمانی اول ژانویه ۲۰۱۶ (معادل ۱۱ دی ۱۳۹۴) الی ۳۱ دسامبر ۲۰۱۷ (معادل ۱۰ دی ۱۳۹۶) مربوط به نتایج مدل CE-QUAL-W2 و مقادیر مشاهداتی ارائه شده است که MAE ، $RMSE$ و NS این مرحله به ترتیب $0/608$ ، $0/685$ متر و $0/992$ محاسبه گردیدند.

پس از اطمینان از صحت شبیه‌سازی هندسه مخزن سد و تراز سطح آب، مرحله کالیبراسیون و شبیه‌سازی دما به عنوان مهم‌ترین پارامتر مؤثر در مدل‌سازی کیفیت آب مخزن انجام گرفت. داده‌های کیفی اندازه‌گیری شده در مخزن در نقطه‌ای به فاصله $1/723$ کیلومتری از بدنه سد و به صورت ماهانه برداشت شده‌اند. در ابتدا، با توجه به تعدد ضرایب مورد استفاده در نرم‌افزار که در رژیم حرارتی مخزن مؤثر هستند، آنالیز حساسیت روی این ضرایب صورت پذیرفت و میزان تأثیر آن‌ها بر الگوی حرارتی مخزن سنجیده شد. بر اساس نتایج به دست آمده در این مرحله، ضریب پوشش باد، پارامتر دمای رسوب و ضریب جذب نور برای آب خالص بیشترین تأثیر را بر روی پروفیل‌های حرارتی مخزن سد علویان داشتند.

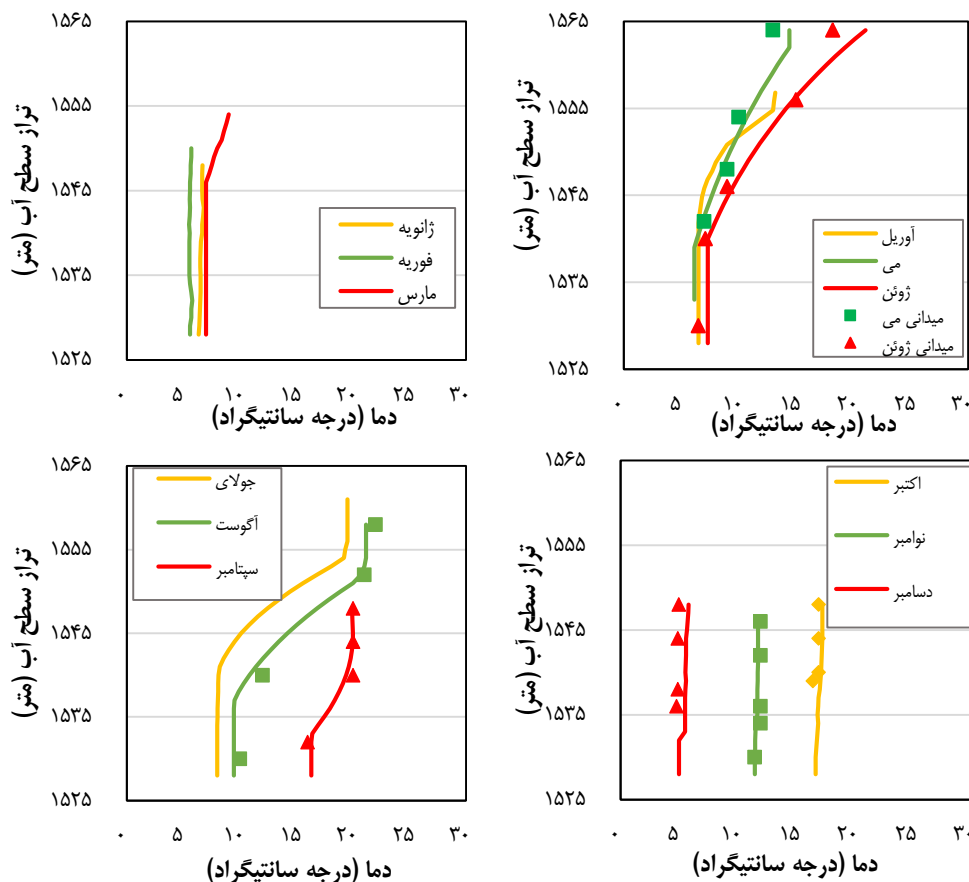


شکل ۳: نتایج کالیبراسیون هندسی مخزن سد علویان.

در نهایت مرحله کالیبراسیون دمایی با مقدار حداکثر MAE و $RMSE$ به ترتیب برابر $1/006$ و $1/084$ درجه سانتی‌گراد به پایان رسید. در شکل ۴ نتایج شبیه‌سازی مدل ریاضی برای الگوی حرارتی آب مخزن در راستای عمودی برای ماه‌های مختلف سال آورده نشان داده شده است که در این نمودارها مقادیر اندازه‌گیری شده دمای آب مخزن در عمق‌های مختلف به صورت نقاط مجزا دیده می‌شود.

با بررسی شکل‌ها می‌توان دید که در فصل زمستان همراه با دمای پایین هوا و عمق کم آب در مخزن، الگوی حرارتی آب در تمامی لایه‌های مخزن به نسبت یکنواخت است. البته در ماه مارس (اسفند) همراه با گرم شدن تدریجی هوا و افزایش تشعشعات خورشیدی، لایه‌های سطحی آب به تدریج افزایش دما خواهند داشت که این روند در فصل بهار شدت می‌یابد. بررسی نمودارهای فصل بهار نشان می‌دهد که از اوایل فصل بهار با شروع بارش‌ها و ذوب برف افزایش قابل توجهی در تراز سطح آب رخ می‌دهد. به طور هم‌زمان، پروفیل دمایی در عمق مخزن شیب بسیار تندی می‌یابد که نشان‌دهنده اختلاف دمایی زیاد آب سطحی با لایه‌های زیرین مخزن است، به طوری که در ماه ژوئن (خرداد) از سطح آب تا عمق ۲۴

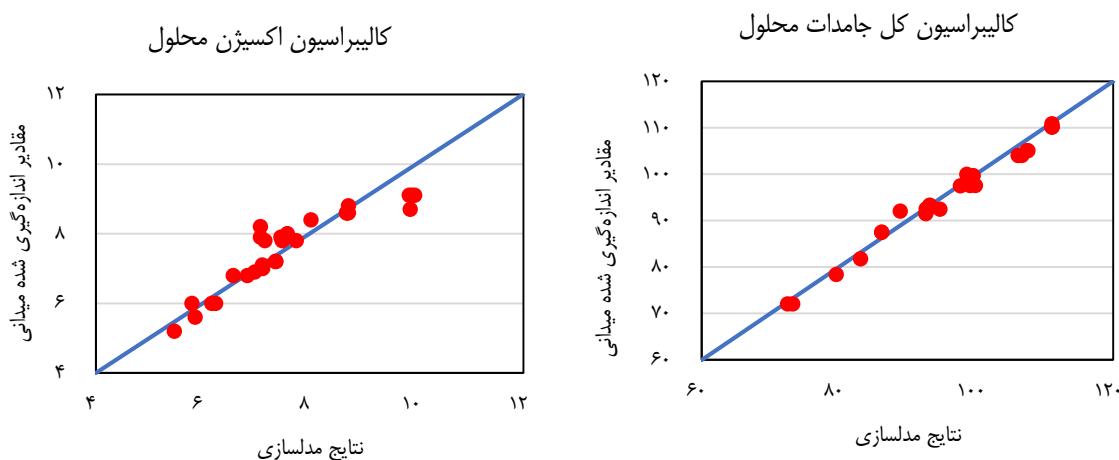
متری اختلاف دمایی حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد دیده می‌شود. در این ماه تشکیل لایه ترموکلاین را می‌توان به‌وضوح دید. با ادامه گرمای هوا در تابستان، در ماه‌های جولای و آگوست (تیر و مرداد) مخزن لایه‌بندی حرارتی را تجربه می‌کند و لایه ترموکلاین با ضخامت حدود ۱۵ متر به‌طور کامل تشکیل می‌شود. باین‌حال در ماه سپتامبر (شهریور) همراه با پایین آمدن تراز سطح آب، تغییر رژیم حرارتی مخزن کاملاً محسوس است که در نتیجه آن اختلاف دمایی شدید لایه‌ها از بین می‌رود. به‌طوری‌که در فصل پاییز با سرد شدن هوا، کاهش دمای آب مخزن نیز دیده می‌شود و در این دوره، لایه‌های آب اختلاف دمای بسیار جزئی حدود یک تا دو درجه سانتی‌گراد را در عمق حدود ۱۸ متر تجربه می‌کنند.



شکل ۴: نمودار تغییرات درجه حرارت نسبت به عمق در مخزن سد علیوان.

در نهایت پس از تعیین الگوی حرارتی مخزن، نوبت به کالیبراسیون و شبیه‌سازی پارامترهای کیفی مخزن سد می‌رسد. اکسیژن محلول در آب را می‌توان به‌عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سلامت آب دانست (Kuo et al., 2007). کاهش غلظت این پارامتر در توده‌های آبی که می‌تواند نشانه‌ای از حضور آلودگی باشد، زندگی ماهیان و دیگر آبیان را دچار تنش می‌نماید (Ji, 2017). یکی دیگر از عوامل کاهش اکسیژن محلول در آب، لایه‌بندی حرارتی مخازن و دریاچه است. نتایج نشان می‌دهند همراه با لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد، طبقه‌بندی پارامترهای کیفی آب نیز به وقوع می‌پیوندد، به‌طوری‌که لایه‌های زیرین نسبت لایه‌های سطحی، غلظت کمتر اکسیژن محلول و غلظت بالاتر املاح را تجربه می‌کنند. در مطالعه حاضر، کالیبراسیون این بخش با استفاده از اطلاعات موجود از سد شامل اندازه‌گیری‌های میدانی پارامترهای اکسیژن محلول و کل مواد جامد محلول در عمق‌های مختلف، صورت پذیرفت که نتایج آن در شکل ۵ ارائه گردیده است. در این شکل محور افقی نتایج حاصل

از مدل‌سازی با نرم‌افزار CE-QUAL-W2 و محور قائم مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی هستند و خط رسم شده بیانگر حالتی است که این مقادیر با یکدیگر برابر باشند. در این مرحله از مطالعات MAE و RMSE برای اکسیژن محلول به ترتیب $0/687$ و $0/782$ میلی‌گرم در لیتر و برای کل مواد جامد محلول به ترتیب $0/536$ و $0/596$ میلی‌گرم در لیتر محاسبه گردیده‌اند.

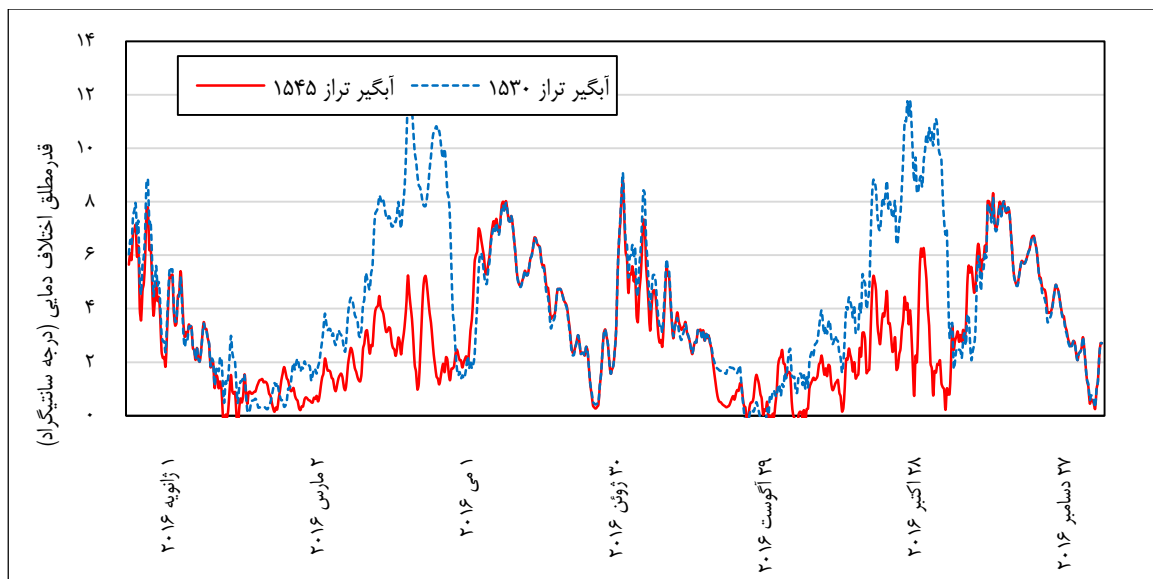


شکل ۵: نتایج کالیبراسیون غلظت اکسیژن محلول و کل مواد جامد محلول

(در هر دو نمودار محور افقی نتایج مدل ریاضی CE-QUAL-W2 و محور قائم مقادیر اندازه‌گیری شده میدانی برحسب میلی‌گرم بر لیتر هستند)

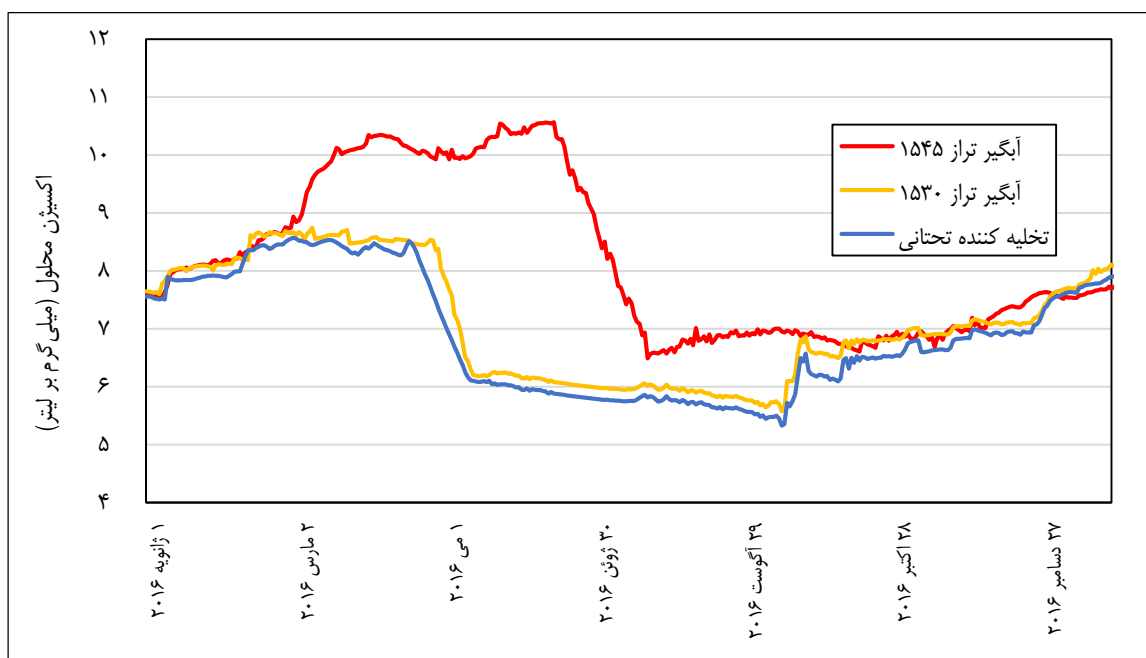
نتایج

برای مخزن سد علویان دو آبگیر در ترازهای 1530 و 1545 متر و یک تخلیه کننده در تراز 1525 تعبیه شده است که بسته به فصول مختلف سال و تراز سطح آب در مخزن خروج آب از سیستم توسط این تأسیسات انجام می‌شود. در نتیجه در این بخش از مطالعات تمرکز بر روی بررسی و پیش‌بینی کیفیت آب در ترازهای خروج آب از سد قرار گرفت. یکی از مهم‌ترین اثرات زیست‌محیطی احداث سدها، برهم خوردن شرایط طبیعی رودخانه در پایین‌دست است که می‌تواند باعث وارد شدن آسیب به اکوسیستم آبی منطقه گردد. یکی از دلایل این پدیده، وقوع لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد و به دنبال آن ایجاد اختلاف دمایی میان آب تخلیه شده از دریچه‌های خروجی سد با آب رودخانه پایین‌دست است که می‌تواند باعث ایجاد شوک حرارتی برای آبزیان گردد. با استناد به "استاندارد کیفیت آب‌های سطحی کشور (۱۳۹۵)" برای حفاظت اکوسیستم‌های آبی، می‌بایست در هنگام تخلیه جریان‌ها به داخل رودخانه‌ها از اختلاف دمایی شدید جلوگیری نمود. در واقع اختلاف درجه حرارت در پایین‌دست نقطه تخلیه آلودگی حرارتی (در مرز ناحیه اختلاط) با بالادست آن نباید بیش از مقادیر مجاز اعلام شده باشد. این مقادیر برای اکوسیستم‌های مناسب برای ماهیان سرد آبی و ماهیان گرماب به ترتیب برابر $1/5$ و 3 درجه سانتی‌گراد ذکر شده است. به همین منظور اختلاف دمایی آب برداشتی از لایه‌های مختلف آبگیری (آبگیر تراز 1545 و تراز 1530) و دمای آب رودخانه پایین‌دست محاسبه گردید. در شکل ۶ قدر مطلق اختلاف دمای آب‌ترازهای تخلیه آب سد و دمای آب رودخانه صوفی‌چای در پایین‌دست سد علویان در بازه دوساله شبیه‌سازی (اول ژانویه 2016 الی 31 دسامبر 2017) ارائه شده است.



شکل ۶: اختلاف دمایی آب لایه‌های مختلف مخزن سد و رودخانه پایین دست در بازه دوساله شبیه‌سازی.

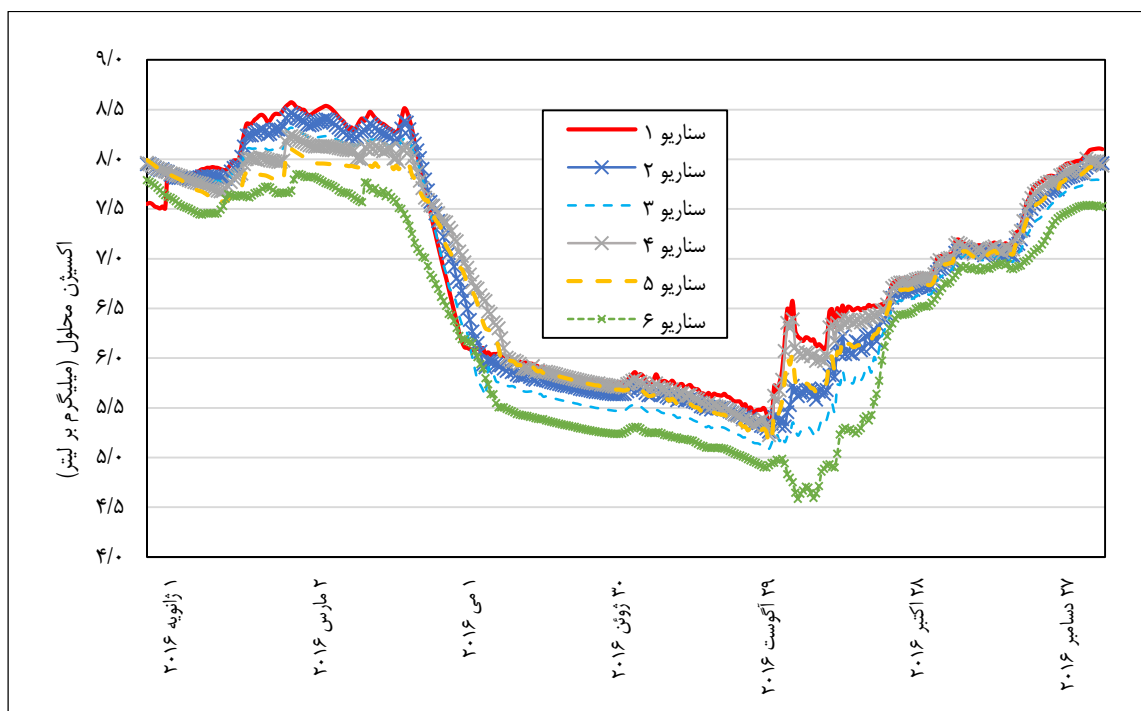
با بررسی الگوی حرارتی مخزن سد علویان و همچنین تغییرات اکسیژن محلول در آب مشخص شد که در طی ماه‌های تیر و مرداد طبقه‌بندی قوی در آب رخ می‌دهد که می‌تواند باعث کاهش مقدار اکسیژن محلول تا میزان حدود ۵/۳ میلی گرم در لیتر در عمیق‌ترین بخش مخزن گردد که این مقدار بسیار نزدیک به تشکیل شرایط بی‌هوازی در عمق مخزن و افت سطح کیفی آب می‌باشد. بر این اساس، ضروری است احتمال بروز وضعیت بی‌هوازی در اعماق مخزن در صورت استمرار وضعیت حاضر و یا در شرایط تغییرات در میزان آلودگی و شرایط اقلیمی منطقه مورد بررسی قرار گیرد. به همین دلیل در ادامه تحقیق، تمرکز بر پیش‌بینی شرایط کیفی مخزن در ۵ سال بعد از بازه شبیه‌سازی یعنی سال ۲۰۲۱ (سال ۱۴۰۰) قرار گرفت.



شکل ۷: تغییرات مقدار اکسیژن محلول آب مخزن در ترازهای مختلف در سال ۲۰۱۶.

به همین منظور سناریوهایی جهت بررسی میزان تأثیر تغییرات شرایط اقلیمی منطقه (افزایش دما) و آلودگی رودخانه بالادست (تغییرات اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن) بر کیفیت آب مخزن سد علویان طراحی گردید. این سناریوها شامل (۱) سناریوی نرمال (ادامه شرایط فعلی از نظر اکسیژن محلول و دمای هوا تا سال ۲۰۲۱)، (۲) افزایش ۱۰ درصدی دمای هوا؛ (۳) افزایش ۲۰ درصدی دمای هوا؛ (۴) کاهش ۱۰ درصدی اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن؛ (۵) کاهش ۲۰ درصدی اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن و (۶) افزایش ۱۰ درصدی دمای هوا و هم‌زمان کاهش ۱۰ درصدی اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن می‌باشند.

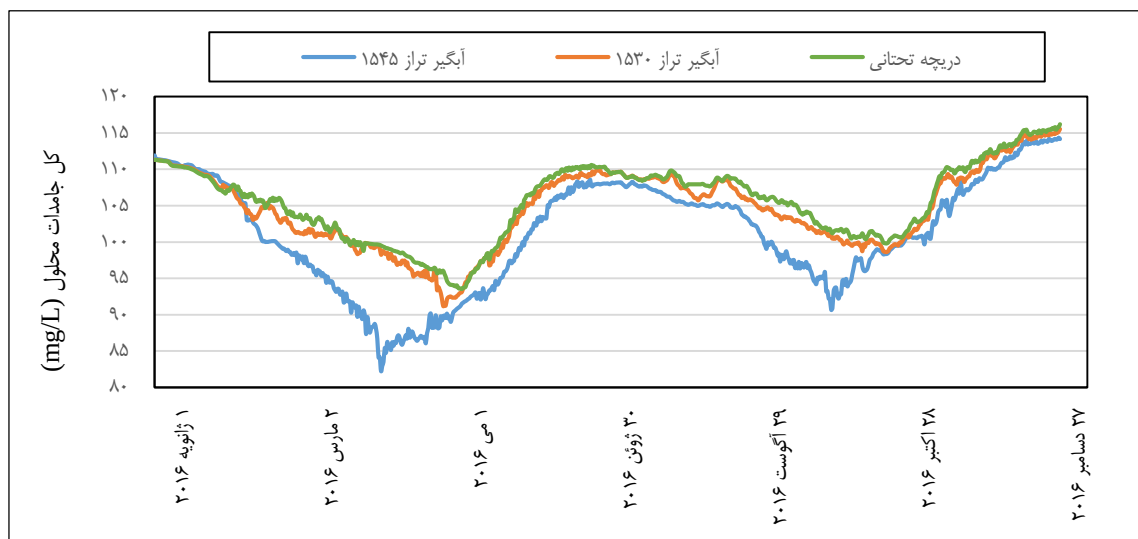
در شکل ۸ تغییرات میزان اکسیژن محلول در لایه زیرین مخزن در سال ۲۰۲۱ به ازای سناریوهای مختلف ارائه شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی ریاضی، شدیدترین افت اکسیژن محلول مربوط به سناریوی شماره ۶ (افزایش ۱۰ درصدی دما هم‌زمان با کاهش ۱۰ درصدی اکسیژن محلول آب ورودی به مخزن سد) می‌باشد. در این شرایط به‌طور متوسط نسبت به سناریوی نرمال (استمرار وضعیت حاضر) ۱۰/۶۳ درصد کاهش اکسیژن رخ می‌دهد که در ماه سپتامبر غلظت اکسیژن محلول را به حدود ۴/۴ میلی‌گرم در لیتر می‌رساند. با توجه به این که در این ماه به دلیل افت شدید تراز سطح آب، آبگیری معمولاً از خروجی تراز ۱۵۳۰ متری انجام می‌شود، این افت کیفیت آب هزینه بالایی را به واحدهای تصفیه‌خانه تحمیل می‌نماید. نکته قابل‌توجه این است که در فصل زمستان و اوایل بهار سناریو شماره ۵ (کاهش ۲۰ درصدی اکسیژن محلول جریان ورودی) بیشترین تأثیر را در کاهش غلظت اکسیژن داشته است و باعث کاهش ۴/۴۳ درصدی متوسط غلظت می‌گردد. درحالی‌که در بقیه فصول تأثیر سناریو ۳ (افزایش ۲۰ درصدی دما) بارزتر می‌باشد و به‌طور متوسط ۸/۷۹ درصد غلظت را کاهش می‌دهد.



شکل ۸: پیش‌بینی مقدار اکسیژن محلول آب لایه زیرین مخزن ازای سناریوهای مختلف در سال ۲۰۲۱.

در شکل ۹ نمودار تغییرات کل جامدات محلول برای دوره شبیه‌سازی دوساله نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، در فصل‌های بهار و تابستان مقدار این شاخص در لایه‌های بالایی کمتر از لایه‌های زیرین مخزن بوده و این اختلاف در حدود ماه اکتبر به دلیل چرخش آب از بین می‌رود. با توجه به که در استاندارد کیفیت آب ایران، معیار مشخصی برای کل جامدات محلول ذکر نشده است، نیاز به

جایگزینی معیار دیگری برای کنترل این شاخص کیفی می‌باشد. یکی از این معیارها هدایت الکتریکی می‌باشد که با استناد به نتایج مطالعه (Rusydi, 2008) می‌توان ارتباط معناداری میان هدایت الکتریکی آب و کل مواد جامد محلول برقرار نمود. به این ترتیب، داده‌های اندازه‌گیری شده پارامترهای هدایت الکتریکی آب و کل مواد جامد محلول در رودخانه بالادست جهت استخراج رابطه میان آن‌ها موردسجش قرار گرفتند و در نهایت رابطه توانی $TDS=0.705(EC)^{0.983}$ (با مقدار تقریبی $R^2=0.973$) به عنوان بهترین رابطه برآزش داده شده بین این دو شاخص انتخاب گردید. در رابطه فوق EC ، ضریب هدایت الکتریکی (برحسب میکرو زیمنس بر سانتی متر) و TDS کل مواد جامد محلول در آب (برحسب میلی گرم در لیتر) می‌باشند. به این ترتیب، مقادیر محاسباتی TDS در مخزن برای دوره دوساله، به دست آمده از نرم افزار CE-QUAL-W2 به EC تبدیل شد و به این ترتیب حداکثر مقدار EC در مخزن برای کل اعماق مخزن در دوره شبیه سازی دوساله برابر $۲۶۸/۳۲$ میکرو زیمنس بر سانتی متر محاسبه گردید.



شکل ۹: نمودار تغییرات مواد جامد محلول در تراز آبگیرها و تخلیه کننده مخزن سد در بازه دوساله شبیه سازی.

بحث و نتیجه گیری

در تحقیق حاضر الگوی حرارتی و کیفیت آب مخزن سد علویان با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2 صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهد، این مخزن در طول سال یک چرخه دمایی مشخص را تجربه می‌کند. به عبارت دیگر تقریباً در نیمی از سال یعنی در دو فصل بهار و تابستان لایه‌های سطحی و زیرین آب اختلاف دمایی قابل توجهی دارند که این موضوع در تابستان به اوج خود (در حدود $۱۶/۱۰$ درجه سانتی گراد) می‌رسد که دلیل این اختلاف را می‌توان با وقوع لایه بندی حرارتی تابستانه مرتبط دانست. به مرور با سرد شدن هوا در پاییز همه لایه‌ها کاهش دما را تجربه می‌کنند و اختلاف دمایی بین لایه‌ها نیز از بین می‌رود و در کل عمق مخزن دمای تقریباً یکسانی مشاهده می‌شود. در ادامه در روزهای آخر سال و نزدیک شدن به فصل بهار، مجدد اختلاف دمایی لایه‌های سطحی با لایه‌های زیرین آغاز می‌گردد. بر این اساس مخزن سد علویان در رده دریاچه‌های مونومیکتیک قرار می‌گیرد که با توجه به شرایط جغرافیایی منطقه و ایران، نتایج مشابهی توسط دیگر محققین برای سایر سدهای کشور به دست آمده است. نتایج مطالعات بر روی مخزن سد پانزده خرداد (خواجیه پور و همکاران، ۱۳۹۴)، مخزن سد ماملو (Sabeti and Jamali, 2017)، مخزن سد کارون ۳ (طلا کش و همکاران، ۱۳۹۸)، مخزن سد کرخه (Yoosef Doost et al., 2020)، مخزن سد

امیرکبیر (Arefinia et al., 2020) نشان می‌دهد تمامی این مخازن یک دوره لایه‌بندی حرارتی که بسته به موقعیت جغرافیایی و شرایط توپوگرافی مخزن و وضعیت اقلیمی منطقه می‌تواند از اواخر بهار تا اوایل پاییز متغیر باشد، تجربه می‌کنند و پس‌از آن اختلاط کامل رخ می‌دهد. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی کیفی نشان می‌دهند که تغییرات دما در توده‌های آبی و وقوع لایه‌بندی دمایی در مخزن می‌تواند بر دیگر پارامترهای کیفی آب تأثیرگذار باشد. به عبارت دیگر عدم وقوع چرخش آب در این شرایط، امکان اختلاط آب لایه سطحی با اکسیژن بالاتر با آب لایه‌های زیرین را ایجاد نمی‌کند و می‌تواند این ناحیه را به منطقه بی‌هوای تبدیل نماید. بر اساس بررسی‌های به عمل آمده لایه‌بندی حرارتی قوی در حدفاصل اواسط خرداد الی اواسط شهریور موجب ایجاد تغییرات در شرایط فیزیکی و شیمیایی و بیولوژیکی مخزن می‌گردد. در این دوره مشخص، در لایه زیرین مخزن (باضخامتی در حدود ۱۰ متر) سطح اکسیژن نزدیک ۵/۰ میلی گرم در لیتر خواهد رسید که بسیار نزدیک به شرایط بی‌هوای است. در این شرایط، کیفیت آب به دلیل تجمع املاح و رسوبات، ایجاد شرایط بی‌هوای و در نتیجه تولید ترکیبات مولد بو و طعم نامطبوع، نامناسب اعلام می‌گردد. کیانی صدر (۱۳۹۶) در نتایج تحقیقات خود بر روی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد گرشا، اعلام نمود در فصل تابستان پایین‌ترین مقدار اکسیژن محلول در اعماق مخزن و در نزدیکی بدنه سد رخ می‌دهد که دلیل آن را با طبقه‌بندی دمایی مرتبط دانستند. صالحی و همکاران (۱۳۹۸) با شبیه‌سازی وضعیت کیفی مخزن سد مهاباد به این نتیجه رسیدند که از اواسط تابستان تا اواسط پاییز در لایه‌های زیرین شرایط بی‌هوای ایجاد می‌شود که به دنبال آن بوی بد، طعم و رنگ نامطلوب آب انتظار می‌رود. بنابراین پیشنهاد دادند در طول دوران لایه‌بندی، آب خروجی از سد هوادهی گردد.

در ادامه، بررسی نتایج شبیه‌سازی کیفی مخزن سد علویان بیانگر افزایش اکسیژن محلول در اواخر زمستان و اوایل بهار است که می‌تواند نشان‌دهنده چرخش آب در عمق مخزن باشد. این چرخش موجب جابه‌جایی آب لایه سطحی با اکسیژن بیشتر با آب لایه‌های زیرین که معمولاً غلظت اکسیژن در آن‌ها به شدت افت کرده است، می‌گردد. Saeidi و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعاتی مشابه بر روی سد شهید رجایی شکست لایه‌بندی حرارتی در زمستان را مهم‌ترین عامل افزایش غلظت اکسیژن محلول در این دوره اعلام کردند.

به دلیل نگرانی ایجادشده از بابت پایین بودن غلظت اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن سد علویان در فصل گرم سال، پیش‌بینی وضعیت مخزن در سال ۲۰۲۱ با سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و تغییر در سطح اکسیژن محلول آب رودخانه صوفی‌چای هدف قرار گرفت. نتایج این مرحله بیانگر کاهش مقدار اکسیژن محلول تا مقدار ۴/۴ میلی گرم در لیتر در سناریو مربوط به شرایط ۱۰ درصد افزایش دمای محیط و ۱۰ درصد کاهش اکسیژن محلول آب ورودی به سد می‌باشد. در نتایجی مشابه Morales-Marin و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقات خود تغییرات در ساختار دمای آب دریاچه Diefenbaker را بیشتر به تغییر شرایط هواشناسی و افزایش دمای هوا در آینده مربوط دانستند. بر این اساس تدوین راهکارهای مدیریت کیفی آب در بالادست مخزن سد علویان جهت مقابله با وقوع شرایط بی‌هوای در مخزن ضروری به نظر می‌رسد.

همچنین نتایج نشان می‌دهد که در محدوده ماه‌های ژوئن الی آگوست (میانه خرداد تا میانه شهریور) متوسط اختلاف دمای آب گرم‌تر در رودخانه پایین‌دست و آب سردتر لایه‌های زیرین مخزن در حدود ۶/۴ درجه سانتی‌گراد است که به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از مقادیر مجاز استاندارد جهت حفظ اکوسیستم پایین‌دست می‌باشد و این موضوع بسیار قابل‌تأمل است. البته می‌بایست توجه داشت که پارامترهای متعددی مانند میزان دبی آب خروجی از مخزن، انتقال آب از طریق تونل‌ها و سرریزها، دمای محیط مجاور، دبی آب رودخانه در فصول کم‌آبی و دیگر شرایط اقلیمی و محیطی می‌توانند بر این اختلاف دمایی اثرگذار باشند. بحث اختلاف دمایی ناشی از تخلیه آب مخازن سدها در مطالعات He و همکاران (۲۰۲۰) موردتوجه قرار گرفت. ایشان اعلام نمودند در رودخانه یانگ‌تسه در چین دمای آب تخلیه‌شده مخزن در بهار و تابستان ۲ تا ۵ درجه سانتی‌گراد کمتر از دمای رودخانه پایین‌دست است. بدین ترتیب نسبت به تغییرات در رژیم حرارتی و شرایط زیستگاه و جوامع بیولوژیکی رودخانه هشدار دادند. قابل‌ذکر است که رودخانه صوفی‌چای جزو رودخانه‌های دائمی کشور می‌باشد و در اغلب فصل‌های سال آب در آن جاری است و به همین دلیل این رودخانه به‌عنوان یک زیستگاه مناسب برای انواع آبزیان و ماهیان شناخته می‌شود. در اکوسیستم طبیعی رودخانه گونه‌های مختلفی از آبزیان و ماهیان آب شیرین شناسایی شده‌اند. قاسمی و رامین (۱۳۹۱) با مطالعه تنوع ماهیان رودخانه‌های حوضه شرق دریاچه ارومیه، حضور سه گونه

ماهی *Barbus lacerta ciyeri*, *Chalcalburnus atropatenae* و *Oxyngoemacheilus angorae* را در رودخانه صوفی چای تأیید نمودند. بنابراین ضروری است با شناسایی دقیق تر اکوسیستم آبی پایین دست سد و مطالعه بیشتر بر روی ماهیان موجود در آن و شناخت حساسیت های زیستی آنها، مطالعات جامع تری در این زمینه انجام گیرد تا با مدیریت صحیح تخلیه آب در پایین دست، مانع از وارد شدن آسیب به اکوسیستم آبی رودخانه صوفی چای شد.

نتایج به دست آمده از تحقیق حاضر نشان می دهد در دوره دوساله شبیه سازی مقدار کل جامدات محلول و هدایت الکتریکی آب به این ترتیب از ۱۱۶/۲۰ میلی گرم در لیتر و ۲۶۸/۳۲ میکرو زیمنس بر سانتی متر تجاوز نمی کنند. با توجه به این که در استاندارد کیفیت آب ایران مقدار هدایت الکتریکی مجاز برای آب مورد استفاده در بخش صنعت و کشاورزی کمتر از ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ میکرو زیمنس بر سانتی متر اعلام شده است، تفاوت زیادی میان مقادیر محاسباتی این شاخص در مخزن سد با مقادیر مجاز ذکر شده در استاندارد دیده می شود. این موضوع بیانگر مقادیر پایین کل مواد جامد محلول در مخزن سد می باشد که دلیل اصلی آن را می توان به پایین بودن مقدار این شاخص در رودخانه صوفی چای به عنوان ورودی مخزن سد مرتبط دانست. مشابه این نتیجه را صالحی و همکاران (۱۳۹۸) برای سد مهاباد مشاهده نمودند که با وجود افزایش مقدار TDS با عمق مخزن در هیچ فصلی مقدار آن از ۱۸۰ میلی گرم بر لیتر تجاوز نکرد. این در حالی است که حیدر زاده و نیسانی (۱۳۹۸) مقدار کل جامدات محلول سد میمه را حداقل ۴۰۰ و حداکثر ۷۷۳۳ میلی گرم بر لیتر اعلام نمودند که از حد مجاز تعیین شده توسط استانداردها برای استفاده کشاورزی بالاتر می باشد. ایشان دلیل این افزایش را کاهش دبی جریان ورودی به مخزن و افزایش TDS ورودی عنوان نمودند. بنابراین می توان نتیجه گرفت مقدار TDS آب های ورودی به سد که از حوضه های آبریز جمع آوری می شوند می تواند نقش مهمی در کیفیت آب مخازن داشته باشد.

منابع

- استاندارد کیفیت آب های ایران، ۱۳۹۵. سازمان حفاظت محیط زیست ایران.
- حیدر زاده، ن. و نیسانی تبریزی، ن.، ۱۳۹۸. مدل سازی و تحلیل حساسیت کیفیت آب خروجی مخزن سد میمه با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2. علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۱ (۵): صفحات ۴۷-۶۴.
- خواجه پور، م. ا.، اقبال زاده، ا.، افتخاری، م. و جوان، م.، ۱۳۹۴. شبیه سازی عددی لایه بندی حرارتی در مخزن سد پانزده خرداد. مجله پژوهش آب ایران، ۹ (۱): صفحات ۱۷-۱۳.
- صالحی، م.، خانی تملیه، ذ.، پرچی، ن. و احمد پور، ظ.، ۱۳۹۸. مدل سازی عددی لایه بندی حرارتی و کیفیت آب مخزن سد با استفاده از مدل کیفی CE-QUAL-W2. نشریه پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۶ (۴): ۵۳-۷۳.
- طلاکش، ش.، فتاحی، ر.، صمدی، ح.، میرعباسی، ر. و خواجه پور، ا.، ۱۳۹۸. بررسی لایه بندی حرارتی و اکسیژن محلول در مخزن یک سد بزرگ (مطالعه موردی سد کارون ۳). مجله پژوهش آب ایران، ۱۳ (۱): صفحات ۵۷-۴۹.
- قاسمی، ح. و رامین، م.، ۱۳۹۱. مطالعه تنوع و غنای گونه های ماهیان رودخانه های حوضه شرق دریاچه ارومیه. مجله علمی شیلات ایران، ۲۱ (۴): صفحات ۷۳-۶۷.
- کیانی صدر، م.، ۱۳۹۶. شبیه سازی لایه بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول با کاربرد مدل CE-QUAL-W2 (مطالعه موردی: سد گرشا). فصلنامه علمی پژوهشی اکوبیولوژی تالاب، ۹ (۲۳): صفحات ۵۲-۳۹.

Arefinia, A., Bozorg-Haddad, O., Oliazadeh, A. and Loáiciga, H., 2020. Reservoir water quality simulation with data mining models. Environmental Monitoring Assessment, 192:482.

Berger, C. J., Wells, S. A. and Annear, R., 2005. Laurence Lake Temperature Model. Maseeh College of Engineering and Computer Science Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, Oregon.

Boehrer, B. and Schultze, M., 2008. Stratification of lakes. Reviews of Geophysics. 46(2): 1-27.

- Carr, M. K., Sadeghian, A., Lindenschmidt, K., Rinke, K. and Morales-Marin, L., 2019.** Impacts of Varying Dam Outflow Elevations on Water Temperature, Dissolved Oxygen, and Nutrient Distributions in a Large Prairie Reservoir. *Environmental Engineering Science*, 37(1): 1-20.
- Cole, T. M. and Wells, S. A., 2008.** CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6. Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR.
- He, T., Deng, Y., Tuo, Y., Yang, Y. and Liang, N., 2020.** Impact of the Dam Construction on the Downstream Thermal Conditions of the Yangtze River. *International journal of environmental research and public health*, 17(8), 2973.
- Ji, Z. G., 2017,** *Hydrodynamics and Water Quality Modeling Rivers, Lakes, and Estuaries*, Wiley.
- Jin, K. R. and Ji, Z. G., 2004.** Case study: modeling of sediment transport and wind-wave impact in Lake Okeechobee. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(11): 1055–67.
- Kuo, J. T., Hsieh, M. H., Lung, W. S., and She, N., 2007.** Using artificial neural network for reservoir eutrophication prediction. *Ecological modelling*, 200(1-2): 171-177.
- Lindenschmidt, K. E., Carr, M. K., Sadeghian, A. and Morales-Marin, L., 2019.** CE-QUAL-W2 model of dam outflow elevation impact on temperature, dissolved oxygen and nutrients in a reservoir. *Scientific Data*, 6(1): 1–7.
- Ma, S., Kassinos, S. C., Fatta-Kassinos, D. and Akylas, E., 2008.** Effects of Selective Withdrawal Schemes on Thermal Stratification in Kouris Dam in Cyprus. *Lakes and Reservoirs Management*, 13(1): 51-61.
- Morales-Marin, L. A., Carr, M., Sadeghian, A. and Lindenschmidt, K. E., 2021.** Climate change effects on the thermal stratification of Lake Diefenbaker, a large multi-purpose reservoir. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, 46(1-2): 1-16.
- NALMS, 2001.** *Managing Lakes and Reservoirs*. 3rd Edition, 841-B-01-006, Madison, WI.
- Neissi, L., Tishehzan, P. and Albaji, M., 2019.** Chemical Assessment of Surface Water Quality in Upstream and Downstream of Jare Dam, Khuzestan, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 78(3).
- Rusydi, A. F., 2017.** Correlation between Conductivity and Total Dissolved Solid in Various Type of Water: A Review. *Earth and Environmental Science*, 118: 12-19.
- 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 and Applied Science Research*, 7(3): 1664-1669.
- Saeidi, P., Mehrdadi, N., Ardesani, M. and Baghvand, A., 2014.** Simulation of thermal Stratification and Dissolved Oxygen Concentrations Using CE-QUAL-W2 Model (Case Study: Shahid Rajaee Dam). *Journal of Environmental Studies*, 39(4): 171-180.
- Yoosef Doost, A., Karrabi, M., Rezazadeh, N. and Mirabi, M., 2020.** Development of the delta-normal stress combining CE-QUAL-W2 as a novel method for spatio-temporal monitoring of water quality in Karkheh Dam Reservoir. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192: 1–13.