پژوهش‌های محیط‌زیست، سال 5، شماره 9، بهار و تابستان 1393، از صفحه 125 تا 136

مدیریت کیفیت آب خروجی از مخزن سد کرخه با انتخاب تراز تخلیه مناسب

نجمه رضازاده*[1]، مهرداد نظریها[2]، امین سارنگ[3]

1 دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی محیطزیست، دانشگاه تهران
2 استادیار مهندسی محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران
3 استادیار مهندسی محیطزیست، دانشکده محیطزیست، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: 1391/2/9؛ تاریخ تصویب: 1393/4/30)

چکیده

بشر برای فایق آمدن به مشکلات کمبود آب ناشی از رشد جوامع و پیشرفت و صنعتی‌شدن، به احداث سدها و ذخیره کردن آب‌های سطحی در پشت این سدها روی آورد. اما، از آن‌جایی که ویژگی‌های اقلیمی منطقه، کمیت و کیفیت آب ورودی به مخازن و همچنین تبخیر آب از سطح مخزن، ساکن بودن آب و لایه‌بندی حرارتی روی کیفیت و ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب مخازن اثر می‌گذارد، آگاهی از چگونگی تغییرات کیفی آب در بازه زمانی درازمدت، امری مهم به شمار می‌رود. بررسی دراز مدت شرایط کیفی آب در لایه‌های مختلف مخزن می‌تواند به تشخیص بهترین لایه برای آبگیری کمک نماید و وضعیت مخزن را نیز بهبود بخشد. در این تحقیق، مخزن سد کرخه تحت مطالعه و بررسی قرار گرفته و سعی شده است وضعیت دمایی و اکسیژن محلول لایه‌های مختلف مخزن در یک دوره 40 ساله بررسی شود. برای شبیه‌سازی رفتار مخزن با توجه به شرایط موجود مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 مناسب‌ترین مدل تشخیص داده شده و با کمک این مدل ریاضی پروفیل عمقی دما و اکسیژن محلول به دست آمده است. نتایج حاکی از یک دوره لایه‌بندی شدید از اواسط خردادماه تا اواخر مهرماه در کلیه سال‌ها و یک لایه‌بندی به نسبت ضعیف در فروردین و اردیبهشت و آبان است. همچنین، در اواخر بهمن نیز مخزن دچار پدیده واژگونی دما می شود. وضعیت اکسیژن محلول نیز متاثر از وضعیت دمایی در ماه‌هایی با لایه‌بندی شدید دارای نوسانات عمقی فاحش و در زمان واژگونی به‌صورت یکنواخت در عمق است. در نهایت این که با توجه به نیاز پایین دست نتیجه می‌شود: لایه بین 170 تا 180 متر بهترین لایه برای آبگیری در ماه‌هایی با لایه‌بندی شدید است و در زمان واژگونی نیز با توجه به یکنواخت بودن اکسیژن محلول در عمق، تراز آبگیری اهمیت چندانی ندارد.

کلید واژه‌ها: سد کرخه، CE-QUAL-W2، لایه‌بندی حرارتی، شبیه‌سازی اکسیژن محلول، تراز تخلیه

*نویسنده مسئول: Email: n.r_civil@yahoo.com

سرآغاز

در پی رشد صنعتی جوامع، دریاچه‌های طبیعی به عنوان اصلی‌ترین منبع تأمین آب جوامع گذشته، نه به لحاظ کمی و کیفی و نه به لحاظ جغرافیایی، دیگر جوابگوی خواست‌ها و نیازهای بشر نبودند. در این راستا، بشر نیز به منظور فایق آمدن بر این مشکل به ساخت سدهای کوچک و بزرگ روی آورد. به گفته کرمانی و ناصری ویژگی‌های طبیعی حوزه آبریز، کمیت و کیفیت آب‌های ورودی به مخازن سدها، ویژگی‌های اقلیمی منطقه (درجه حرارت، وزش باد، میزان نزولات جوی و مانند آن) و میزان فعالیت‌های مختلف انسان در حوزه آبریز از جمله عواملی هستند که کیفیت آب این مخازن را تحت تاثیر قرار می‌دهند (کرمانی و ناصری ،1381). از طرف دیگر، احداث سد و ذخیره کردن جریان سطحی، خود می‌تواند به سبب مجموعه عواملی مانند تبخیر، ساکن بودن آب، لایه‌بندی حرارتی در مخزن، رسوب‌گذاری، غنی شدن آب دریاچه از عناصر غذایی و سایر آن سبب تغییر در ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب مخزن شود. بنابراین، آگاهی از چگونگی تغییرات کیفیت آب در دوره های مختلف سال و در سطح بالاتر در سال‌های مختلف از لحاظ وضعیت آبدهی رودخانه، می‌تواند کمک موثری در انتخاب بهترین تراز آبگیری و در نتیجه مدیریت کیفی آب نماید (خیامی و همکاران، 1387).

بنابر تحقیقی که توحیدی در رابطه با عوامل موثر بر تغییرات کیفی آب مخزن یک سد انجام داده است، دمای آب بر روی نوع و میزان فعالیت گونه‌های بیولوژیکی، انحلال گازها، سرعت واکنش‌های شیمیایی و سرعت رسوب‌گذاری تاثیر می‌گذارد. به طوری که، به ازای افزایش10 درجه سانتیگراد، کلیه سرعت واکنش‌های شیمیایی و بیوشیمیایی دو برابر می‌شود (توحیدی، 1377). در فصل تابستان، به علت بالا بودن درجه حرارت و شدت تابش نور خورشید، رشد جلبک‌ها در لایه‌های سطحی افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند کیفیت آب را از نظر رنگ، بو و طعم دچار تغییرات زیادی نماید. از طرف دیگر، به دلیل کاهش انحلال اکسیژن در آب و زیاد شدن سرعت تجزیه مواد تجمع یافته در رسوبات، شرایط در ترازهایی از مخزن آب می‌تواند کاملاً بی‌هوازی و منجر به تشکیل ترکیبات مولد بوها و یا طعم نامطبوع شود. آبگیری از لایه‌های مذکور و انتقال این گونه آب‌ها به تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی نه تنها میزان مصرف مواد شیمیایی و هزینه‌های تصفیه را افزایش می‌دهد، بلکه در برخی مواقع شکایت مردم را نیز به دنبال خواهد داشت. بنابراین، با آگاهی از شرایط کیفی آب در لایه‌های مختلف مخزن، می‌توان بهترین لایه را از لحاظ کیفی تشخیص داده و اقدام به آبگیری از آن تراز نمود .در این مورد می‌توان به کار حیدری ژاله و همکاران در سال 1387، شاره کرد که با تلفیق رویکردهای سازه‌ای و غیرسازه‌ای مدلی برای بهینه‌سازی تراز و ظرفیت دریچه‌های مخزن سد 15خرداد ارایه کرده‌اند (حیدری ژاله و همکاران، 1387).

برای شبیه‌سازی مخازن می‌توان از مدل‌های کیفی متفاوتی بهره گرفت. به طورکلی، مدل‌های کیفی متنوعی در جهت بررسی و پیش بینی کیفیت آب در مخازن سدها موجود می باشد که با توجه به ویژگی‌های آن‌ها (مانند: میزان دقت محاسباتی، وسعت و نوع داده‌های مورد نیاز، نوع کاربری مدل) و شرایط موجود، می‌توان بهترین مدل را برای سیستم آبی مورد نظر انتخاب نمود. از مهم‌ترین مدل‌ها می‌توان به مدل‌هایی چون HEC-5Q, DYRESEM, CE-QUAL-W2, WQRRS و WASP اشاره کرد. از بین این مدل‌ها، مدل CE-QUAL-W2 انتخاب می‌شود. زیرا، مدل WASP قادر به شبیه‌سازی دما نیست و نیز امکان معرفی سازه‌های کنترلی مانند سرریزها برای آن وجود ندارد. مدل‌های HEC-5Q, DYRESEM, WQRRS نیز به صورت یک بعدی عمل می‌کنند و توانایی شبیه‌سازی تغییرات در عمق را دارند و با توجه به این که فاصله دو خروجی سد (تونل دشت عباس و خروجی آبگیر نیروگاه) مقدار قابل توجهی است و پیش بینی می‌شود که کیفیت آب در این فاصله تغییرات قابل توجهی داشته باشد، بنابراین استفاده از این مدل‌ها نیز توصیه نمی‌شود. با استفاده از مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 می‌توانیم شکل واقعی‌تری از مخزن را برای شبیه‌سازی تعریف کنیم. همچنین، باید گفت این نرم‌افزار به علت استفاده از الگوریتم تعیین گام‌های زمانی، میزان خطای عددی کمتری تولید می‌کند (Cole & Wells, 2008).

در دهه گذشته، محققان زیادی از مدل CE-QUAL-W2 در طرح‌های پژوهشی و اجرایی خود استفاده کرده‌اند که حکایت از کارایی مدل فوق در مدل‌سازی مخازن دارد. ارتقای پیوسته مدل و وجود نسخه‌ها و ویرایش‌های مکرر آن نشان از علاقه وافر محققان به استفاده از مدل فوق دارد. Wells و Annear از

نسخه 3 مدل سه بعدی CE-QUAL-W2 برای مدل کردن دما در یک سیستم رودخانه و مخزن به منظور بررسی استراتژی‌های مدیریتی جهت تأمین الزامات کمی و کیفی جامعه ماهیان، استفاده کردند(Annear & Wells, 2002).

Jan-Tai و همکاران از نسخه 3 این مدل برای مدلسازی کیفی آب برای تعیین استراتژی‌های مدیریت کیفی در مخزن Feitsui در شمال تایوان استفاده کردند (Jan-Tai et al., 2002). همچنین، مدل‌سازی دریاچه Powell (Williams, 2007)، مخزن یک دریاچه مونومیکتیک (Chung & Oh, 2006)، شبیه‌سازی مخزن شیمن توسط ری (Rey et al., 2004)، دریاچه Henry Hagg (Sullivan & Round, 2005) و مهندسان بخش کنترل کیفی آب ارتش آمریکا نمونه‌هایی از کاربرد CE- QUAL- W2 در مخازن و رودخانه‌هاست (U.S.Army Corps of Engineers , 2009). ZHU و همکارانش نیز با تلفیق دو مدل CE- QUAL- W2 و AGNPS به پیش‌بینی رفتار مخازن پرداختند (ZHU et al., 2009).

مخزن سد در دست احداث بختیاری نیز توسط دانایی با کمک مدل CE- QUAL- W2 مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، با در نظر گرفتن سه سناریوی سال‌های خشک، تر و نرمال، به بررسی عوامل موثر بر شدت لایه‌بندی پرداخته و مشاهده شده است که شدت لایه‌بندی با توجه به زمان ماند بیشتر آب در سال خشک، بیشتر بوده است (دانایی، 1387).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، سد مخزنی کرخه که در حدود 20 کیلومتری شمال‌غربی شهر اندیمشک بر روی رودخانه کرخه و در 12 کیلومتری بالادست پای پل واقع شده، مورد بررسی قرار گرفته است. رودخانه کرخه در بالادست محور سد حدود 90 درجه تغییر جهت داده و سبب شده است تا دریاچه سد در سمت راست، در فاصله کمی از محور سد قرار گیرد. ایستگاه هیدرومتری پای پل نزدیک‌ترین ایستگاه به ساختگاه سد است. با توجه به اختلاف ناچیز مساحت حوزه آبریز ایستگاه پای پل با سد، از اطلاعات آن به عنوان اطلاعات پایه هیدرولوژیکی سد استفاده شده است. شکل (1)، حوزه آبریز رودخانه کرخه را نشان می‌دهد.

شکل (1): حوزه آبریز رودخانه کرخه (شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، 1371)

میزان آبدهی متوسط سالانه رودخانه با استفاده از آمار 33 ساله، 177 متر مکعب در ثانیه معادل 5580 میلیون متر مکعب در سال می‌باشد. رودخانه پایین دست سد کرخه برای مصارف شهری، تولید آب مورد نیاز برای نیروگاه تولید برق، محیطزیست و آبیاری اراضی پایین دست سد تا هورالعظیم می‌باشد (مهندسی مشاور مهاب قدس، 1369).

سایر مشخصات سد عبارتند از:

نوع سد: خاکی با هسته رسی

طول تاج سد: 3030 متر

ارتفاع سد: 127 متر

حداکثر تراز سطح آب در هنگام وقوع سیل: 230/7 متر بالاتر از سطح دریا

تراز نرمال: 220 متر بالاتر از سطح دریا

حداقل تراز بهره بردار برای نیروگاه: 178 متر بالاتر از سطح دریا

حجم مخزن در تراز نرمال: 5900 میلیون متر مکعب (مهندسی مشاور مهاب قدس، 1377).

روش پژوهش

ابتدا، محدوده مورد مطالعه مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تصویر کلی از وضعیت موجود مخزن سد ارایه شود. بدین منظور در یک برنامه پایش (14ماهه- اردیبهشت 1384 تا تیر 1385) داده‌های هیدرولوژیکی و کیفی مربوطه جمع‌آوری و با کمک گرفتن از مطالعات منابع آب سد، اطلاعات کمی و کیفی مورد نیاز در یک دوره 40 ساله (سال‌های 1345 تا 1385) استخراج شد. مرحله بعدی در انجام تحقیق، شبیه‌سازی کیفیت مخزن می‌باشد. در این مرحله، ابتدا مدل‌های موجود و در دسترس مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، با در نظر گرفتن مسایل کیفی موجود در منطقه، ساختار فیزیکی و ویژگی هیدرودینامیکی مخزن سد کرخه، اهداف کوتاه‌مدت و درازمدت مطالعه، و قابلیت‌های مدل‌های بررسی شده، مدل مناسب انتخاب شد. سپس با داده‌های موجود 14 ماهه شبیه‌سازی دما و اکسیژن محلول انجام شده است. از اطلاعات موجود 7 ماهه اول، برای واسنجی مدل و از 7 ماهه دوم برای صحت‌سنجی استفاده شد. جدول (1)، خطاهای واسنجی و صحت‌سنجی مدل را برای دما نشان می‌دهد.

جدول (1): خطاهای واسنجی و صحت‌سنجی دما

زمان مورد بررسی	میانگین خطا (درجه سانتیگراد)	انحراف معیار (درجه سانتیگراد)
واسنجی	0/51	0/71
صحت‌سنجی	1/41	1/86

پس از به‌دست آوردن اطمینان از صحت مدل ساخته شده از مدل برای شبیه‌سازی دراز مدت 40 ساله استفاده شد. برای انجام این مرحله با توجه به نمودار دبی متوسط درازمدت و دبی ورودی هر سال به رودخانه، کلیه سال‌ها به 7 زیر مجموعه (که تمامی شرایط موجود 40 ساله را تحت بررسی قرار دهند) تقسیم شدند. شکل (2)، میزان تغییرات سالانه دبی ورودی به مخزن سد کرخه را نشان می‌دهد.

برای هر یک از این 7 زیرمجموعه یک سناریو تعریف می‌شود که این سناریوها عبارتند از:

سناریو 1: سال‌های خیلی خشک شامل سال‌های 45، 62، 69 و 80

سناریو 2: سال‌های خیلی خشک پشت سرهم شامل سال‌های 77، 78 و 79

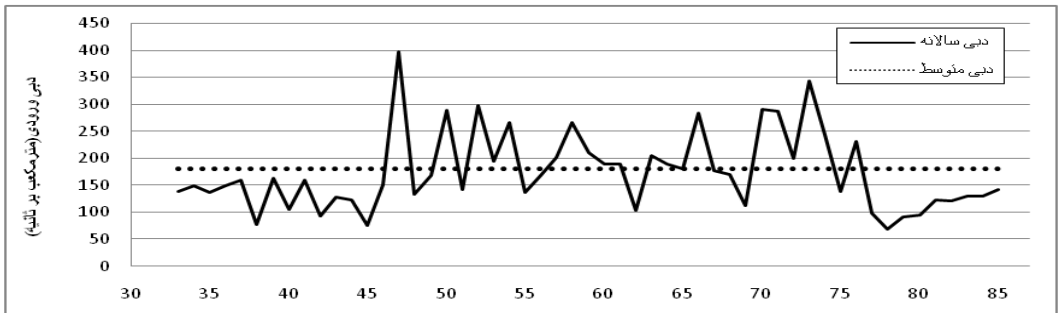
سناریو 3: سال‌های نرمال شامل سال‌های 49، 53، 56، 57، 59، 60، 61، 63، 64، 65، 67، 68 و 72

سناریو 4: سال‌های خیلی مرطوب شامل سال‌های 47 و 73

سناریو 5: سال‌های مرطوب شامل سال‌های 50، 52، 54، 58، 66، 74 و 76

سناریو 6: سال‌های مرطوب پشت سرهم شامل سال‌های 70 و 71

سناریو 7: سال‌های خشک شامل سال‌های 46، 48، 51، 55، 75، 81، 82، 83، 84 و 85



شکل (2): تغییرات سالانه دبی ورودی به مخزن سد کرخه

یافته‌ها

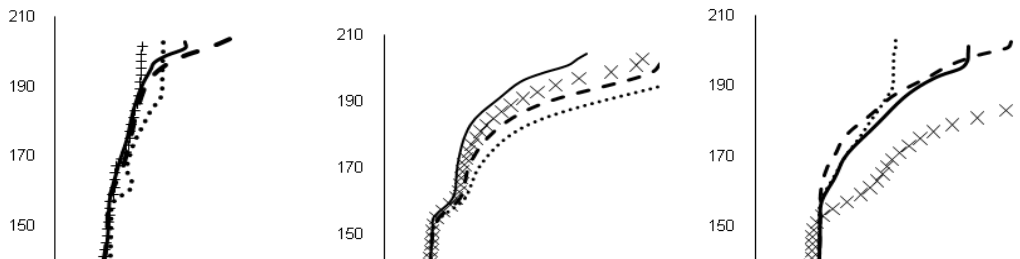
الف- لایه‌بندی حرارتی در داخل مخزن

برای اندازه‌گیری‌های به‌عمل آمده و نتایج مدل‌سازی‌ها که در شکل‌های (3 تا 10) آمده است، مشاهده می‌شود در تمامی سناریوهای موجود، مخزن سد کرخه دارای یک دوره لایه‌بندی حرارتی شدید می‌باشد که عمق ترموکلاین در آن به 30 متر نیز می‌رسد و از اواسط خرداد ماه شروع شده و تا اواخر مهرماه ادامه می‌یابد. با سرد شدن تدریجی هوا، سطح آب سردتر شده و اختلاف دمایی آن با عمق کاهش می‌یابد و سبب کاهش لایه‌بندی حرارتی می‌شود. در این دوره که معمولا آبان ماه و اوایل دی ماه را شامل می‌شود، لایه‌بندی ضعیف شده و کم کم از بین می‌رود. در ماه‌های بهمن و اسفند، اختلاط در مخزن رخ می‌دهد. با شروع دوره گرم از اوایل فروردین مخزن به تدریج وارد لایه‌بندی ضعیف شده و همان‌گونه که قبلا ذکر شد، از اواسط خرداد ماه لایه‌بندی شدت می‌گیرد. لازم به ذکر است در این مخزن لایه‌بندی زمستانی ایجاد نشده است. زیرا، به گفته دانش و همکاران لایه‌بندی حرارتی در فصل زمستان زمانی تشکیل می‌شود که آب لایه سطحی به علت سرد بودن هوا به صفر درجه برسد و بر اثر یخزدگی سبک‌تر از لایه‌های عمقی شود (دانش و همکاران، 1387). چنان‌که در جدول (2) متوسط درازمدت درجه حرارت هوا در منطقه را نشان می‌دهد، مشاهده می‌شود، حداقل دما 6/4 درجه سانتیگراد بوده است. بنابراین، وجود شرایط دمایی بالای صفر درجه از لایه‌بندی زمستانه جلوگیری کرده است.

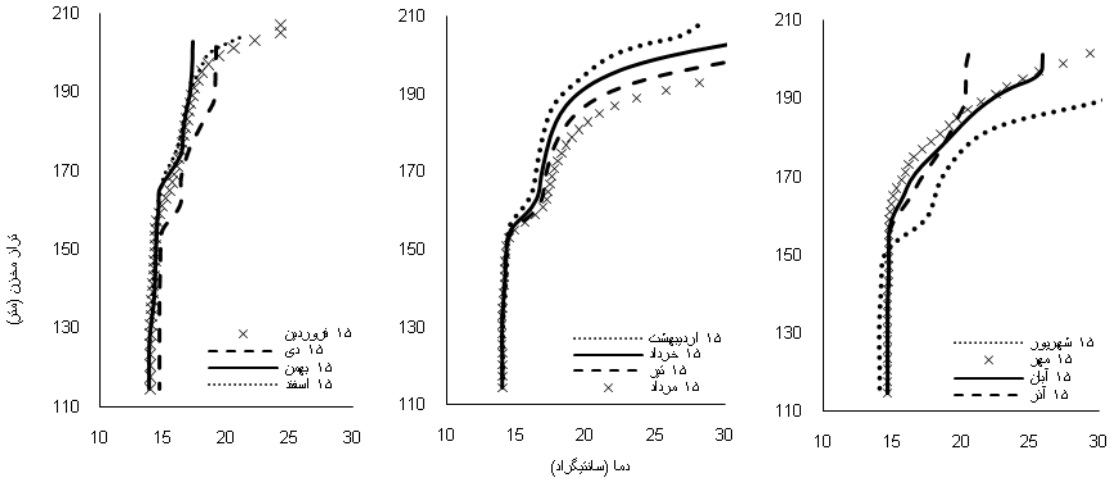
جدول (2): متوسط درازمدت درجه حرارت هوا (سانتیگراد) در منطقه سد کرخه (مهندسی مشاور مهاب قدس 1371)

	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	میانگین
متوسط حداکثر	/3 35	/4 26	/5 19	/8 17	/8 19	/1 24	30/1	37/6	/7 43	46	45	42	32/3
متوسط روزانه	/4 26	/3 19	/7 13	/1 12	/7 13	/4 17	22/9	29/5	/4 34	36/8	36	32/5	24/6
متوسط حداقل	/4 17	/1 12	7/8	6/4	7/6	/6 10	15/6	21/4	/1 25	27/6	/9 26	22/9	16/8

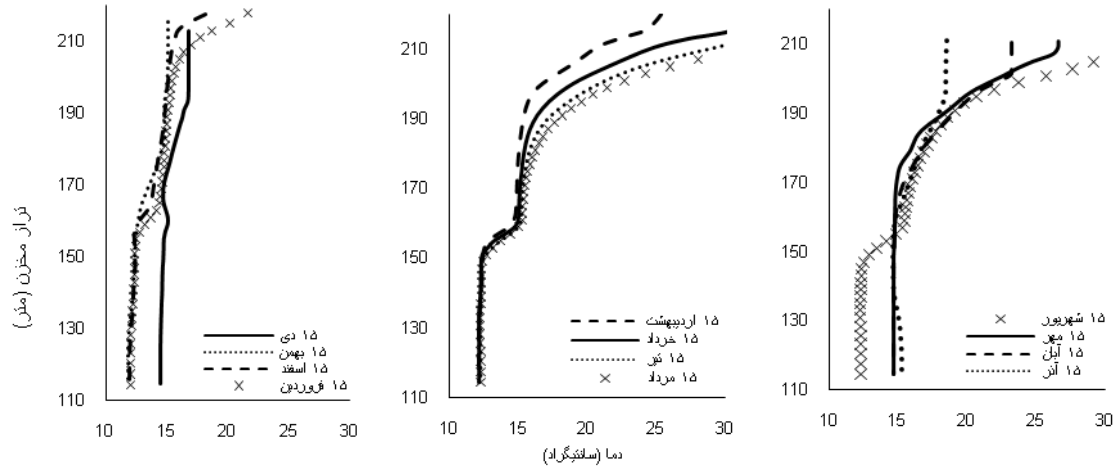
وجود اختلاف دما بین لایه‌های مختلف، بر ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آن‌ها اثر گذاشته و کیفیت آب را در لایه‌های مختلف متفاوت می‌سازد. برای مثال: طی دوره تابستان، رشد جلبک‌ها در تراز بالایی آب به میزان زیادی افزایش می‌یابد که این امر می‌تواند رنگ، بو و طعم آب استحصالی از این لایه‌ها را به شدت تحت تاثیر قرار دهد. کم‌کم با فرا رسیدن پاییز و آغاز دوره سرما و کاهش دمای هوا و دمای آب ورودی به مخزن و ایجاد فرآیند اختلاط کیفیت آب مخزن در تمام عمق یکنواخت شده و انتخاب تراز آبگیری اهمیت چندانی ندارد و آبگیری می‌تواند از هر ترازی انجام گیرد. نکته قابل ذکر در نمودارهای بالا مربوط به وضعیت حرارتی در سناریوی 2 است که شرایط خشک‌سالی برای مدت زیادی بر منطقه حاکم است. در این وضعیت همان طور که در شکل (4) دیده می‌شود، اختلاط در مخزن روی نمی‌دهد و در کل سال لایه‌بندی ایجاد شده و سبب نامناسب شدن شرایط کیفی آب می‌شود.



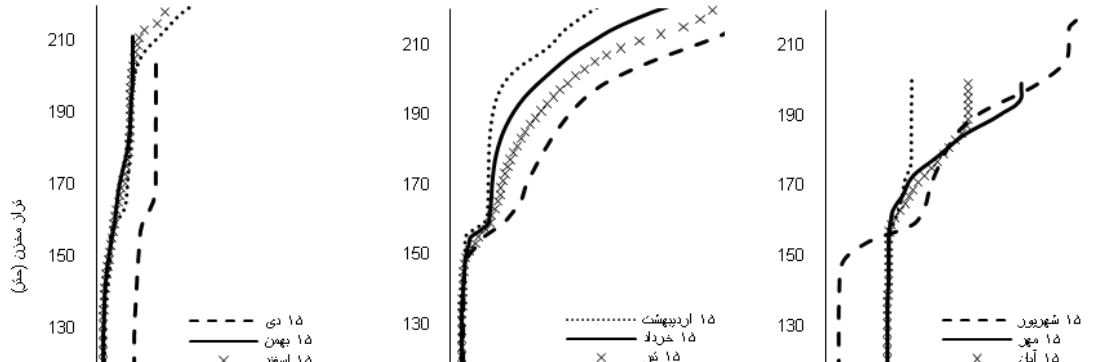
شکل (3): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 1



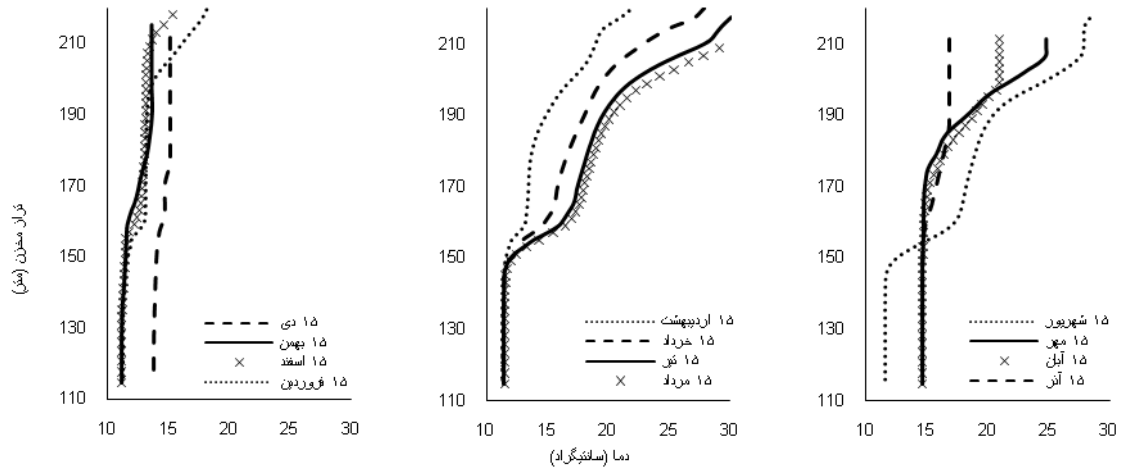
شکل (4): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 2



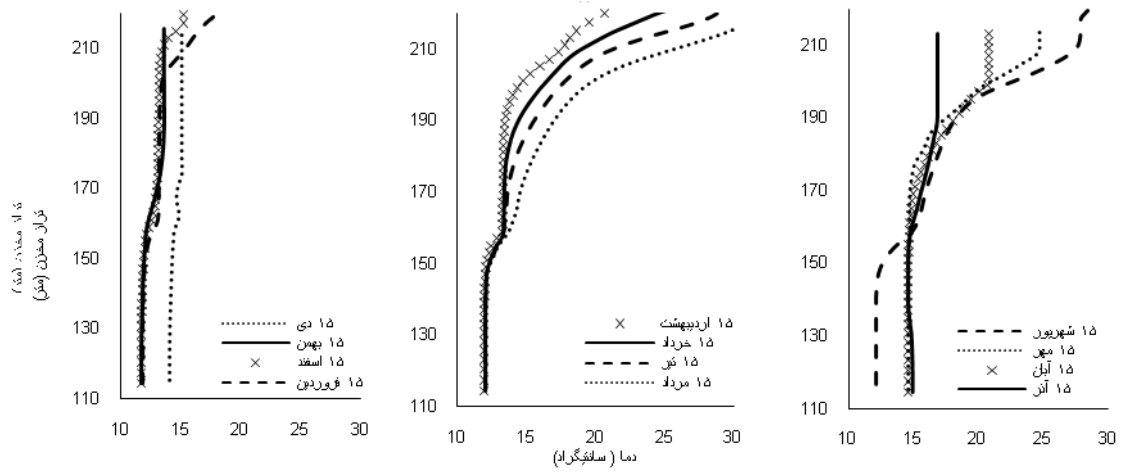
شکل (5): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 3



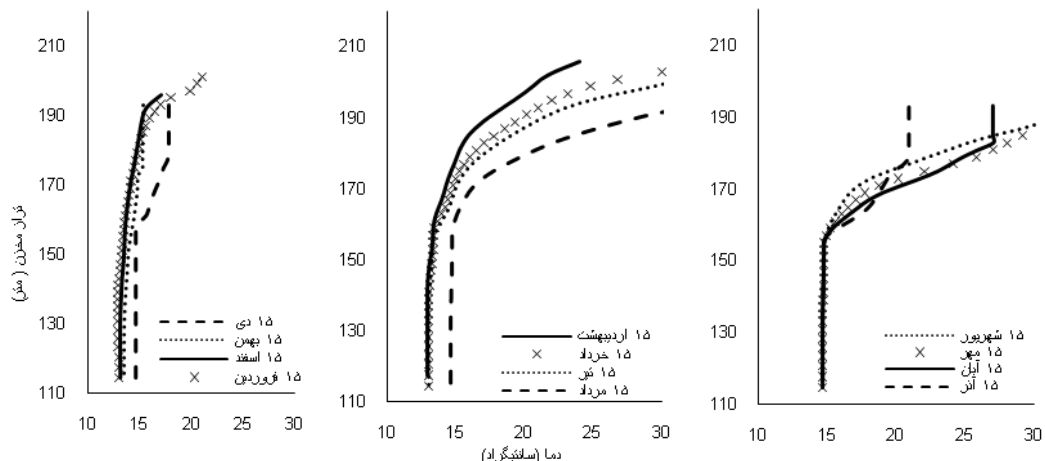
شکل (6): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 4



شکل (7): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 5



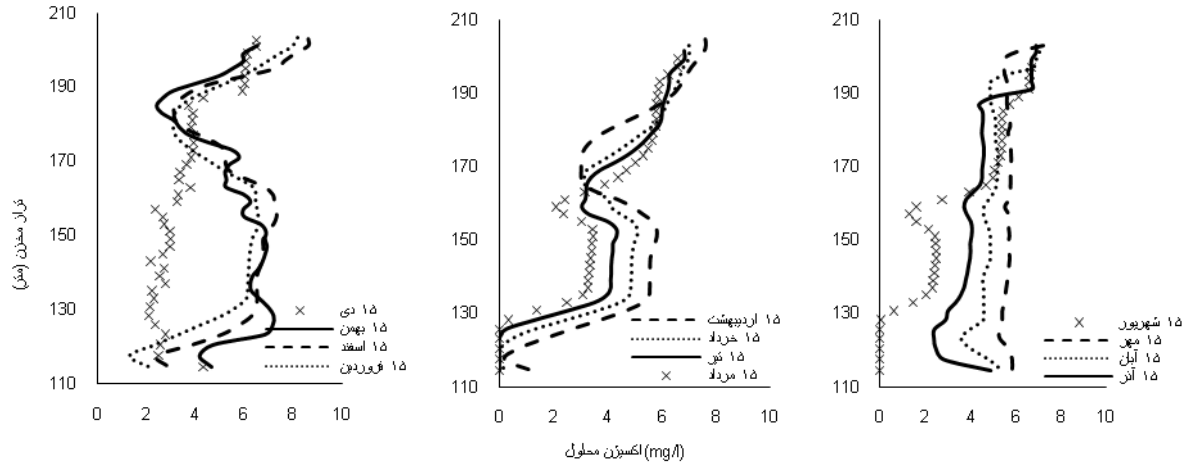
شکل (8): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 6



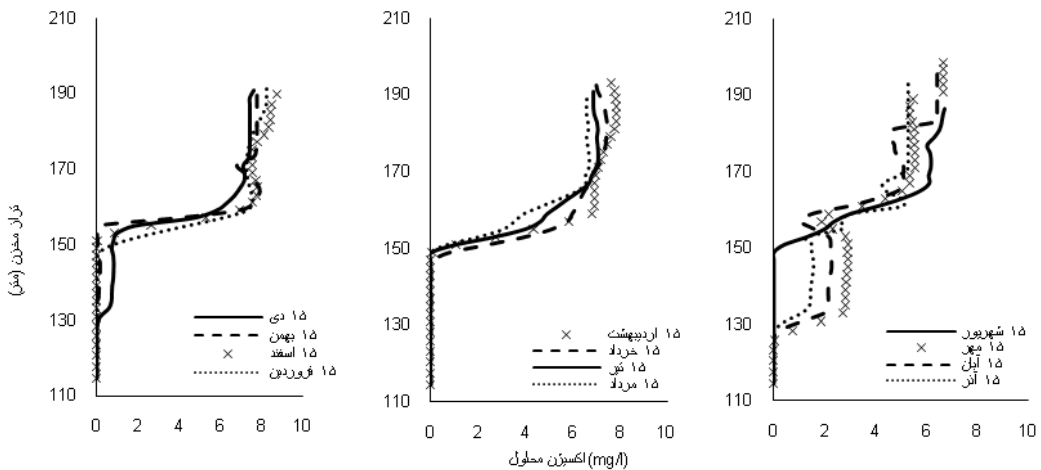
شکل (9): پروفیل دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 7

ب- تغییرات اکسیژن محلول در داخل مخزن

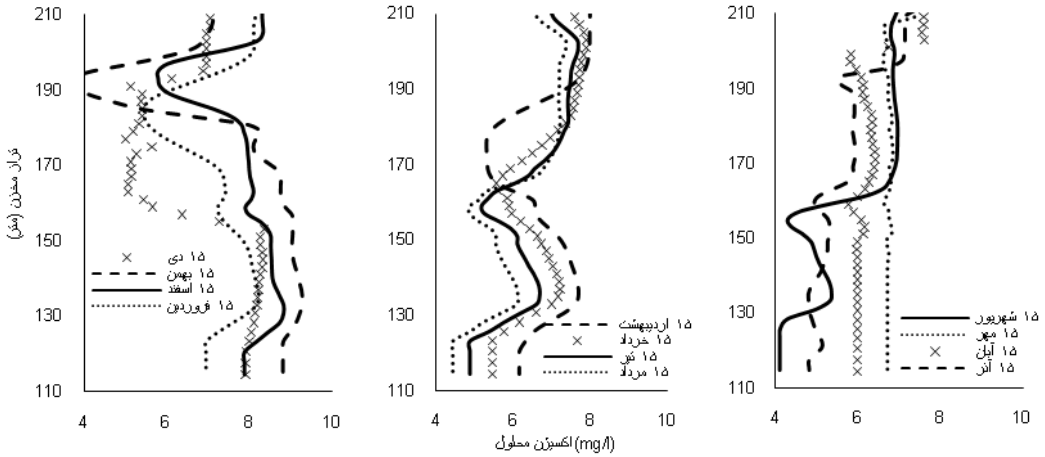
براساس اندازه‌گیری‌های به عمل آمده و نتایج شبیه‌سازی‌ها که در اشکال (10 تا 16) نشان داده شده است، نحوه تغییرات اکسیژن محلول در اعماق مشابه دما بوده و زمانی که فرایند اختلاط در مخزن رخ داده است، یکنواخت شدن کیفیت آب در کل مخزن شده است (ماه‌های بهمن و اسفند) همچنین، در ماه‌هایی که لایه‌بندی حرارتی به وقوع پیوسته است، یعنی از اواسط خرداد تا اواخر مهر تفاوت DO در لایه‌های تشکیل شده قابل توجه بوده و به 9 میلی‌گرم بر لیتر نیز می‌رسد. در سال‌های نرمال، مرطوب و خیلی مرطوب که سناریوهای 3، 4، 5 و 6 را شامل می‌شود، شرایط بی‌هوازی ایجاد نشده و اختلاف DO در عمق کمتر است. اما، در سال‌های خشک و خیلی خشک (سناریوهای 1 و 7) در چهار ماه از سال که همزمان با تشکیل لایه‌بندی شدید در مخزن است، اختلاف DO زیادی در عمق مشاهده می‌شود که تراز آبگیری از سد در این ماه‌ها اهمیت می‌یابد. قابل ذکر است؛ در شرایطی که وضعیت سال خشک چندین سال پشت سر هم حاکم باشد (سناریو 2)، شرایط اکسیژن محلول در سد بسیار بحرانی شده و حتی منجر به ایجاد شرایط بی‌هوازی در کف مخزن برای مدت یک‌سال می‌شود.



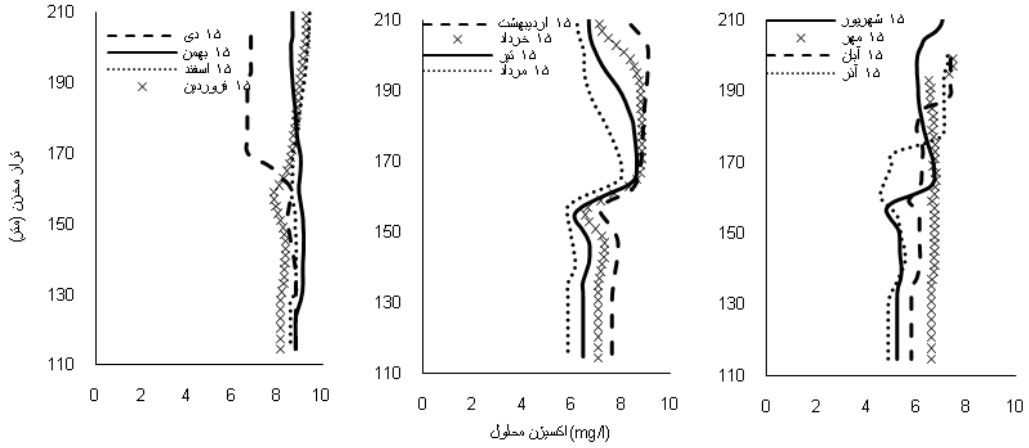
شکل (10): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 1



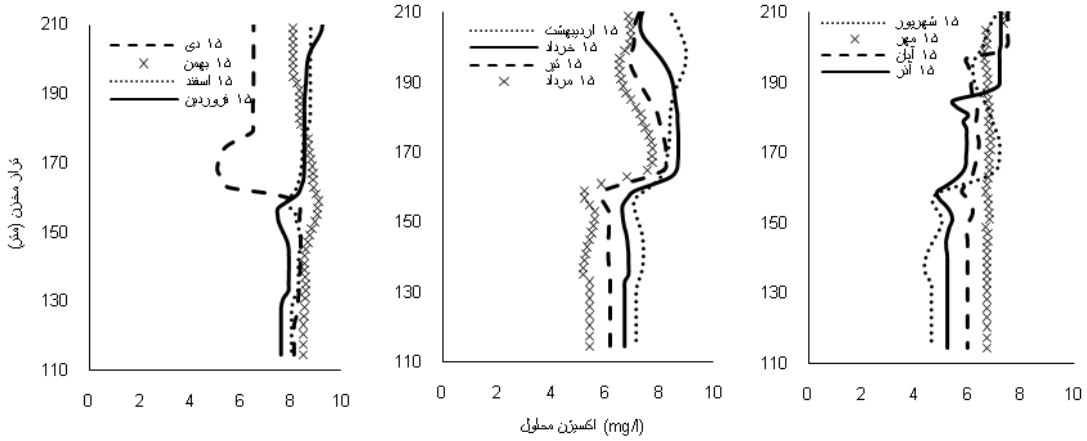
شکل (11): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 2



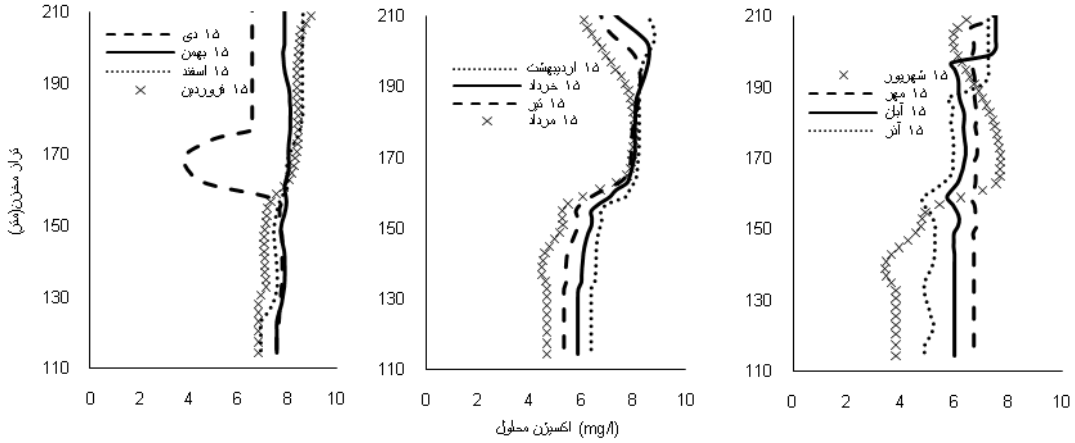
شکل (12): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 3



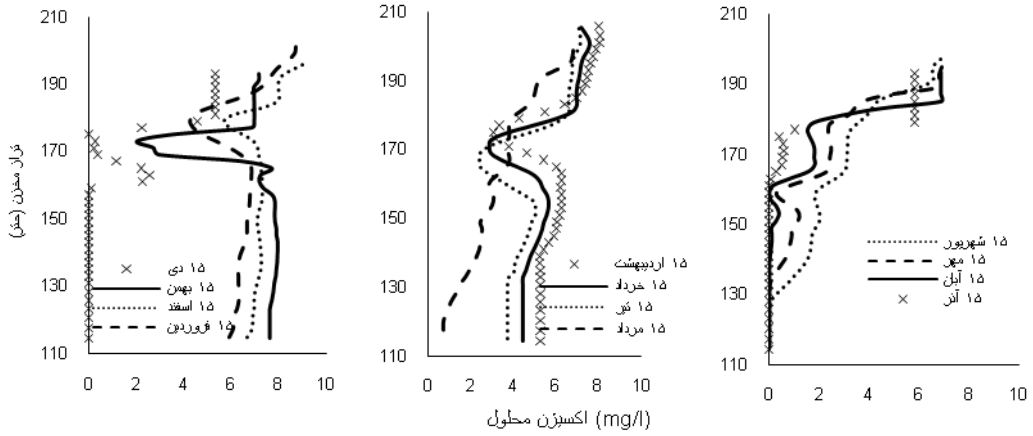
شکل (13): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی4



شکل (14): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 5



شکل (15): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 6



شکل (16): پروفیل اکسیژن محلول نسبت به تغییرات ارتفاعی سد در سناریوی 7

همان‌گونه که در گزارش طرح سد مخزنی کرخه (شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس، 1369) آمده است، آبی که از پایین دست مخزن استحصال می‌شود، به مصارف شرب، کشاورزی، محیط‌زیست و صنعت می‌رسد. به طور تقریبی، می‌توان میزان اکسیژن محلول استاندارد برای این‌گونه مصارف را (mg/l) 5 در نظر گرفت. زیرا، میزان اکسیژن محلول کمتر از این مقدار در آب سبب می‌شود که بعضی از فلزات موجود درسنگ‌های اطراف، راحت‌تر در آب حل شوند و این فلزات در رودخانه پایین‌دست سد آزاد شده و مشکل‌آفرین می‌شوند. بنابراین، باید تلاش نمود از ترازهایی آب استخراج نمود که این میزان بالاتر از (mg/l) 5 باشد. بدین منظور، در جدول (3) ترازهایی که آب دارای DO بالاتر از (mg/l) 5 و کمتر از آن است به تفکیک سناریوهای موجود آورده شده است. با توجه به نمودارهای ارایه شده در بالا، ماه‌های دارای لایه‌بندی شدید خرداد تا انتهای مهر، لایه‌بندی کم ماه‌های فروردین، اردیبهشت، آبان و آذر و ماه‌های دارای اختلاط نسبی یا کامل نیز بهمن و اسفند خواهند بود.

جدول (3)، ترازهایی که میزان اکسیژن محلول به بیشترین و کمترین حد خود می رسد را نیز نشان می‌دهد. جدول (4)، ترازهایی از مخزن را که احتمال وجود غلظت اکسیژن محلول کمتر از (mg/l) 5 را دارد در مجموع سناریوها نشان می‌دهد. با کمک آن می‌توان دریافت در طول 40 سال بهره‌برداری از سد در ترازهای بالاتر از 190 متر میزان DO همیشه بالاتر از 5 (mg/l) است.

بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 به منظور مدل سازی هیدرودینامیک، دما و پارامترهای کیفی در مخزن سد کرخه به کار گرفته شد. هیدرودینامیک سیستم (سطح آب)، دما و

جدول (3): تراز آب مربوط به غلظت اکسیژن محلول به صورت تفکیک شده

وضعیت حرارتی	وضعیت DO	تراز آب (m)							
		سناریو 1	سناریو 2	سناریو 3	سناریو 4	سناریو 5	سناریو 6	سناریو 7	جمع‌بندی 40 ساله
لایه‌بندی شدید	Max DO	202/73	201	201	167	171	183	201	193/51
	Min DO	120/50	120/5	123/25	155	139	117/5	113	124/24
	0<DO<5	172- 113	170- 113	ندارد	ندارد	ندارد	156- 113	186-113	156-113
	5<DO<10	202-/7 172	207- 170	220- 113	220- 113	220- 113	220- 156	205-186	202/7- 184
لایه‌بندی ضعیف	Max DO	203	205	217/25	201	219/75	219/75	210	212/95
	Min DO	117/5	117/5	179	157	157	139	173	160/26
	0<DO<5	131- 113 - 194 163	176- 113	ندارد	ندارد	ندارد	150- 113	180-113	131-113
	5<DO<10	163-131 204-194	207- 176	220- 113	220- 113	220- 113	220- 150	205-180	204-194
اختلاط نسبی	Max DO	202/6	203	217/25	217/25	217/25	217/25	201	210/81
	Min DO	117/5	153	191	171	169	143	173	169/58
	0<DO<5	144-113 190-162	176- 113	ندارد	ندارد	ندارد	154- 134	178-168	154-134 178-168
	5<DO<10	162-144 202-190	207- 176	220- 113	220- 113	220- 113	134- 113 220- 154	168-113 220-178	162-154 202-190

اکسیژن محلول کالیبره و صحت‌سنجی شدند. با بررسی نمودارهای به‌دست آمده می‌توان یک دوره لایه‌بندی شدید از اواسط خرداد ماه هر سال تا انتهای مهرماه را در هر 7 سناریو مشاهده نمود که عمق ترموکلاین در آن به 30 متر نیز می‌رسد. با سرد شدن تدریجی هوا که معمولا آبان ماه و اوایل دی ماه را شامل می‌شود، لایه‌بندی ضعیف شده و کم کم از بین می‌رود. در ماه‌های بهمن و اسفند، اختلاط در مخزن رخ می‌دهد. با شروع دوره گرم از اوایل فروردین مخزن به تدریج وارد لایه‌بندی ضعیف شده وهمان‌گونه که قبلا گفته شد، از اواسط خرداد لایه‌بندی شدت می‌گیرد. این مخزن به علت نداشتن دمای هوای زیر صفر درجه لایه‌بندی زمستانی ندارد. همچنین، در سناریوی 2 به علت حاکم شدن دوره کم آبی طولانی‌مدت و افزایش نسبی دمای هوا اختلاط در مخزن رخ نمی‌دهد.

نحوه تغییرات اکسیژن محلول در اعماق مشابه دما بوده و زمانی که فرآیند اختلاط در مخزن رخ داده است، یکنواخت شدن کیفیت آب در کل مخزن مشاهده گردیده که این وضعیت در ماه‌های بهمن و اسفند قابل مشاهده است. همچنین در ماه‌هایی که لایه‌بندی حرارتی به وقوع پیوسته است، یعنی از اواسط خرداد تا اواخر مهر تفاوت DO در لایه‌های تشکیل شده قابل توجه

جدول (4): احتمال وجود غلظت اکسیژن محلول کمتر از **5 (mg/l)** در تراز‌های مختلف مخزن

تراز آب (m)	وضعیت لایه‌بندی شدید	وضعیت لایه‌بندی ضعیف	درازمدت 40 ساله
200 – 190	0٪	0٪	0٪
190 – 180	25٪	25٪	14٪/6
180 – 170	25٪	42٪/5	35٪/8
170 – 160	42٪/5	42٪/5	41٪/5
160 - 150	47٪/5	32٪/5	28٪/5

140 – 150	47٪/5	37٪/5	31٪/7
130 – 140	47٪/5	37٪/5	35٪
120 – 130	47٪/5	47٪/5	36٪/6

بوده و به 9 میلی‌گرم بر لیتر نیز می رسد. در سال‌های نرمال، مرطوب و خیلی مرطوب که سناریوهای 3، 4، 5 و 6 را شامل می‌شود، شرایط بی‌هوازی ایجاد نشده بنابراین اختلاف DO در عمق کمتر است. اما، در سال‌های خشک و خیلی خشک (سناریوهای 1 و7) در چهار ماه از سال که همزمان با تشکیل لایه‌بندی شدید در مخزن است، اختلاف DO در عمق به‌صورت فاحشی مشاهده می‌شود که تراز آبگیری از سد در این ماه‌ها اهمیت می‌یابد. این نکته قابل ذکر است که در شرایط بروز وضعیت خشکسالی به‌صورت چندین سال پشت سر هم (سناریو 2)، میزان اکسیژن محلول در سد به حد بسیار بحرانی رسیده، حتی منجر به ایجاد شرایط بی‌هوازی در کف مخزن برای مدت یک‌سال می‌شود.

با توجه به مباحث گفته شده، مشاهده می‌شود: در ماه‌های بهمن و اسفند به علت یکسان بودن مقدار اکسیژن محلول در عمق انتخاب تراز تخلیه اهمیت چندانی ندارد. اما، در ماه‌هایی با لایه‌بندی (شدید و ضعیف) توصیه می‌شود از لایه 170 متر تا 180 متر آبگیری شود. زیرا، در 75٪ موارد میزان اکسیژن محلول مناسب می باشد. لایه‌های بالاتر از 180 متر به دلیل بالا بودن درجه حرارت و رشد جلبکی زیاد مناسب نیستند. لایه‌های پایین‌تر از 120 متر نیز به دلیل تجمع رسوبات و ایجاد شرایط بی‌هوازی و احتمال تولید بو و رنگ نا مطبوع توصیه نمی‌شوند.

فهرست منابع

توحیدی، ح. 1377. تحقیق در رابطه با عوامل موثر در تغییرات کیفی آب مخزن سد طرق و ارایه روش‌های بهینه کردن آب دریاچه، کمیته تحقیقات کاربردی شرکت آب منطقه‌ای خراسان رضوی (وزارت نیرو).

حیدری ژاله، ع.؛ کراچیان، ر. و زهرایی، ب. 1387. مدیریت کیفیت آب در مخازن سدها با تلفیق رویکرد سازه‌ای و غیرسازه‌ای، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.

خیامی ،م.؛ دانش، ش. و خداشناس، س. 1387. شبیه‌سازی شرایط کیفی مخازن سدها– مطالعه موردی– مخزن سد طرق، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد 23، شماره1، صص29–17.

دانایی، ع. 1387. پیش‌بینی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد در دست احداث بختیاری با کمک مدل ریاضی CE- QUAL- W2، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط‌زیست ، دانشگاه تهران .

دانش ،ش.؛ خداشناس، س. و خیامی ،م . 1387. مدیریت کیفیت آب در مخزن سد طرق از طریق آبگیری انتخابی از محل خروجی‌های سد، همایش سازگاری با کم‌آبی.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. 1377. مطالعه و بررسی زمان آبگیری نهایی سد کرخه، تهران.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. 1371. مطالعات مرحله اول طرح سد مخزنی کرخه . گزارش نهایی. پیوست برنامه‌ریزی منابع آب، تهران.

شرکت مهندسی مشاور مهاب قدس. 1369. مطالعات مرحله اول طرح سد مخزنی کرخه. پیوست اثرات برداشت آب از بالادست مخزن، تهران.

کرمانی، م. و ناصری، س. 1381. اثرات احداث سد بر کیفیت آب، مجله آب و محیطزیست، شماره 51 ، صص11– 6 .

Annear, R. & Wells, S. 2002, The Bull Run River – Reservoir System Model, Proceedings, 2nd Federal Inter Agency Hydrologic Modeling Conference, Las Vegas, July 28-Aug 1.

Chung, S. W. & Oh, J. K. 2006, Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic reservoir in a monsoon climate area. Water Sci. Technol., 54(11-12), pp: 29-37.

Cole, T. M. & Wells, S. A. 2008. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional,Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6 . User Manual. U.S. Army Corps of Engineers.

Hydrology Section Water Control and Water Quality section.U.S.Army Corps of Engineers. 2009. Applicationn of the CE-QUAL-W2 Hydro dynamic and Water quality Modelto Fort Peck Reservoir, Montana.

Jan-Tai, L.; Wen-Cheng, K.; Ruey-Tyng, L.; Wu-Seng,L.; Chou-Ping ,Y.; & Show- Chyuan, C. 2002. Water quality Modeling The Feitsui Reservoir In Northen Taiwan. Journal Of AWRA. NO. 3. VOL 39. pp: 671-687.

Rey-Shyan, W.; Wen-Cheng, L. & Wen- Hsiung, H. 2004. Eutrophication modeling in Shihmen reservoir, Taiwan. J. Environmental Science and Health, Part A, 39(6), pp: 1455-1477.

Sullivan, A. b. & Round, S. A. 2005. Modeling hydrodynamics temperature,and water quality in Hnry Hagg Lake, U. S. Geological Survey, Portland, Oregon.

Williams, N. T. 2007. Modeling Dissolved Oxygen in Lake Powell using CE-QUAL-W2, Master of science thesis Department of civil and Engineering,Bring Young University.

ZHU, L.; LI Huai-en.; Li Jia- Ke. & Dong Wen. 2009. Connecting AnnAGNPS and CE-QUAL-W2 Models for Reservoir Water Quality Prediction. National Nature Science Fundation of China. Project Number: 2009ZX07212-002-005-002.