

بررسی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در مخزن یک سد بزرگ (مطالعه موردی سد کارون ۳)

شیرین‌السادات طلاکش^{۱*}، روح‌الله فتاحی نافچی^۲، حسین صمدی بروجنی^۳، رسول میرعباسی نجف‌آبادی^۴ و
ابراهیم خواجه‌پور^۵

چکیده

در این جستار، کیفیت آب مخزن سد کارون ۳ واقع در استان خوزستان با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 که یک نرم‌افزار کارآمد در زمینه تحلیل و آنالیز کیفی آب مخازن و دریاچه‌ها است، بررسی شد. براساس نتایج به‌دست آمده مخزن سد کارون ۳ در اوایل اسفند دچار اختلاط کامل می‌شود و دارای یک لایه‌بندی قوی تابستانه است که از فروردین‌ماه شروع می‌شود و در اواخر تیرماه به اوج خود می‌رسد. بعد از آن با کاهش تشعشعات ورودی به مخزن لایه‌بندی شکل گرفته به تدریج حذف و پیکره آب دریاچه به سمت اختلاط پیش می‌رود و چون دمای آب در این مخزن، هیچ‌گاه به کمتر از ۴ درجه سانتی‌گراد نمی‌رسد؛ لذا لایه‌بندی حرارتی معکوس قابل ملاحظه نیست و مخزن را می‌توان در طول زمستان با اختلاط کامل در نظر گرفت. تغییرات اکسیژن محلول نیز سیر نزولی این پارامتر را نسبت به عمق نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که در شهریورماه مقدار اکسیژن محلول از ۷/۰۷ میلی‌گرم بر لیتر به ۴/۳۷ میلی‌گرم بر لیتر می‌رسد. این سیر نزولی از فروردین‌ماه شروع می‌شود و با گرم شدن آب و هوا شدت بیشتری می‌یابد. این وضعیت در نهایت باعث تولید رنگ و بوی نامطبوعی در مخزن می‌شود.

واژه‌های کلیدی: سد کارون ۳، لایه‌بندی حرارتی، لایه‌بندی شیمیایی، CE-QUAL-W2.

ارجاع: طلاکش ش. فتاحی نافچی ر. صمدی بروجنی ح. میرعباسی نجف‌آبادی ر. و خواجه‌پور ا. ۱۳۹۸. بررسی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در مخزن یک سد بزرگ (مطالعه موردی سد کارون ۳). مجله پژوهش آب ایران. ۳۲: ۴۹-۵۷.

۱- دانشجوی ارشد مهندسی کشاورزی - آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۴- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد.

۵- فارغ‌التحصیل مهندسی عمران - آب، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه.

* نویسنده مسئول: shirinnirihs@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۱/۱۰

مقدمه

در فصل پاییز با کاهش دمای هوا، اپیلمنیون سردتر می‌شود و به حدی می‌رسد که جرم حجمی آن بیش از لایه هیپولیمنیون می‌شود که این امر باعث اختلاط آب مخزن می‌شود. در مناطق با آب و هوای سرد، علاوه بر پدیده‌های فوق، پدیده لایه‌بندی در زمستان و پدیده چرخش در بهار نیز انجام می‌پذیرد. به این ترتیب دریاچه‌هایی که در آب و هوای معتدل قرار دارند، حداقل دارای یک سیکل لایه‌بندی و اختلاط هستند. وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد، عامل و بیانگر تغییرات کیفیت فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب در ترازهای مختلف است که در صورت تداوم، می‌تواند منجر به نامناسب شدن شرایط کیفی آب در مخزن شود (کرمانی و ناصری، ۱۳۸۱؛ فورد و تورنتون، ۱۹۷۹). دمای آب روی نوع و میزان فعالیت گونه‌های بیولوژیکی، انحلال گازها، سرعت واکنش‌های شیمیایی و سرعت رسوب‌گذاری تأثیر می‌گذارد؛ به گونه‌ای که به ازای افزایش دما به اندازه ۱۰ درجه سانتی‌گراد، سرعت واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی دو برابر می‌شود. در فصل تابستان به علت بالا بودن درجه حرارت و شدت تابش نور خورشید، رشد جلبک‌ها در لایه‌های سطحی به شدت افزایش می‌یابد که این امر، می‌تواند کیفیت آب را از نظر رنگ، بو و طعم دچار تغییرات زیادی کند و از طرف دیگر، به دلیل کاهش انحلال اکسیژن در آب و همچنین زیاد شدن سرعت فعالیت‌های متابولیسمی آبزیان و تجزیه مواد تجمع یافته در رسوبات، شرایط در ترازهای عمقی آب می‌تواند کاملاً بی‌هواری شده و منجر به تشکیل ترکیبات مولد بو یا طعم نامطبوع شود (توحیدی، ۱۳۷۷).

در دو دهه گذشته، استفاده از مدل‌های ریاضی برای شبیه‌سازی اکولوژیکی و واکنش‌های مؤثر بر کیفیت آب در منابع آب‌های سطحی رواج یافته است. در بین این مدل‌ها، مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به دلایل مختلف مانند دقت محاسباتی بالا، در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای مختلف آب و هوایی و قابلیت بررسی تأثیر روند تغییرات آن‌ها بر ویژگی‌های کیفی آب، کاربرد وسیعی را در بررسی و پیش‌بینی ویژگی‌های کیفی آب دریاچه‌ها و مخازن سدها پیدا کرده است (توماس و اسکات، ۲۰۱۴).

ظهوره‌وند و همکاران (۱۳۹۰) پدیده لایه‌بندی مخزن سد ماملو را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 برای سال

ویژگی‌های طبیعی حوزه آبخیز، کمیت و کیفیت آب‌های ورودی به مخزن، ویژگی‌های اقلیمی منطقه (درجه حرارت، وزش باد، میزان نزولات جوی و ...) و میزان فعالیت‌های مختلف انسان در حوزه آبخیز، از جمله عواملی هستند که کیفیت آب مخازن سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از طرف دیگر، احداث سد و ذخیره کردن جریان سطحی، خود می‌تواند به سبب عواملی مانند تبخیر، ساکن بودن آب، لایه‌بندی حرارتی در مخزن، رسوب‌گذاری، غنی شدن آب دریاچه از عناصر شیمیایی و ... موجب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب مخزن شود (کرمانی و ناصری، ۱۳۸۱). از جمله عوامل بسیار مهمی که ویژگی‌های آب دریاچه و مخازن سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لایه‌بندی حرارتی است که در اواخر بهار و طی تابستان در مخازن عمیق اتفاق می‌افتد. در این شرایط معمولاً سه لایه با میانگین‌های حرارتی مختلف به شرح زیر ایجاد می‌شود (کرمانی و ناصری، ۱۳۸۱؛ رینولدز، ۱۹۹۲):

- لایه بالایی یا اپیلمنیون^۱ که مشخصه آن آب گرم‌تر با شوری و دانسیته کمتر و اختلاط عمقی بالا است. این لایه، یک لایه نازک و به طور کلی یک لایه یکنواخت از نظر شوری، درجه حرارت و دانسیته است. در این لایه گردش و حرکت آب به وسیله باد تولید و به همین دلیل به خوبی اکسیژن‌دهی می‌شود.
- لایه پایینی یا هیپولیمنیون^۲ که مشخصه آن آب سردتر، شورتر و با دانسیته بیشتر است. این لایه گرادیان دانسیته کمی دارد و در آن اختلاط و اکسیژن‌گیری وجود ندارد.
- لایه وسط یا متالیمنیون^۳ که صفحه ترموکلاین در آن قرار دارد. این لایه، منطقه بین دو لایه بالایی و پایینی را تشکیل می‌دهد. از مشخصه‌های این لایه عمق کم و گرادیان زیاد دانسیته و درجه حرارت است. اکسیژن محلول این ناحیه کمتر از لایه اپیلمنیون است.

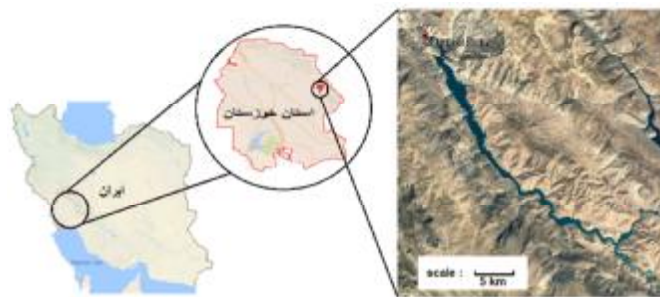
1- Epilimnion
2- Hypolimnion
3- Metalimnion

منسون در مخزن، میان لایه به دو قسمت تقسیم می‌شود که یک قسمت تغییرات یکنواخت و قسمت دیگر گرادیان تغییرات زیادی دارد. خسروی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد شیرین‌دره را در یک دوره سیزده ماهه شبیه‌سازی کردند و نشان دادند که مخزن سد شیرین‌دره دارای یک دوره لایه‌بندی حرارتی ۶ ماهه است که از ابتدای بهار به مرور آغاز می‌شود؛ در تابستان به شدیدترین حالت خود می‌رسد و در اواسط آبان‌ماه تقریباً شرایط اختلاط کامل در مخزن حاکم می‌شود.

مواد و روش‌ها

سد کارون ۳ به مختصات جغرافیایی $31/8$ درجه شمالی و $50/093$ درجه شرقی، از جمله سدهای بتنی دوقوسی ایران است که روی رودخانه کارون در جنوب غربی ایران احداث شده است. ساختگاه سد و نیروگاه کارون ۳، در فاصله ۶۱۰ کیلومتری مصب رودخانه کارون در شمال شرقی استان خوزستان است. ارتفاع سد از رقوم کف رودخانه ۱۸۵ متر، طول تاج ۴۶۲ متر و طول دریاچه آن ۶۰ کیلومتر است. از مهم‌ترین اهداف ساخت سد کارون ۳ می‌توان به کنترل سیلاب‌های فصلی رودخانه کارون، بالابردن قدرت تنظیم آب برای مصارف شرب و کشاورزی و تولید انرژی برقی اشاره کرد (کتابچه معرفی طرح‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۱).

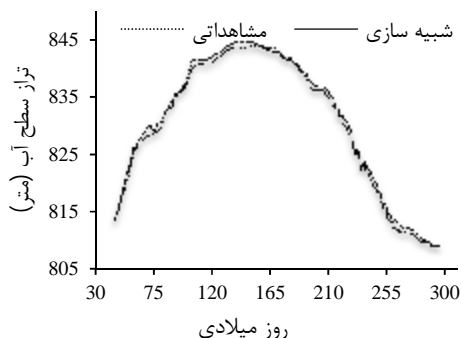
۱۳۸۸ بررسی کردند. نتایج حاصل از مدل‌سازی نشان دهنده وجود لایه‌بندی تابستانه حرارتی و به تبع آن لایه‌بندی کیفی مخزن سد ماملو بود. حمزه‌پور (۱۳۹۱) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی لایه‌بندی حرارتی و تغییرات کیفی آب مخزن سد مارون پرداخت و نتایج، نشان از لایه‌بندی قوی تابستانه در مخزن سد مارون داشت. سعیدی و همکاران (۱۳۹۱) پدیده لایه‌بندی حرارتی در سد ماملو را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ بررسی کردند. نتایج مدل‌سازی، نشان‌دهنده وجود یک رژیم حرارتی تقریباً پایدار بود که اختلاط کامل را تنها در صورت بروز سیلاب‌های فصلی تجربه می‌کند. چوی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به بررسی افزایش حجم مخزن بر هیدرودینامیک و پارامترهای کیفی پرداختند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش حجم مخزن، لایه‌بندی حرارتی شدیدتر می‌شود و دوره آن نیز افزایش می‌یابد. ما و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد کوریس (Kouris) در قبرس با مدل CE-QUAL-W2 پرداختند و نتیجه گرفتند که طرح‌های مختلف برداشت آب نمی‌تواند روی الگوی لایه‌بندی مخزن در طول سال تأثیری داشته باشد. کیم و کیم (۲۰۰۶) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی حرارت و جریان‌های گل‌آلود در شرایط آب و هوایی منسون در سد مخزنی سویانگ (Soyang) در کره پرداختند. نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی نشان داد که بعد از شرایط



شکل ۱- پلان و موقعیت مخزن سد کارون ۳

سپس داده‌های هیدرولوژیکی و کیفی جمع‌آوری شده حوزه، ارائه و مورد تحلیل و ارزیابی قرار می‌گیرد. گفتنی است که داده‌های کیفی مخزن سد با نمونه‌برداری و انجام آزمایش‌ها در طی ۸ ماه نمونه‌برداری از بهمن ۹۳ تا شهریور ۹۴ به‌دست آمده است. در ادامه سعی می‌شود که

داده‌های مورد نیاز برای اجرای مدل CE-QUAL-W2 را می‌توان به داده‌های هندسی، شرایط اولیه، شرایط مرزی، پارامترهای هیدرولوژیکی، پارامترهای جنبشی و داده‌های کالیبراسیون تقسیم کرد. در این زمینه ابتدا سازه سد و هندسه آن بررسی و مشخصات آن به مدل ارائه می‌شود.



شکل ۴- مقایسه تراز سطح آب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در سد کارون ۳

نتایج و بحث

برای کالیبراسیون حرارت در مخزن کارون ۳ از داده‌های ماهانه نمونه‌برداری شده در سه ایستگاه استفاده شده است. مشخصات نقاط نمونه‌برداری و موقعیت مکانی آن‌ها به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۵ آمده است.

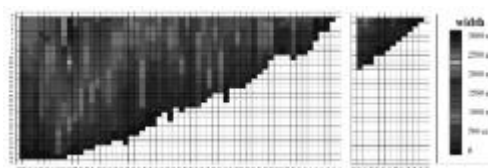
از آنجایی که در مدل مذکور ضریب‌های مختلفی بر هیدرودینامیک و توزیع حرارت تأثیرگذار هستند، ابتدا با استفاده از آنالیز حساسیت مقادیر پیش فرض هر پارامتر در مدل به میزان ۵۰٪ کاهش و افزایش داده و تأثیر آن بر پروفیل‌های حرارتی بررسی شد. با مشخص شدن تأثیر هر ضریب بر پروفیل‌های حرارتی، ضرایب مختلف بر حسب ناحیه و دامنه تأثیرشان دسته‌بندی شدند. سپس با تغییر ضرایب با دامنه تأثیر بیشتر، تناسب کافی بین پروفیل‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی برقرار گردید و مقدار نهایی ضرایب به دست آمد. نتایج نشان داد که ضریب پوشش باد، بیشترین تأثیر را بر پروفیل‌های حرارتی دارد. از این رو مقدار آن در ماه‌های مختلف بین ۰/۵ تا ۰/۹ در نظر گرفته شد. مقدار نهایی سایر ضرایب نیز در جدول ۲ آمده است.



شکل ۵- موقعیت مکانی ایستگاه‌های نمونه‌برداری از مخزن

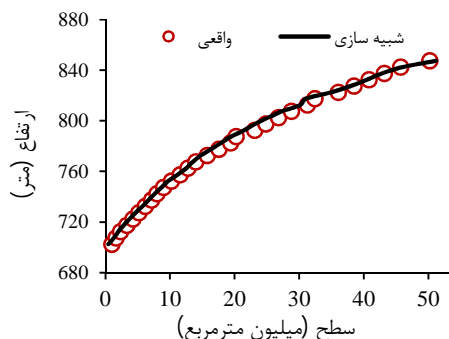
غلظت ورودی ماهانه ترکیبات به مخزن در سال برآورد و به‌عنوان یکی از شرایط مرزی به مدل برای شبیه‌سازی مخزن داده شود. در مرحله بعدی، شبیه‌سازی کیفی و حرارتی مخزن کارون ۳ با مدل CE-QUAL-W2 انجام خواهد شد. پس از کالیبراسیون و تأیید مدل، وضعیت موجود مخزن به لحاظ غلظت ترکیبات در لایه‌های مختلف بررسی می‌شود.

در این شبیه‌سازی مطابق شکل ۲، طول مخزن به فواصل ۱۰۰۰ متری و بعد قائم آن به فواصل ۵ متری تقسیم شده و در مجموع ۷۳ قطعه در طول و ۳۲ لایه در عمق است.



شکل ۲- هندسه مخزن سد کارون ۳ (شاخه اصلی و فرعی)

پس از وارد شدن این اطلاعات، داده‌های هندسه مخزن طی یک روند سعی و خطا و با استفاده از نمودار سطح-ارتفاع واقعی کالیبره و هندسه مخزن شبیه‌سازی می‌شود. سپس براساس داده‌های تراز آب در دوره مدل‌سازی، ترازهای روزانه آب شبیه‌سازی شده از مدل استخراج و با داده‌های برداشت شده از مخزن مقایسه می‌شود. شکل‌های ۳ و ۴ گویای دقت بالای کالیبراسیون هندسه مخزن و تراز آب و همچنین تطابق نتایج شبیه‌سازی با داده‌های میدانی است. خطای میانگین مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا در کالیبراسیون هندسه به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸۲ و در کالیبراسیون تراز آب به ترتیب ۰/۷۴ و ۰/۸۴ به دست آمدند.



شکل ۳- مقایسه نمودار سطح-ارتفاع واقعی و شبیه‌سازی شده مخزن کارون ۳

جدول ۱- مشخصات نقاط نمونه برداری در مخزن کارون ۳

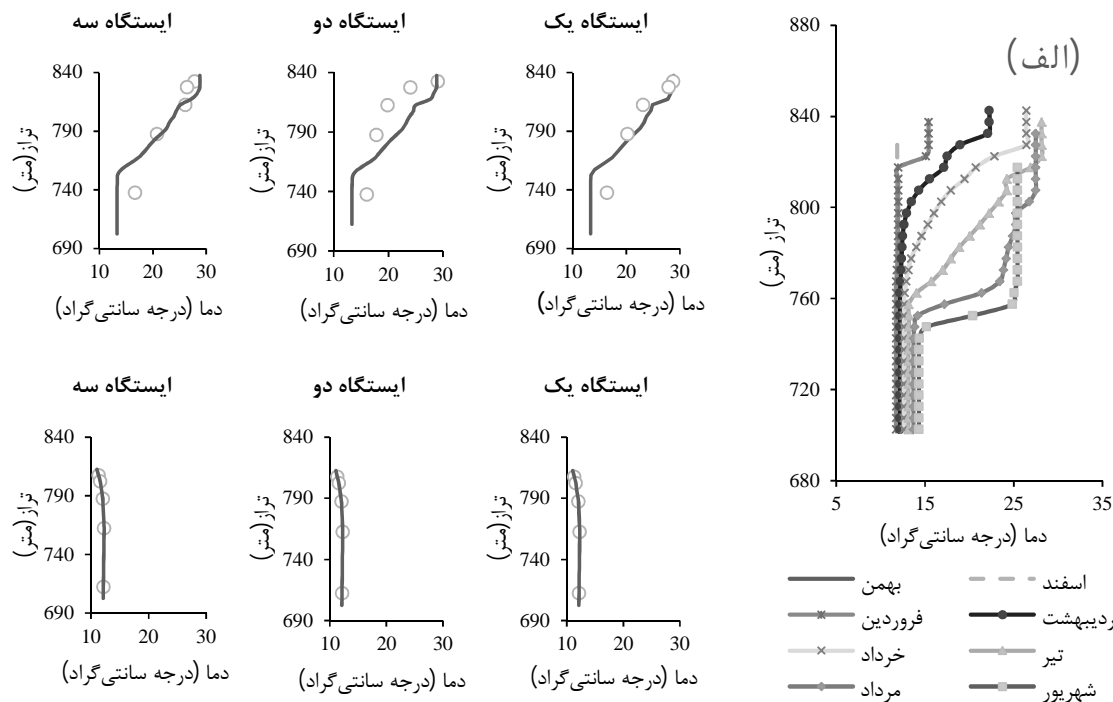
نام ایستگاه	شماره بخش در مدل	مختصات جغرافیایی	فاصله از محور سد (کیلومتر)	عمق های نمونه برداری (متر)
شماره ۱	#۵۶	۵۰/۱۱۳۸۹۹E، ۳۱/۷۹۶۹۳۰N	۲	۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۴
شماره ۲	#۵۵	۵۰/۱۲۳۵۷۹E، ۳۱/۷۸۰۴۶۴N	۳/۷۱	۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۴
شماره ۳	#۵۴	۵۰/۱۱۴۷۷۱E، ۳۱/۷۷۶۹۸۵N	۴/۳۳	۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۴

جدول ۲- مقدار نهایی ضرایب تبادلات سطحی به همراه ناحیه و دامنه تغییرات در کالیبراسیون مخزن کارون ۳ (توماس و اسکات، ۲۰۱۴؛ ادینگر و همکاران، ۱۹۷۴؛ واندرلیچ، ۱۹۷۲؛ اکوبو، ۱۹۷۱)

عنوان ضریب	ناحیه تأثیر	دامنه ضریب	مقدار ضریب
ضریب نفوذ عمق نور به آب	میان لایه	۰/۴۵-۰/۲۵	۰/۳۵
دمای رسوبات	زیر لایه	-	۱۹
ضریب تابش خورشیدی جذب شده توسط آب	رولایه و میان لایه	۰/۶۹-۰/۲۴	۰/۴
ویسکوزیته گردابه افقی	بی اثر	۳۰-۱	۱
پخش گردابه افقی	بی اثر	۱۰۰-۱	۱
ضریب سایه اندازی	رولایه و میان لایه	۱-۰	۰/۹
ضریب پوشش باد	تأثیر زیاد بر رولایه	۱-۰/۵	۰/۹-۰/۵
ضریب تبادل حرارت در کف	زیر لایه	۱-۰	۰/۹
ضریب بازتابش خورشیدی به ستون آب	تأثیر کم بر رولایه	۱-۰	۱
ضریب تبخیر a در تابع باد	رولایه	>۰	۴/۵
ضریب تبخیر b در تابع باد	رولایه	>۰	۰/۹
ضریب تبخیر c در تابع باد	رولایه	۲-۱	۲

مخزن (Hypolimnion) و در نتیجه، افزایش رولایه (Epilimnion) و متعاقب آن کاهش عمق میان لایه (Metalimnion) خواهیم بود. این روند ادامه می یابد تا به تدریج عمق و دانسیته رولایه افزایش یافته و مقاومت میان لایه در مقابل اختلاط کاهش یابد تا اینکه مخزن از حالت لایه ای خارج می شود و شروع به همگن شدن در عمق می کند؛ از این رو مخزن سد کارون ۳ جزء مخازن دارای لایه بندی تابستانه است و بنابر آنالیز حساسیت مدل عواملی همچون باد، تبخیر، سایه اندازی و به خصوص دمای منطقه سد بیش از سایر پارامترها می توانند در تشدید لایه بندی تأثیرگذار باشند. در مورد احتمال وقوع لایه بندی زمستانه نیز می توان چنین گفت که چون دمای آب در این مخزن هیچ گاه به کمتر از ۴ درجه سانتی گراد نمی رسد و مخزن سد در منطقه گرمسیری قرار دارد و همچنین اختلاف درجه حرارت رولایه و زیر لایه در بهمن ماه کمتر از یک درجه سانتی گراد است، بنابراین لایه بندی حرارتی معکوس قابل ملاحظه نیست و مخزن را می توان در طول زمستان با اختلاط کامل در نظر گرفت.

در شکل زیر نتایج پروفیل های شبیه سازی و اندازه گیری شده در عمیق ترین بخش سد که در فاصله ۵۰۰ متری از محور سد قرار دارد و لایه بندی در آن شدیدتر از سایر بخش هاست، به همراه پروفیل های حرارتی سه ایستگاه نمونه برداری در زمان اختلاط و لایه بندی، نشان داده شده است. براساس شکل ۶، در ابتدای شبیه سازی شاهد اختلاط در مخزن هستیم. اختلاط تا اوایل اسفندماه ادامه دارد و سپس با پایان فصل سرما لایه بندی ضعیفی شکل می گیرد. با روند گرم تر شدن هوا و افزایش تشعشعات خورشیدی و نیز افزایش میزان دمای آب جریان های ورودی به مخزن، شاهد لایه بندی شدیدتر در مخزن خواهیم بود؛ به طوری که در ۲۴ تیر میان لایه به حداکثر ضخامت خود، یعنی حدود ۶۰ متر می رسد و میزان تغییرات درجه حرارت در عمق ۱۵ درجه سانتی گراد می شود. در مردادماه نیز روندی مشابه تیرماه اما با گرادیان دمایی کمتر رخ می دهد. پس از آن با خنک تر شدن هوا، دمای سطح آب در اواخر شهریور به ۲۶ درجه سانتی گراد می رسد و از طرفی به دلیل کاهش دمای آب ورودی و افزایش چگالی آن، شاهد میل ورود آب به لایه های پایینی



شکل ۶- لایه‌بندی حرارتی در فاصله ۵۰۰ متری از محور سد کارون ۳ (الف) و پروفیل‌های حرارتی نقاط نمونه‌برداری در زمان اختلاط و لایه‌بندی (ب)

مقادیر نزدیک به آن‌ها استفاده شود. پارامترهای مورد استفاده در کالیبراسیون کیفی مدل در جدول ۳ آمده است.

پس از کالیبراسیون دما نیاز است تا مدل برای اکسیژن محلول نیز کالیبره شود. رویکرد اساسی در کالیبراسیون کیفیت آب، به گونه‌ای است که در بیشتر موارد سعی شده تا از مقادیر پارامترهای موجود در کارهای انجام شده یا

جدول ۳- مقدار نهایی ضرایب در کالیبراسیون کیفی مخزن کارون ۳ (توماس و اسکات، ۲۰۱۴؛ بروکر، ۱۹۷۸)

عنوان ضریب	مقدار نهایی ضریب	علامت اختصاری
فرمولاسیون بازدمش	#1 (Broecker)	Reaeration EQ
سرعت ته نشینی رسوبات (متر بر روز)	۰/۰۸	SEDS
غلظت اولیه رسوبات (میلی‌گرم بر لیتر)	۱	SEDCI
حداقل دما برای کاهش رسوبات (درجه سانتی‌گراد)	۴	SODT1
حداکثر دما برای کاهش رسوبات (درجه سانتی‌گراد)	۲۵	SODT2

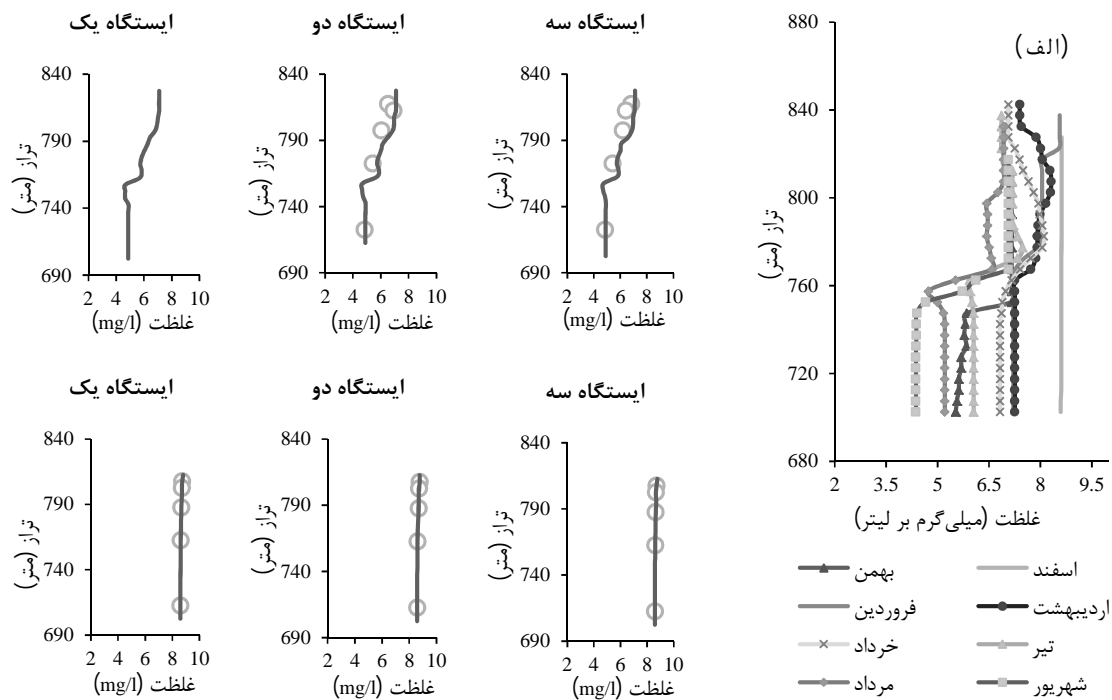
میکروارگانیزم‌ها در فروردین، مقدار اکسیژن محلول در لایه‌های زیرین مخزن کاهش می‌یابد و با گرم شدن هوا در اردیبهشت و خرداد مقدار DO در زیر لایه کاهش بیشتری پیدا می‌کند؛ ولی به دلیل نفوذ نور در اعماق اولیه؛ فرآیند فتوسنتز همچنان انجام و همین امر موجب افزایش اکسیژن محلول در میان لایه می‌شود. از آنجا که این سد

پروفیل‌های DO در شکل ۷ نشان‌دهنده این است که با ایجاد اختلاط در اسفندماه، مقدار اکسیژن محلول به مقدار ثابتی می‌رسد. به دلیل سرد بودن هوا و کاهش فعالیت ارگانیزم‌هایی که منجر به غنی شدن مخزن می‌شوند، این مقدار که معادل ۸/۶ میلی‌گرم بر لیتر است، بیشینه مقدار DO طی دوران شبیه‌سازی است. با شروع فعالیت

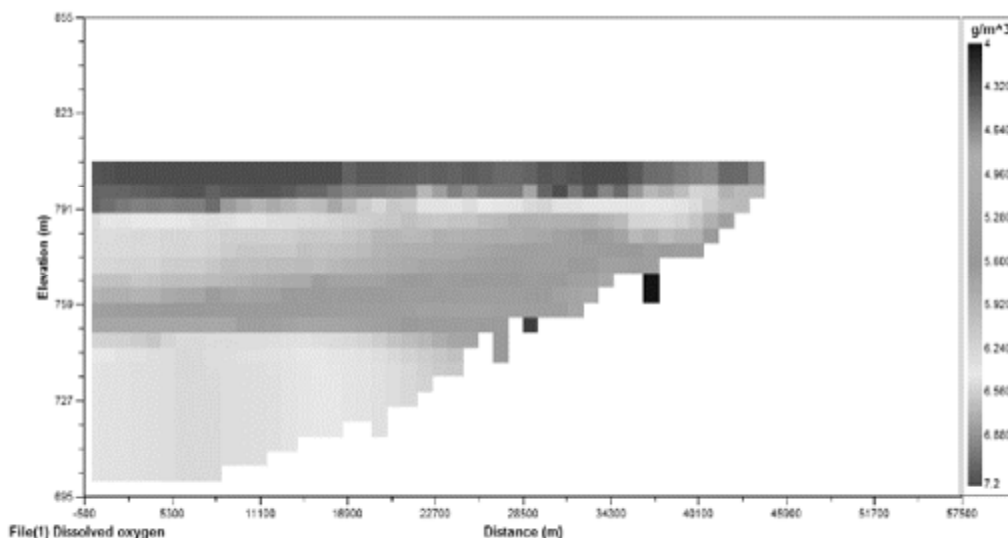
دمای آب مخزن، ظرفیت اکسیژن محلول کاهش می‌یابد. تفاوت بسیار زیاد گرادیان تغییرات اکسیژن محلول در زیرلایه و رولایه به ازای مقدار ثابتی از تغییرات دما حاکی از وجود عوامل مؤثر دیگری بر روند تغییرات این پارامتر در مخزن نیز است.

به طور کلی تطبیق کامل داده‌ها در فرآیند شبیه‌سازی امکان‌ناپذیر خواهد بود؛ چرا که فرآیند شبیه‌سازی عاری از خطاهای انسانی در نمونه‌برداری و انجام تحلیل نبوده و از طرف دیگر، معادلات حاکم خود در بعضی از موارد با ساده‌سازی‌هایی بر مدل معرفی شده است که همه این‌ها، در نهایت منجر به ایجاد اختلاف بین داده‌های میدانی و شبیه‌سازی می‌شود. در جدول ۴ میزان خطای مطلق، خطای میانگین مطلق و ریشه میانگین مربعات خطا به تفکیک برای ماه‌ها و میانگین پارامترهای شبیه‌سازی، آورده شده است.

جزء مخازن عمیق محسوب می‌شود، نور به کف مخزن نمی‌رسد و به همین دلیل مقدار DO در اعماق مخزن بسیار کم است. پروفیل DO در تیرماه روندی مشابه ماه قبل داشته است، با این تفاوت که مقدار غلظت اکسیژن محلول با تشدید فرآیندهای ذکر شده و نیز تجزیه جلبک‌ها در حین انتقال به لایه‌های زیرین، بیشتر کاهش می‌یابد. با تعدیل دمای هوا در اواخر مرداد و شهریور و تشدید فرآیند تغذیه‌گرایی، مقدار DO در رولایه بیشتر از میان‌لایه می‌شود و در همین زمان غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه به کمینه مقدار خود می‌رسد. این مقدار که معادل ۴/۳۶۶ میلی‌گرم بر لیتر اکسیژن محلول است، موجب مرگ ماهیان تزیینی می‌شود. این مطلب در شکل ۸ که معرف وضعیت اکسیژن محلول در روز ۲۶۴ام ژولایوسی است، توسط مدل تهیه شده است؛ احتمال دارد که روند تغییرات اکسیژن محلول بیش از سایر عوامل تحت تأثیر لایه‌بندی حرارتی باشد؛ چرا که با افزایش



شکل ۷- لایه‌بندی اکسیژن محلول در فاصله ۵۰۰ متری از محور سد کارون ۳ (الف) و پروفیل‌های کیفیت اکسیژن محلول ایستگاه‌های نمونه‌برداری در زمان اختلاط و لایه‌بندی (ب)



شکل ۸- وضعیت اکسیژن محلول در مخزن کارون ۳ در روز ۲۶۴ ام ژولیبوسی

جدول ۴- خطای شبیه‌سازی دما و اکسیژن محلول در مخزن کارون ۳

ماه	ME	AME	RMSE	ماه	ME	AME	RMSE
بهمن	۰/۰	۰/۰	۰/۰	بهمن	۰/۰	۰/۰	۰/۰
فروردین	-۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۵۲	فروردین	۱/۲۷	۱/۳۱	۱/۶۳
خرداد	-۲/۰۶	۲/۰۶	۲/۵۸	خرداد	۱/۳۵	۱/۳۵	۱/۷۳
تیر	۰/۷۷	۲/۱۳	۲/۶۵	تیر	۰/۰۹	۰/۲۵	۰/۳۰
مرداد	۲/۹۴	۳/۳۷	۴/۸۲	مرداد	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۶۳
شهریور	۱/۴۱	۲/۱۰	۳/۲۶	شهریور	۰/۰۹	۰/۵۶	۰/۶۹

نتایج حاصل نشان می‌دهد که این مخزن دارای تنها یک سیکل لایه‌بندی حرارتی بوده است؛ به گونه‌ای که از اواخر فروردین‌ماه شروع و در اواسط تابستان به اوج خود می‌رسد. با گذر از این پیک و ورود به فصول سرد سال، لایه‌بندی شکل گرفته به تدریج تعدیل می‌شود؛ به طوری که در اسفندماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. غلظت اکسیژن محلول در آب نیز طبق انتظار به گونه‌ای است که در طول دوران لایه‌بندی و با افزایش عمق کاهش می‌یابد، چرا که لایه‌بندی حرارتی شکل گرفته از یک طرف و ممانعت رولایه در برابر ورود هوای اتمسفر و انجام فتوسنتز در عمق از طرف دیگر، باعث کمبود این شاخص می‌شوند.

منابع

۱. توحیدی ح. ر. ۱۳۷۷. تحقیق در رابطه با عوامل موثر با عوامل موثر در تغییرات کیفی آب مخزن سد طرق و ارائه روش‌های بهینه کردن آب

نتیجه‌گیری

اولین و مهم‌ترین پارامتر کیفی آب که همه فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آب را تحت تأثیر قرار می‌دهد، دمای آب است. در این پژوهش، دمای آب با اندازه‌گیری و شبیه‌سازی در سد کارون ۳ بررسی شد. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های میدانی و شبیه‌سازی مدل نشان داد که مدل مذکور با دریافت اطلاعات مربوط به حجم و هندسه مخزن به همراه داده‌های آب و هوایی به خوبی تغییرات دمایی در مخزن سد را شبیه‌سازی می‌کند. از آنجا که برخی از پارامترهای بیوشیمیایی آب از جمله میزان اکسیژن محلول که فعل و انفعالات بیولوژیکی پیکره آبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تابعی از لایه‌بندی حرارتی مخازن است بنابراین با استفاده از مدل کالیبره شده، می‌توان عملکرد مخازن در سناریوهای مختلف تغییرات دمایی مناطق را که منتج از تغییرات آب و هوایی است، بر این شاخص کیفی آب ارزیابی کرد و در مدیریت مخازن مورد استفاده قرار داد.

11. Ford D. E. and K. W. 1979. Time and length scales for the one-dimensional assumption and its relation to ecological models. *Water Resources Research*. 15: 113-120.
 12. Kim Y. and Kim B. 2006. Application of a 2-Dimensional Water Quality Model (CEQUAL- W2) to the Turbidity Interflow in a Deep Reservoir (Lake Soyang, Korea). *Lake and Reservoir Management*. 22(3): 213-222.
 13. 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.
 14. Okubo. 1971. Oceanic Diffusion Diagrams. *Deep-Sea Research*. 18: 0-789.
 15. Reynolds C. S. 1992. Dynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes. *Arch Hydrobiol, Beih Ergbn, Limnol*. 35(1): 13-31.
 16. Thomas M. C. and Scott A. W. 2014. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model. Department of Civil and Environmental Engineering of Portland State University. Report E-95-1: 1-14.
 17. Wunderlich W. 1972. Heat and Mass Transfer between a Water Surface and the Atmosphere. *Water Resources Research Laboratory*. Report 14-0-6803:173-248.
۱. دریاچه. کمیته تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی (وزارت نیرو).
 ۲. حمزه‌پور ص. ۱۳۹۱. بررسی لایه‌بندی حرارتی و تأثیر آن بر کیفیت آب مخزن. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، دانشگاه ارومیه. ۱۰۸ ص.
 ۳. خسروی ج. هاشمی‌منفرد س.آ. اژدری‌مقدم م. و خواجه‌پور ا. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی، شوری و اکسیژن محلول در مخزن سد شیرین دره با استفاده از مدل دوبعدی CE-QUAL-W2. دهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. دانشگاه تبریز. ۱۵ تا ۱۷ اردیبهشت.
 ۴. سعیدی پ. میرآخوری ش. آیینی ش. و مهردادی ن. ۱۳۹۱. مطالعه لایه‌بندی حرارتی سد پیشین با استفاده از مدل CE-QUAL-W2. دومین کنفرانس برنامه‌ریزی و مدیریت محیط‌زیست. ۲۶ و ۲۷ اردیبهشت ۱۳۹۱.
 ۵. ظهروند م. ح. سید سراجی م. ح. و هاشمی س. ح. ۱۳۹۰. ارزیابی شرایط کیفی آب مخازن سدها با استفاده از مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 (مطالعه موردی مخزن سد ماملو). اولین کنفرانس بین‌المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاه‌های برقابی. ۱۹ و ۲۰ بهمن، تهران.
 ۶. کتابچه معرفی طرح‌های شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. تهران: روابط عمومی شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران. ۱۳۹۱.
 ۷. کرمانی م. و ناصری س. ۱۳۸۱. اثرات احداث سد بر کیفیت آب. مجله آب و محیط‌زیست. ۵۱: ۶-۱۱.
 8. Broecker H. C. Petermann J. and Siems W. 1978. The Influence of Wind on CO2 Exchange in a Wind-Wave Tunnel. *Marine Research*. 36(4): 595-610.
 9. Choi J. H. Jeong S. A. and Park S. S. 2007. Longitudinal-Vertical Hydrodynamic and Turbidity Simulations for Prediction of Dam Reconstruction Effects in Asian Monsoon Area. *Journal of the American Water Resource Association (JAWRA)*. 43(6): 1444-1454.
 10. Edinger J. E. Brady D. K. and Geyer J. C. 1974. Heat Exchange and Transport in the Environment. EPRI Publication. 49(14):193-268.

