محیط‌شناسی، دورهٔ ۳۹، شمارهٔ ٤ ، زمستان ۱۳۹۲، صفحهٔ ۱۸۰-۱۷۱

شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول با استفاده از مدل Ce-Qual-W2 (مطالعهٔ موردی: مخزن سد شهید رجایی)

پونه سعیدی*[1]، ناصر مهردادی[2]، مجتبی اردستانی[3]، اکبر باغوند[4]

۱. دانشجوی دکتری منابع آب، دانشکدهٔ تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست دانشگاه تهران
۲. استادگروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران mehrdadi@ut.ac.ir
۳. استادیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران ardestan@ut.ac.ir
٤. دانشیار گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکدهٔ تحصیلات تکمیلی محیط‌زیست، دانشگاه تهران baghvand@ut.ac.ir

تاریخ وصول مقاله: ۱۳۹۱/۰۹/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۰۶/۱۶

چکیده

کمبود منابع آب شیرین سبب شده است که به کیفیت آب ذخیره‌شده در پشت سدها به‌منزلهٔ منابع آب سطحی بیشتر از گذشته توجه شود. رژیم حرارتی و غلظت اکسیژن محلول که از عوامل تأثیرگذار در کیفیت آب مخازن‌اند، در سد مخزنی شهید رجایی استان مازندران مطالعه شدند. با توجه به کاربری جدید آب این مخزن به منظور آب آشامیدنی ساری، مطالعهٔ کیفیت آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این راستا ابتدا مدل هیدرودینامیک مخزن سد شهید رجایی برای سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ به وسیلهٔ نرم‌افزار CE-QUAL-W2 ساخته و کالیبره و برای شبیه‌سازی رژیم حرارتی و اکسیژن محلول سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ با دو فرض استمرار وضع موجود و افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی استفاده شد. نتایج نشان‌دهندهٔ ایجاد لایه‌بندی حرارتی در تابستان و اختلاط قائم در زمستان بود و دریاچهٔ مخزن سد شهید رجایی در دستهٔ دریاچه‌های مونومیکتیک گرم قرار می‌گیرد. از نتایج مدل‌سازی اکسیژن محلول مشخص شد در زمان شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی، غلظت این پارامتر در کف مخزن به صفر می‌رسد و در زمان اختلاط قائم زمستانی شرایط بی‌هوازی کف مخزن از بین می‌رود و مخزن در جهت قائم همگن می‌شود. افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی تراز آبگیری و زمان ماندآب درون مخزن، طول دورهٔ لایه‌بندی تابستانی و به دنبال آن مدت زمان برقراری شرایط بی‌هوازی در کف مخزن را کاهش و قدرت و شدت لایه‌بندی را در مخزن سد شهید رجایی افزایش می‌دهد.

کلیدواژه

اکسیژن محلول، رژیم حرارتی، شبیه‌سازی دوبعدی، مخزن سد شهید رجایی، مدل CE-QUAL-W2.

۱. سرآغاز

دریاچه‌ها و مخازن از جمله منابع مهم آب‌های سطحی محسوب می‌شوند. ماهیت آرام جریان در این منابع تمایل به لایه‌بندی و کندی انتقال را در آن‌ها سبب می‌شود. رژیم حرارتی در مدل‌های کیفیتی آب از دو نظر دارای اهمیت است. اول آنکه، دما تأثیر مستقیم در سرعت واکنش‌های شیمیایی دارد و دوم آنکه، تعادل گرمایی تأثیر زیادی در اختلاط در سیستم‌های آب شیرین دارد (سلطانی و علوی، ۱۳۸٤). کاهش اختلاط قائم در مخازن، انتقال اکسیژن از سطح به کف را کند یا ناممکن و حیات آبزیان این مناطق را تهدید می‌کند.

رژیم حرارتی دریاچه‌ها عمدتاً نتیجهٔ اندرکنش ۲ فرایند انتقال انرژی گرمایی از سطح دریاچه و تأثیر نیروی جاذبه در اختلاف چگالی است. بسته به فصل سال تبادل گرما در فصل مشترک سطح دریاچه و هوا، به افزایش یا کاهش دمای سطح آب منجر می‌شود که ناشی از عواملی مانند

* نویسنده مسئول: تلفن تماس: ۰۹۱۱۳۵۳۱۴۸۱ Email: pooneh.saeidi@ut.ac.ir

مقدار انرژی تابش خورشید، دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و درصد ابر آسمان است (Chung and Oh, 2006).

وزش باد روی سطح دریاچه به اختلاط بخش سطحی آب و انتقال گرما، اکسیژن محلول و اندازهٔ حرکت به پایین منجر می‌شود. در مقابل اختلاط نیروی شناوری مانع اختلاط بیشتر می‌شود. این نیرو در اثر اختلاف چگالی در دماهای مختلف ایجاد و سبب می‌شود که قسمت چگال‌تر آب در پایین قرار گیرد. لایه‌بندی حرارتی در مخازن سدها مانع دریافت اکسیژن از منابع خارجی می‌شود و ارتباط طبیعی مخزن با هوای اطراف را قطع می‌کند (جعفر دهقان، ۱۳۸۰).

در مخازن و دریاچه‌های با طول زیاد برای پیش‌بینی دقیق لایه‌بندی حرارتی و کیفیت آب، استفاده از مدل دوبعدی متوسط‌گیری‌شده در عرض اجتناب‌ناپذیر است. در مدل‌سازی دوبعدی یک روش مناسب و دقیق، مدل‌سازی همزمان هیدرودینامیک جریان و پارامترهای کیفی است. مدل‌سازی حرکت سیال با استفاده از معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی شکل می‌گیرد. در بسیاری از جریان‌های آشفته، معادلات رینولدرز که حرکت سه‌بعدی آشفتهٔ سیال را به صورت متوسط‌گیری‌شده در زمان مدل می‌کنند، با دقت خوبی قابل استفاده‌اند.

همچنین، برحسب تغییرات مکانی و زمانی عوامل مؤثر در شرایط اکوسیستم‌های آبی و خصوصاً مخازن سدها، انواع مدل‌های ریاضی توسعه یافته است (نظری‌ها و همکاران، ۱۳۸۹). انتخاب نوع مدل متناسب با شرایط و عوامل مؤثر، همچنین اطلاعات و داده‌های قابل دسترس از گام‌های اساسی شبیه‌سازی ریاضی اکوسیستم‌های آبی از جمله مخازن سدهاست.

نرم‌افزار CE-QUAL-W2 یک مدل دوبعدی (افقی و عمودی) هیدرودینامیک و کیفیت آب است که می‌تواند پیکره‌هایی نظیر رودخانه‌های عمیق، مخزن سد و دریاچه و خورها را مدل کند. این مدل در سال ۱۹۹۵ از سوی واحد مطالعات آبراهه‌های مهندسان ارتش امریکا (WES) تهیه شده است و بر اساس حل معادلات غیردائمی، دوبعدی هیدرودینامیک و پخش انتقال کار می‌کند (Cole and Wells, 2008). در این مطالعه با استفاده از نسخهٔ ۳/٦ این نرم‌افزار که در سال ۲۰۰۸ معرفی شد، غلظت اکسیژن محلول و دما در مخزن سد شهید رجایی شبیه‌سازی می‌شود.

۲. منطقهٔ مورد مطالعه

سد مخزنی شهید رجایی در ٤٠ کیلومتری جنوب ساری روی رودخانهٔ تجن و با اهداف تأمین و تنظیم آب کشاورزی اراضی دشت تجن، تأمین آب آشامیدنی جمعیت ساکن در محدودهٔ طرح، تأمین آب صنعتی محدودهٔ طرح، تولید برق، کنترل طغیان و جلوگیری از خسارت ناشی از سیل احداث شده است. عملیات اجرای سد از شهریور ۷۰ شروع شد و در سال ۷۵ خاتمه یافت. به موازات آن نیز سد انحرافی و شبکهٔ آبیاری و زهکشی آغاز شد.

نوع سد بتنی دو قوسی با سرریز آزاد، ارتفاع از پی ۱۳۸ متر، عرض در پی ۲۷ متر و عرض تاج سد ۷ متر است. حجم مخزن ۱٦۰ میلیون مترمکعب، مساحت دریاچه ۵۲۰ هکتار و طول دریاچه۸۵۰۰ متر است (آب منطقه‌ای مازندران، ۱۳۹۰). با توجه به اینکه تا قبل از سال ۱۳۷۳ ارزیابی زیست‌محیطی سدها اجباری نبود، سد شهید رجایی واقع در استان مازندران از جمله سدهایی است که مرحلهٔ مطالعات آن قبل از این تاریخ تمام شده و لذا هیچ‌گونه ارزیابی زیست‌محیطی روی آن صورت نگرفته بود (نظری‌ها و علی‌نژاد، ۱۳۸۱). همچنین، پیش از آبگیری مخزن، پاک‌سازی کامل اراضی داخل مخزن انجام نشد.

در سال‌های اخیر نیز طرح آب‌رسانی از سد شهید رجایی به ساری برای مصارف شرب و خانگی در حال اجراست و اهمیت کیفیت آب این مخزن را چندین برابر کرده است. با توجه به این مسائل مطالعهٔ غلظت اکسیژن محلول و رژیم حرارتی مخزن سد شهید رجایی گام مهمی در کنترل کیفیت آب آن است.

۳. ساخت مدل

اطلاعات ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی دما و اکسیژن محلول در برنامه عبارت‌اند از: ابعاد ساده‌شدهٔ مخزن، اطلاعات هواشناسی (دمای هوا، نقطهٔ شبنم، سرعت و جهت باد، پوشش ابر)، دبی‌های ورودی و خروجی، دمای جریانات ورودی، دمای آب در عمق، غلظت اکسیژن محلول در طول زمان و بازه‌های مختلف عمقی، آب گذری انشعابات فرعی و شرایط مرزی (وزارت نیرو، ۱۳۸۹).

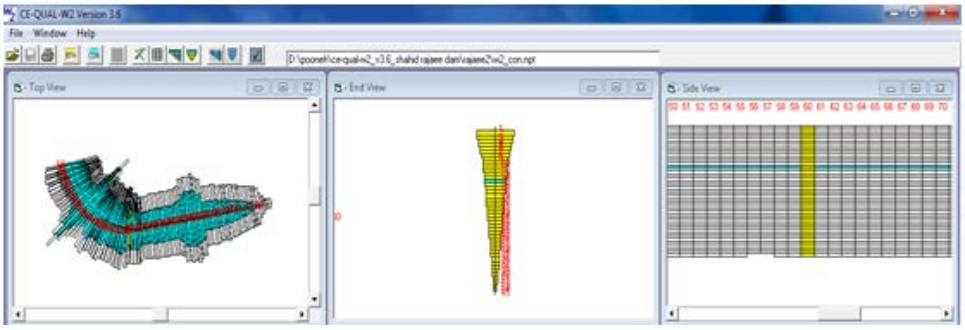
شکل هندسی مخزن سد شهید رجایی به کمک نقشه‌های ۱:۱۰۰۰۰ شرکت آب منطقه‌ای مازندران به یک شاخهٔ اصلی با ۹۶ المان طولی[1] و هر یک به طول ۵۰ متر تقسیم شد. عمق مخزن نیز به ٤٥ لایه هر یک به عمق ۲ متر تقسیم شد. شکل ۱ نمایی از مدل هندسی مخزن سد شهید رجایی را نشان می‌دهد. در این شکل لایهٔ ۱۵ با رنگ آبی مشخص شده و قطعهٔ ٦۰ نیز به رنگ زرد نمایش داده شده است.

در این مخزن تراز خروجی سرریز ٤۹۰ متر از سطح دریا، دریچهٔ تخلیهٔ کشاورزی ٤۲٦ متر از سطح دریا، حداقل تراز بهره‌برداری ٤۳۸ متر از سطح دریا و تراز دریچهٔ تخلیهٔ رسوب ٤۱۳ متر از سطح دریاست، این اطلاعات نیز به مدل معرفی شدند. برای ساخت مدل، داده‌های سال آبی ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۰ استفاده و مدل هیدرودینامیکی ساخته شد. کالیبراسیون هیدرودینامیک مدل در دو گام صورت پذیرفت:

گام اول با استفاده از تطبیق نمودارهای حجم به ارتفاع حاصل از نتایج شبیه‌سازی و داده‌های واقعی سد شهید رجایی شکل می‌گیرد و گام دوم به وسیلهٔ کنترل جریانات ورودی و خروجی به مخزن، ارتفاع سطح آب حاصل از شبیه‌سازی و واقعیت منطبق می‌شود.کالیبراسیون کیفی نیز شامل دو گام دمایی و اکسیژن محلول است. در کالیبراسیون دمایی ابتدا با اعمال آنالیز حساسیت روی پارامترهای درگیر در مدل‌سازی دمایی مخازن، مهم‌ترین پارامترها مشخص می‌شود، سپس با تغییر در آن‌ها به یکسان‌سازی نتایج شبیه‌سازی با مشاهدات می‌پردازیم. جدول ۱ نتایج تحلیل حساسیت نسبت به دما در مخزن سد شهید رجایی است. هر اندازه مقدار ضریب حساسیت پارامترها به ۱ نزدیک‌تر باشد، نشانهٔ اثر بیشتر آن پارامتر است. همچنین، ضرایب کمتر از ۰/۵ معمولاً تأثیرگذار نیستند و به بررسی نیاز ندارند. بر این اساس، ضریب تأثیر باد به‌منزلهٔ مؤثرترین پارامتر در کالیبراسیون دمایی مخزن سد شهید رجایی انتخاب شد. مقدار ضریب پوشش باد پس از کالیبراسیون در مقطع ۱ تا ٥٤ که مربوط به بخش رودخانه‌ای و انتقالی مخزن است ۰/۵، برای مقطع ۵۵ تا ۷۳ که ابتدای بخش اصلی مخزن است ۰/٦ و برای باقی مقاطع تا تاج سد برابر ۰/۷ انتخاب شد.

جدول ۱. ضریب حساسیت دما در مخزن نسبت به تغییر در آن پارامتر

ضریب	مقدار ضریب حساسیت
لزجت طولی ادی	۰/۱۷
پخش طولی ادی	۰/۲۱
ضریب شزی یا مانینگ	۰/۰۵
تأثیر باد (پوشش باد)	۰/٦۳
جذب تابش خورشید در لایهٔ سطحی	۰/۱۳
کاهش نور در آب پاک	۰/۱۷
کاهش نور در مواد جامد غیرآلی	۰/۱۱
کاهش نور در مواد جامد آلی	۰/۰۷



شکل ۱. نمایی از هندسهٔ مخزن شهید رجایی در برنامهٔ CE-QUAL-W2 (لایهٔ ۱۵ قطعهٔ ۶۰)

برای کالیبراسیون اکسیژن محلول نیز از روند بالا استفاده شد، با این تفاوت که در این مرحله نرخ بازدمش و اکسیژن‌خواهی رسوبات درگیر بودند و در نهایت معادلهٔ ۱ برای محاسبهٔ نرخ هوادهی مخزن انتخاب شد.

$$k_a = \frac{k_l}{H} = \frac{\alpha w^B}{H} \qquad (1)$$

در معادلهٔ فوق k_a ضریب هوادهی مخزن (1/T) و w متوسط سرعت روزانهٔ باد (L/T) است. α و β (بدون واحد) نیز به صورت جدول ۲ انتخاب می‌شوند.

جدول ۲. مقدار ضرائب α و β در رابطهٔ ۱

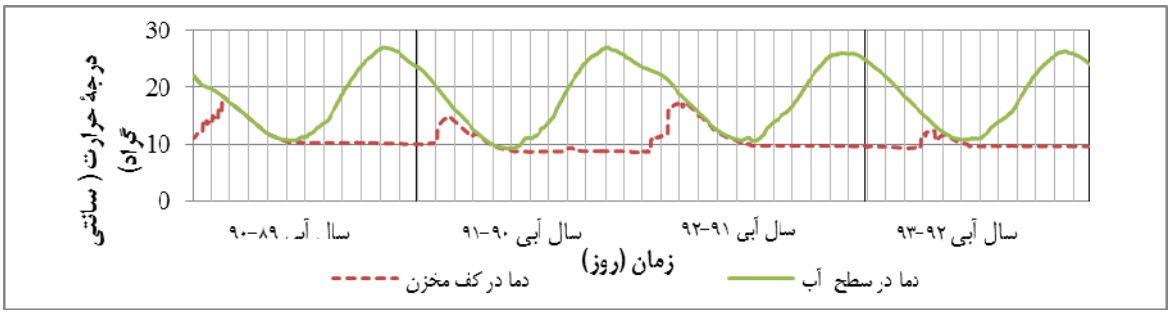
$\alpha = 0.2$	$\beta = 1$	$w < 3.5\ ms^{-1}$
$\alpha = 0.057$	$\beta = 2$	$w > 3.5\ ms^{-1}$

اطلاعات کیفی سال آبی ۱۳۸۹-۹۰ برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل استفاده شدند. مدل کالیبره‌شده برای شبیه‌سازی شرایط دمایی و غلظت اکسیژن محلول در سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ با دو فرض استمرار وضع موجود و افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی منطقه به کار رفت. طبق اطلاعات سازمان آب منطقه‌ای و هواشناسی استان مازندران منطقهٔ مورد مطالعه از ثبات نسبی آب و هوایی و کاربری اراضی برخوردار بودند و بر این اساس دو سناریو کمّی فوق برای مدل‌سازی انتخاب شدند (هواشناسی استان مازندران، ۱۳۸۶).

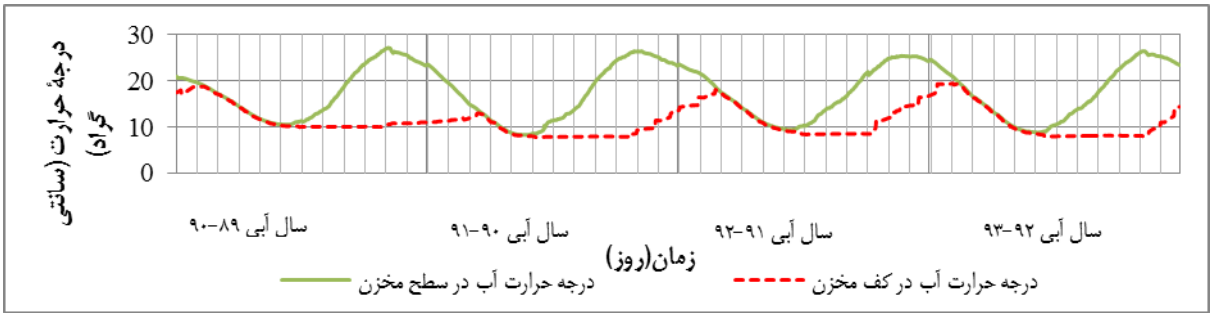
٤. بحث و نتیجه‌گیری

سطح دریاچه‌ها و مخازن در بیشتر مناطق زمین یک چرخهٔ دمایی مشخص را در سال طی می‌کنند. روند حرارتی سد شهید رجایی در سطح و عمق مخزن بر اساس دو فرض استمرار وضع موجود و افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی طی سال‌های ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ به صورت شکل‌های ۲ و ۳ است.

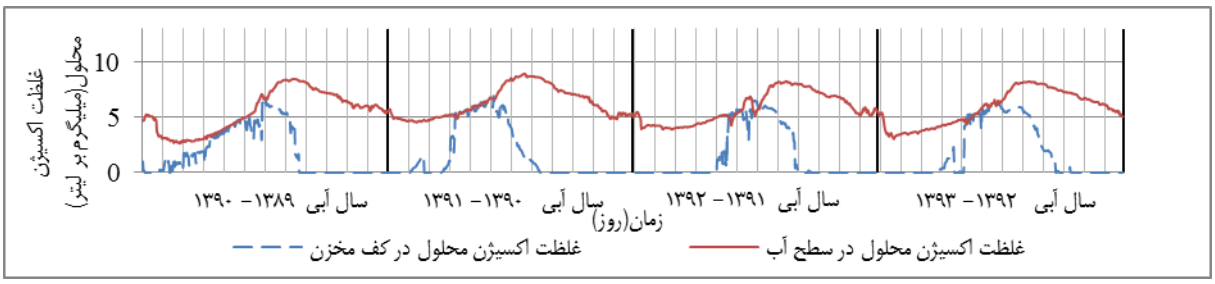
دلایل اصلی تغییرات دما در سطح آب تماس حرارتی با اتمسفر و تغییرات میزان تابش خورشیدی است. انتقال حرارت از سطح به عمق بیشتر تحت تأثیر تشعشعات خورشیدی، تشعشعات موج بلند اتمسفر، جریانات حرارتی مرتبط با تبخیر و بارندگی، جریانات ورودی و خروجی سطحی و زیرزمینی و تماس حرارتی با بستر دریاچه است (Imboden and Wu¨est, 1995).



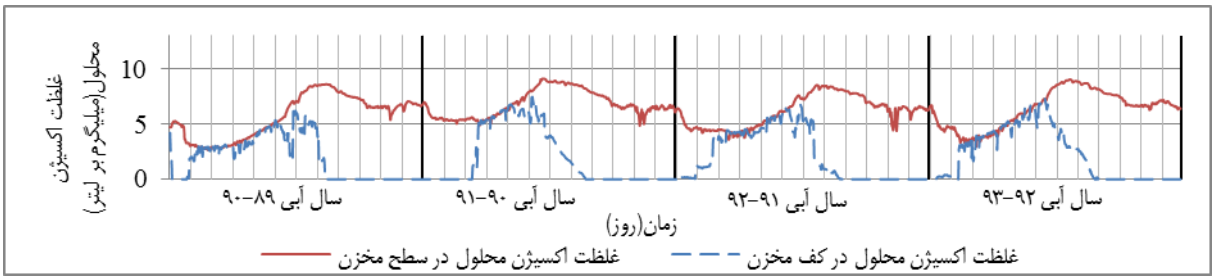
شکل ۲. تغییرات حرارتی دما در سطح آب و عمق مخزن سد شهید رجایی در سال‌های آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۳



شکل ۳. رژیم حرارتی مخزن سد شهید رجایی با فرض افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی در سال‌های ۱۳۸۹ - ۱۳۹۳



شکل ۴. تغییرات اکسیژن محلول در عمق مخزن با فرض استمرار وضع موجود طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۳



شکل ۵. تغییرات اکسیژن محلول در عمق مخزن با فرض افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی طی سال‌های ۱۳۸۹-۱۳۹۳

همان‌طور که از شکل ۲ مشهود است با فرض استمرار وضع موجود تا سال ۱۳۹۳، سیکل لایه‌بندی تابستانه و اختلاط زمستانه به این صورت است که بازهٔ زمانی آذر تا بهمن لایه‌های مختلف عمقی اختلاط حرارتی را تجربه می‌کنند و لایه‌بندی حرارتی در مخزن شکسته می‌شود.

با نزدیک‌شدن به فصل بهار اختلاف دما بین لایه‌های سطحی و عمقی افزایش می‌یابد و لایه‌بندی حرارتی ایجاد می‌شود، بیشترین گرادیان حرارتی و اوج لایه‌بندی نیز در تابستان دیده می‌شود. پس از سپری‌شدن دورهٔ گرما و با خنک‌شدن هوا از شدت لایه‌بندی کم می‌شود و بار دیگر در زمستان به شرایط اختلاط دمایی در مخزن می‌رسیم.

در صورت افزایش ۵۰ درصد نیاز آبی و برداشت آب از مخزن، همان‌طور که در شکل ۳ مشخص شده است، رژیم حرارتی مخزن تغییر نمی‌کند، اما مدت زمانی که مخزن، اختلاط دمایی را تجربه می‌کند افزایش و زمان لایه‌بندی مخزن کاهش می‌یابد. با توجه به ارقام دریچهٔ تخلیه که در تراز نزدیک به کف مخزن قرار دارد، برداشت بیشتر آب باعث کاهش زمان ماند لایه‌های عمقی می‌شود و به اختلاط قایم مخزن کمک می‌کند. به عبارت دیگر برداشت بیشتر آب، مخزن را از نظر دمایی به تراز بهینهٔ بهره‌برداری نزدیک می‌کند.

تغییرات اکسیژن محلول در اعماق مختلف مخزن طی سال‌های آبی ۱۳۸۹-۱۳۹۳ در شکل‌های ٤ و ٥ مشخص شده است. مقایسهٔ این دو با شکل‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود. در فصول گرم همراه لایه‌بندی دمایی اکسیژن محلول نیز لایه‌بندی را تجربه می‌کند و با افزایش عمق کاهش می‌یابد.

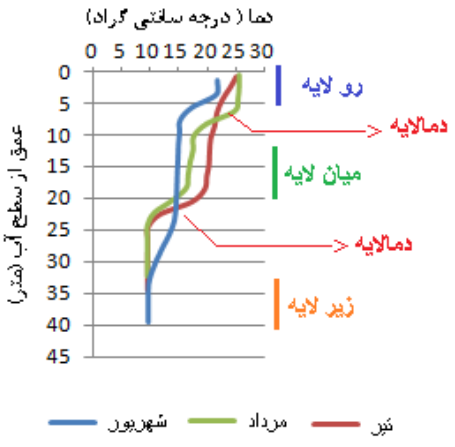
در فصول سرد که اختلاط دمایی مخزن برقرار است، اکسیژن محلول نیز در کل مخزن همگن می‌شود. بنابراین، در مخزن سد شهید رجایی لایه‌بندی حرارتی می‌تواند یکی از دلایل ایجاد شرایط بی‌هوازی در کف مخزن و جلوگیری از انتقال قائم اکسیژن محلول در عمق باشد.

شکل‌های ٤ و ٥ نشان می‌دهد با افزایش برداشت آب، زمان لایه‌بندی حرارتی مخزن و مدت زمان حکمفرمایی شرایط بی‌هوازی در کف مخزن کاهش می‌یابد و به دنبال این تغییر مخزن از نظر غلظت اکسیژن محلول ماه‌های بیشتری در شرایط اختلاط قرار دارد.

با مطالعهٔ تغییرات دمای سطح دریاچه‌های مختلف در

شرایط آب و هوایی مشابه مشخص شد متوسط دمای روزانهٔ دریاچه‌های مختلف، مشابه است و فقط در بهار تفاوت کوچکی بین آن‌ها وجود دارد. در دوره‌های گرم و تابستان، دریاچه‌های کوچک‌تر به جذب گرمای سریع‌تری تمایل دارند (Boehrer, et al., 2005). خصوصیات اختلاطی دریاچه مشخص می‌کند دما به طور مؤثر چگونه و تا چه عمقی به صورت قائم منتقل می‌شود. اگر سطح مخزن سد از دمای ٤ درجه تجاوز کند، گرم‌تر و کم چگال‌تر می‌شود و تنها تا عمق محدودی امکان اختلاط دارد. این عمق به انرژی محدودی که از طریق باد تأمین می‌شود بستگی دارد. در اکثر مخازن مانند مخزن سد شهید رجایی با شروع تفاوت چگالی، لایه‌بندی حرارتی دورهٔ تابستان شروع می‌شود. لایه‌بندی حرارتی در دریاچه های عمیق، تا زمانی که هوای سرد پاییز و زمستان در آب‌های عمیق چرخشی ایجاد کند، باقی می‌ماند.

لایهٔ آب سطحی گرم‌تر رولایه[۲] نام دارد، در حالی که لایه‌های سردتر پایینی، که در مدت لایه‌بندی با رولایه اختلاط نمی‌یابند، زیرلایه[۳] نامیده می‌شوند. یک گرادیان دمایی واضح در ناحیهٔ ارتباط این دو لایه شکل می‌گیرد که ترموکلاین[٤] یا دمالایه نامیده می‌شود. در شرایط لایه‌بندی تابستانه میان‌لایه[۵] در وسط رولایه و زیرلایه تشکیل و به وسیلهٔ ترموکلاین به این دو لایه وصل می‌شود. در شکل ٦ این لایه‌ها در پروفیل دمایی مخزن سد شهید رجایی در فاصلهٔ ۵۰ متری از تاج سد نشان داده شده‌اند.

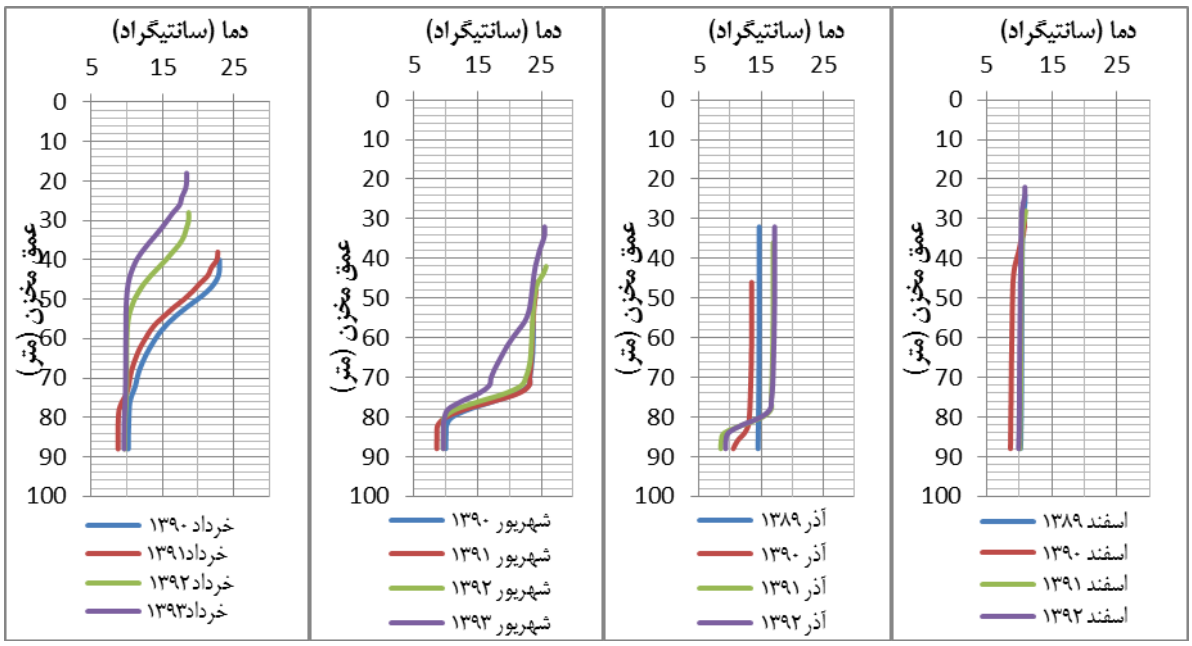


شکل ۶. لایه‌بندی حرارتی تابستان ۱۳۹۰

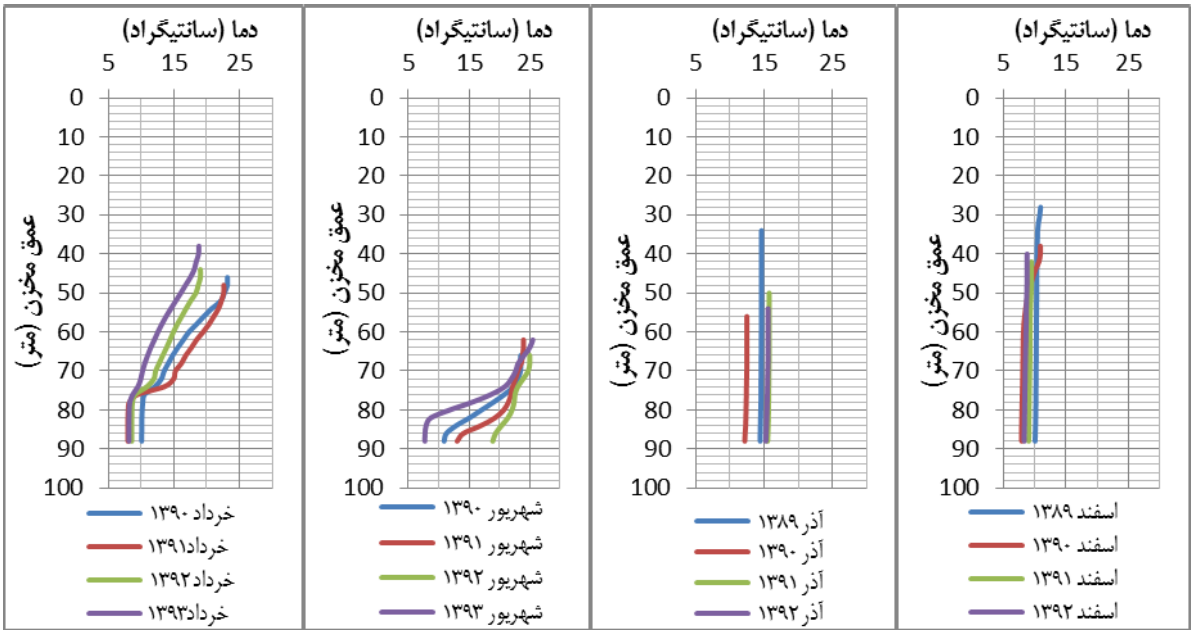
پروفیل‌های تغییرات دما در عمق مخزن سد شهید رجایی در فصول مختلف سال در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده‌اند. برای رسم نتایج، اولین روز از ماه آخر هر فصل به‌منزلهٔ شاخص هر فصل در نظر گرفته شد. پروفیل‌های به‌دست‌آمده در پاییز و زمستان اختلاط کامل حرارتی را در عمق مخزن نشان می‌دهند. لایهٔ سطحی در پاییز و زمستان تحت تأثیر تابش خورشید و تماس با اتمسفر گرم می‌شود، اما لایه‌های عمیق‌تر از منبع اصلی حرارتی حفاظت می‌شوند. انتقال حرارت در سطح مولکولی بسیار کند و نیازمند یک دورهٔ زمانی حدود یک ماه برای انتقال حرارتی در یک مسافت قائم حدود ۱ متر است. یک انتقال بسیار کارآمدتر به وسیلهٔ تنش باد بر سطح دریاچه و انرژی جنبشی حاصل از آن ایجاد می‌شود، که عامل ایجاد گرادیان حرارتی تا عمق حدود ۱۰ متری زیر سطح آب است. در پاییز و زمستان از عمق ۱۰ متر به پایین، مخزن اختلاط کامل دمایی را تجربه می‌کند. شکل‌های ۷ و ۸ نشان می‌دهند با شروع بهار لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد شهید رجایی شروع به شکل‌گیری می‌کند و در تابستان به اوج خود می‌رسد. رولایه و اتمسفر با یکدیگر،حرارت و مواد فرار مانند انواع گاز را مبادله می‌کنند. این لایه تحت تأثیر باد و تغییرات آب و هوایی طی دورهٔ لایه بندی به طور اتفاقی چرخش و اختلاط می‌یابد.

در مقابل، زیرلایه طی دورهٔ لایه‌بندی هیچ‌گونه تبادلاتی با اتمسفر نداشته و انتقال مواد محلول از طریق میان‌لایه و دمالایه که گرادیان چگالی بالایی دارد، بسیار اندک است. در بسیاری از دریاچه ها تنها ته‌نشینی شیمیایی مقدار زیادی از مواد را از میان‌لایه انتقال می‌دهد.

تقریباً در اکثر دریاچه‌ها باد فاکتور قطعی در ضخامت رولایه است. در دریاچه های با سرعت باد خیلی ضعیف، فاکتور های دیگر می‌توانند نقش اصلی را ایفا کنند. یک مثال دریاچهٔ بسیار زلال است که نور می‌تواند در آن بیشتر از عمق اختلاط باد نفوذ کند (Pe´rez, et al., 1999).



شکل ۷. پروفیل دمایی مخزن در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از تاج سد، طی سال‌های آبی ۱۳۸۹- ۱۳۹۳ با فرض استمرار شرایط موجود



شکل ۸. پروفیل دمایی مخزن در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از تاج سد، طی سال‌های آبی ۱۳۸۹ - ۱۳۹۳ با فرض افزایش ۵۰ درصد نیاز آبی

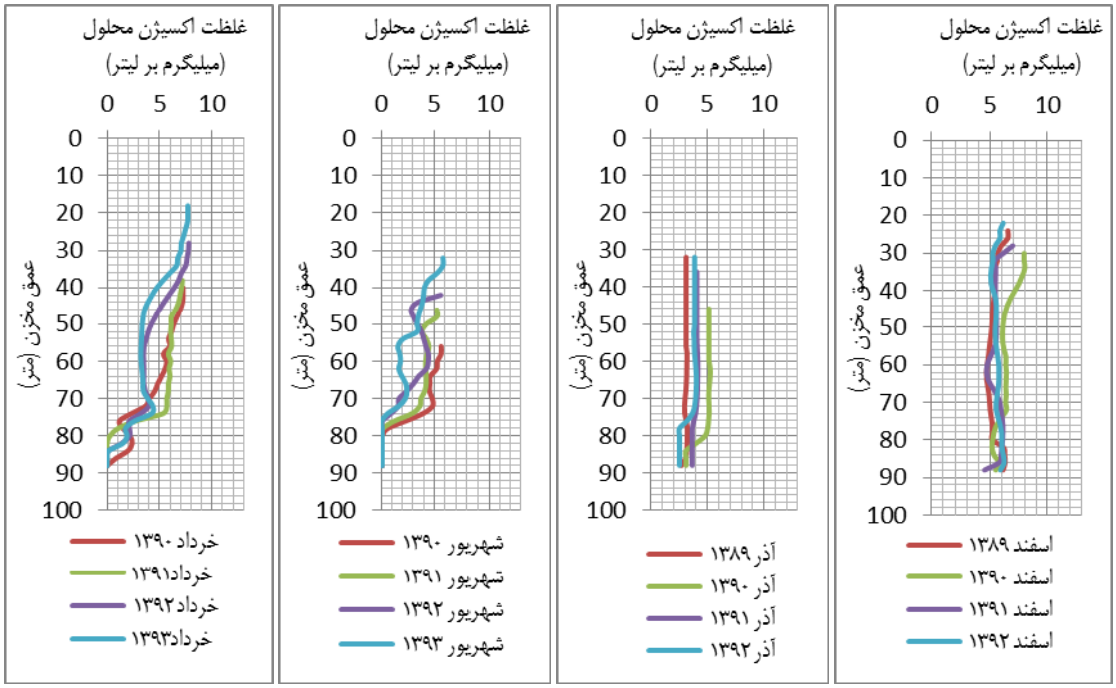
همچنین، حالاتی داریم که پخش مولکولی گرما فاکتور اصلی در ضخامت لایهٔ یخ سطح دریاچه است. در مخزن سد شهید رجایی ضخامت رولایه در دورهٔ لایه‌بندی ثابت نیست. در بهار لایه‌ای کوچک شکل می‌گیرد، که در تابستان به علت جریان ملایم باد به تدریج ضخیم می‌شود. این شرایط تا پاییز که لایه بندی از طریق آب سرد سطحی به تدریج از بین می‌رود، ادامه می‌یابد. در اواخر دورهٔ لایه بندی، مواد محلول زیرلایه مانند مواد مغذی دوباره در رولایه ایجاد می‌شوند. ضخامت رولایه برای بسیاری از ترکیبات موجودات زنده مهم است، بنابراین در مطالعات منابع آب شناخت روش‌های سادهٔ اندازه‌گیری یا تعیین ضخامت رولایه کاربرد بسیار دارد.

در مخزن سد شهید رجایی تراز تخلیهٔ نیروگاه و کشاورزی که به فاصلهٔ ۲۵ تا ۳۵ متری از کف مخزن قرار دارد نیز در شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی این مخزن تأثیرگذار است. تمامی نتایج مخزن سد شهید رجایی در دستهٔ دریاچه‌های مونومیکتیک گرم قرار دارند. دریاچه‌های مونومیکتیک گرم در ترازهای پایین و عرض‌های جغرافیایی کم قرار دارند و دمای دریاچه اکثراً از ٤ درجهٔ سانتی‌گراد پایین‌تر نمی‌رود. در این نوع دریاچه‌ها و مخازن یک بار در تابستان لایه‌بندی حرارتی و یک بار در زمستان اختلاط کامل شکل می‌گیرد. با توجه به موقعیت کشور ما از نظر ارتفاع و موقعیت جغرافیایی، بیشتر سدهای کشور در این ناحیه قرار دارند و بیشتر مخازن و به خصوص مخازن عمیق از جمله سد شهید رجایی در ناحیهٔ مونومیکتیک گرم واقع شده‌اند.

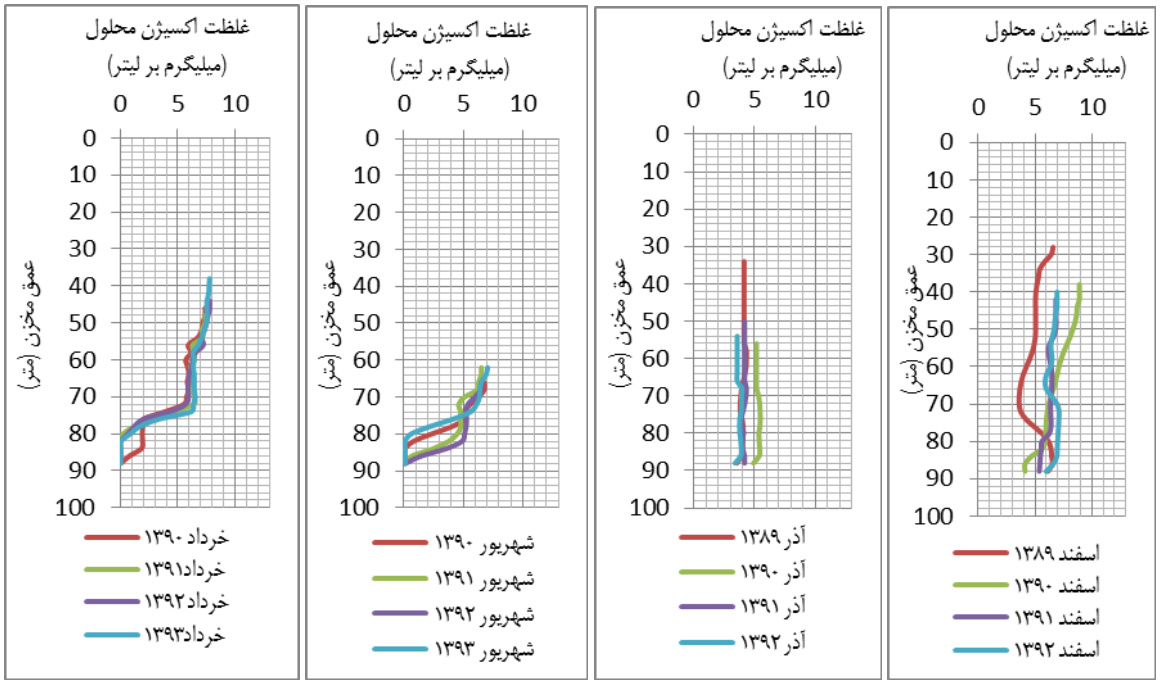
شکل‌های ۹ و ۱۰ غلظت اکسیژن محلول در عمق مخزن سد شهید رجایی را در سال‌های آبی ۱۳۸۹- ۱۳۹۳ نشان می‌دهند. در اکثر فصول سال غلظت اکسیژن محلول در لایه‌های سطحی بیش از ۵ میلی‌گرم بر لیتر است که این مقدار در لایه‌های زیرین با اندکی کاهش روبه‌رو می‌شود. غلظت یکنواخت اکسیژن محلول هنگام اختلاط دمایی و شکست لایه‌بندی در زمستان، از نتایج مدل به وضوح برداشت می‌شود.

طبق پروفیل‌های غلظت اکسیژن محلول با هر دو فرض استمرار وضع موجود و افزایش نیاز آبی، بیشترین غلظت اکسیژن محلول را در بهار و در لایه‌های سطحی آب مخزن داریم که تا حدود ۹ میلی‌گرم بر لیتر نیز مشاهده شده است. در عمق مخزن در تابستان با تقویت لایه‌بندی حرارتی، شرایط بی‌هوازی در اعماق مخزن رخ می‌دهد، اما این ناحیه با شکست لایه‌بندی در پاییز و زمستان از این شرایط خارج می‌شود و لایهٔ بی‌هوازی از بین می‌رود.

روند اختلاط و لایه‌ای‌شدن غلظت اکسیژن محلول هم‌سو با رژیم حرارتی مخزن سد شهید رجایی است و برداشت بیشتر آب مخزن نیز این چرخه را تغییر نمی‌دهد، بلکه با بهبود شرایط بی‌هوازی در کف مخزن همراه است. با توجه به ارقام ارتفاعی دریچه‌های برداشت آب مخزن سد شهید رجایی که در ۲۵ تا ۳۵ متری کف مخزن قرار دارند، افزایش ۵۰ درصدی برداشت آب، نیروی جریانات خروجی را افزایش می‌دهد و اختلاط قائم بیشتری در مخزن تولید می‌کند.



شکل ۹. پروفیل اکسیژن محلول در عمق مخزن در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از تاج سد، طی سال‌های آبی ۱۳۸۹ - ۱۳۹۳ با فرض استمرار شرایط موجود



شکل ۱۰.پروفیل اکسیژن محلول در عمق مخزن در فاصلهٔ ۱۰۰ متری از تاج سد، طی سال‌های آبی ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳ با فرض افزایش ۵۰ درصد نیاز آبی

افزایش ۵۰ درصدی نیاز آبی، تراز آب درون مخزن را تا سال ۱۳۹۳ کاهش می‌دهد، اما با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه همچنان بالاتر از تراز حداقل بهره‌برداری باقی می‌ماند. این کاهش عمق، ضخامت رولایه و میان‌لایه را نیز کاهش می‌دهد، در صورتی که لایهٔ بی‌هوازی کف مخزن همچنان با ضخامت ۱۰ متر باقی می‌ماند. با توجه به بحثی که گذشت رولایه در حیات آبزیان نقش اساسی دارد، زیرا غلظت اکسیژن محلول مناسبی دارد. کاهش ضخامت رولایه به طور مستقیم در حیات آبزیان این ناحیه تأثیر می‌گذارد.

۵. نتایج

مخزن سد شهید رجایی در سال یک بار لایه‌بندی و یک بار اختلاط کامل را تجربه کرده است و در دستهٔ دریاچه‌های مونومیکتیک گرم قرار دارد. این نوع دریاچه‌ها در ترازهای پایین و عرض‌های جغرافیایی کم قرار دارند و متوسط دمای دریاچه هرگز از ٤ درجهٔ سانتی‌گراد پایین‌تر نمی‌رود (Kannel, et al., 2011). در این مخزن در تابستان لایه‌بندی تشکیل می‌شود و در زمستان اختلاط کامل رخ می‌دهد. با توجه به موقعیت کشور ما از نظر ارتفاع و موقعیت جغرافیایی، بیشتر سدهای کشور در این ناحیه قرار دارند و بیشتر مخازن عمیق از جمله سد شهید رجایی در ناحیهٔ مونومیکتیک گرم واقع شده‌اند. در فصول گرم که لایه‌بندی دمایی را داریم، اکسیژن محلول نیز لایه‌بندی را تجربه کرده است و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. در اوج لایه‌بندی حرارتی، مقدار اکسیژن محلول کف مخزن به صفر می‌رسد. در فصول سرد که اختلاط دمایی مخزن را داریم اکسیژن محلول نیز در کل مخزن همگن است. بنابراین، لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد شهید رجایی می‌تواند یکی از علت‌های ایجاد شرایط بی‌هوازی در عمق مخزن و جلوگیری از انتقال قائم اکسیژن محلول در عمق باشد.

با فرض استمرار وضعیت موجود و افزایش ۵۰ درصدی برداشت آب تا سال ۱۳۹۳ نیز این مخزن همچنان در دستهٔ دریاچه‌های مونومیکتیک گرم باقی می‌ماند. غلظت اکسیژن محلول طی دورهٔ شبیه‌سازی ۳ سال آتی همچنان از تغییرات درجهٔ حرارت پیروی و چرخهٔ سالانهٔ لایه‌بندی تابستانه و اختلاط کامل زمستانه را طی می‌کند.

غلظت اکسیژن محلول کف مخزن در تابستان در لایه‌ای به ضخامت کمتر از ۱۰ متر صفر می‌شود و افزایش

۵۰ درصد برداشت آب مدت این شرایط بی‌هوازی را کاهش می‌دهد.

٦. پیشنهادها

با توجه به تراز آب در مخزن سد شهید رجایی و گاه، وقوع سرریز در فصول پرآبی (سرریز این سد از نوع آزاد است، بنابراین با وقوع سرریز نیروی اختلاطی قائمی در عمق مخزن ایجاد نمی‌شود) پیشنهاد می‌شود در این فصول با برداشت بیشتر آب از دریچه‌های تحتانی مخزن به ایجاد نیروی اختلاط قائم قوی‌تر و کاهش مدت حضور شرایط بی‌هوازی درکف مخزن کمک شود.

اندازه‌گیری‌های منظم کیفی در سطح و عمق مخزن گام مهمی در تدوین الگوی مدیریتی مناسب این مخزن است. افزایش اطلاعات میدانی امکان پیش‌بینی درازمدت شرایط مخزن سد شهید رجایی را فراهم خواهد کرد و بازهٔ اطمینان تصمیمات را افزایش خواهد داد.

پیشنهاد می‌شود در مدل‌سازی دوبعدی سایر مخازن استان مازندران از مدل CE-Qual-W2 استفاده شود تا از نتایج این پژوهش‌ها الگوی یکپارچهٔ مدیریتی برای مخازن مناطق معتدل و مرطوب کشور تعیین شود.

تشکر و قدردانی

با تشکر از شرکت آب منطقه‌ای استان مازندران که آمار و اطلاعات به‌کاررفته در این پژوهش را فراهم کرد و همچنین این پژوهش با حمایت مالی این شرکت شکل گرفت.

یادداشت‌ها

1. Segment
2. Epilimnion
3. Hypolimnion
4. Thermocline
5. Metalimnion

منابع

آب منطقه‌ای استان مازندران، (۱۳۹۰). طرح آب‌رسانی به ساری.

ادارهٔ کل هواشناسی استان مازندران، (۱۳۸٦). طرح مطالعاتی هواشناسی حوزهٔ آبخیز کلیجان رستاق شهرستان ساری.

دهقان، ج، (۱۳۸۰). *لایه‌بندی حرارتی در مخازن متوالی، مطالعهٔ موردی مخازن سدهای کارون یک، دو و سه*، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، رشتهٔ مهندسی محیط‌زیست، دانشگاه علم و صنعت ایران.

سلطانی، ج.؛ علوی‌مقدم، م، (۱۳۸٤). «تجربیات حاصل از مطالعات تأثیر لایه‌بندی حرارتی در کیفیت آب تعدادی از سدهای کشور»، دوازدهمین کنفرانس دانشجویی مهندسی عمران.

وزارت نیرو، (۱۳۸۹). گزارش مطالعات لایه‌بندی حرارتی مخازن، مطالعات مرحلهٔ دوم طرح سد مخزنی و نیروگاه برقابی خرسان سه، شرکت توسعهٔ منابع آب و نیروی ایران.

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»، مجلهٔ *محیط‌شناسی*، سال سی و ششم، شمارهٔ ٥٤، صص ۱۱– ۱۸.

نظری‌ها، م.؛ علی‌نژاد، س، (۱۳۸۱). «برنامه‌ریزی جهت به‌سازی و کاهش نشان‌زدهای منفی زیست‌محیط سد شهید رجایی»، مجلهٔ *محیط‌شناسی*، سال بیست و هشتم، شمارهٔ ۳۰، صص ۹– ۱۸.

Boehrer,B.,et al. 2005. Path of the 2002 M ulde flood through Lake Goitsche, Germ any. Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie,No.29, pp:369–372.

Chung,S.W., J.K.,Oh.2006. Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic reservoir in a monsoon climate area. Journal of Water Science and Technology, No.54, pp:29-37

Cole,T.M., S.A.,Wells.2008. C E-QUAL-W2 a two-dim ensional, laterally averaged, hy drodynamic and water quality model, Version 3.6, User Manual, Washington, DC.

Imboden,D.M., A.,Wu¨est.1995. Mixing mechanisms in lakes, in Physics and Chemistry of Lakes, Springer

Kannel,P.R.,et al. 2011. A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams. Journal of Environ Model Assess, No.16, pp:183–204.

Pe´rez-Fuentetaja,A.,et al. 1999.Significance of dissolved organic carbon in the prediction of therm ocline depth in small Canadian shield lakes. Journal of Aquatic Ecology, No.33(2), pp:127–133.