

راهکارهای بهبود کیفیت آب در مخازن سدها، مطالعه موردی: سد ایلام

محمد کاوه^۱، علی مریدی^۲، مجتبی شوریان^۳*

چکیده

این مطالعه با هدف بررسی وضعیت حرارتی و تغذیه گرایی مخزن سد ایلام با استفاده از نرم افزار شبیه ساز CE-QUAL-W2 و ارائه ی گزینه های مناسب برای بهبود کیفیت آب مخزن سد ایلام انجام گردیده است. نتایج حاصل از مدلسازی نشان دهنده ی وجود لایه بندی تابستانه حرارتی، و به تبع آن لایه بندی کیفی مخزن سد ایلام می باشد. براساس شاخصهای موجود، مخزن سد ایلام در شرایط بین نیمه مغذی و مغذی بوده و چون نسبت نیتروژن به فسفر در مخزن بیشتر از ۱۰ است، محدود کنندگی فسفر را به همراه داشته است. تحلیل نتایج نمایشنامه های بار مواد مغذی حاکی از آن است که نمایشنامه ی کاهش بار نیتروژن و فسفر به میزان ۵۰ درصد، شرایط مخزن را از مغذی به نیمه مغذی تغییر خواهد داد. همچنین، تحلیل نمایشنامه های مختلف تراز برداشت آب از مخزن بیانگر آن است که آگیری از مخزن در ماه های شهریور تا آبان از نظر فراسنج های اکسیژن محلول و فسفر کل، از تراز ۹۴۰ منجر به بهبود وضعیت کیفی آب خروجی از مخزن خواهد شد. نتیجه ی نمایشنامه ی تخلیه ی آب از زیرلایه به میزان ۷ میلیون مترمکعب در سال نشان دهنده ی افزایش اکسیژن محلول به مقدار ۱/۶۱ میلی گرم در لیتر در سال بعد و در همان زمان می باشد. جهت جلوگیری از تبدیل مخزن به حالت مغذی شدید، راهکارهایی مانند کاهش زمان مانداب در مخزن سد از طریق تخلیه ی نسبتاً سریع، جلوگیری از ورود فاضلاب های روستایی و زهاب های کشاورزی (منشا آلودگی فسفات و نترات) به رودخانه، مدیریت به کارگیری کود و کاهش هزینه های تصفیه آب در بهبود کیفیت آب سد مفید خواهند بود.

واژه های کلیدی: کیفیت آب، تغذیه گرایی مخزن، نرم افزار CE-QUAL-W2، سد ایلام

^۱ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

^۲ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

^۳ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی تهران، تهران، ایران

Email: m_shourian@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

پدیده ی تغذیه گرایی به عنوان یکی از مسائل و مشکلات زیست محیطی در اکثر دریاچه ها و مخازن سدها مطرح می باشد. از عوارض این پدیده می توان به پر محصول شدن آبگیر سد، تغییرات زیاد در غلظت اکسیژن محلول روزانه و در نهایت بر هم خوردن تعادل بوم شناسی سامانه اشاره نمود. در این راستا یکی از جنبه های مهم پیش بینی اثرات محیط زیستی احداث یک سد، پیش بینی کیفیت آب مخزن با گذشت زمان و مدیریت برداشت از آن در طول مدت بهره برداری است. به طور کلی، احداث سد با توجه به شرایط منطقه و مشخصات فیزیکی مخزن، باعث ایجاد تغییر در کیفیت آب آن و رودخانه پایین دست سد می شود. بروز فرایندهایی نظیر لایه بندی حرارتی، تجمع شوری (ناشی از آب ورودی و بالا رفتن زمان ماند در مخزن سد) و تغذیه گرایی در مخازن از جمله مسائلی است که موجب افت شدید کیفیت آب، و عدم تأمین حد مطلوب کیفیت آب در مصارف مختلف می گردد. از آنجا که یکی از اهداف عمده ی احداث سدها تأمین آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت بوده است، کاهش کیفیت آب نارضایتی مصرف کنندگان، و افزایش هزینه های تصفیه را به همراه خواهد داشت. Raphael (۱۹۶۲) اولین تحقیق را در راستای شبیه سازی کیفی مخزن انجام داد. او با استفاده از تراز انرژی، روشی را برای پیش بینی تغییرات دمای آب با استفاده از آمار هواشناسی، مشخصه های ورودی و خروجی، مساحت و حجم مخزن ارائه نمود. این روش برای دریاچه های کم عمقی که کاملاً یکدست بودند توصیه شده بود. Gaillard (۱۹۸۴) یک نرم افزار یک بعدی قائم را برای شبیه سازی کیفی آب مخازن توسعه داد و از آن برای بررسی تاثیر موقعیت آبگیر سد بر روی کیفیت آب خروجی استفاده کرد. Bales و همکاران (۱۹۹۸) کاربرد موفقیت را از نرم افزار CE-QUAL-W2 در مورد دریاچه ی Rhodhiss گزارش کرده اند. Kuo و همکاران (۲۰۰۳) از نسخه ی ۳ نرم افزار CE-QUAL-W2 را برای شبیه سازی کیفی آب به منظور تعیین راهکار های مدیریت کیفی در مخزن Feitsue در شمال تایوان استفاده کردند. Kuo و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2 تغذیه گرایی را در دو مخزن

Te-chi و Tseng-Wen در تایوان شبیه سازی کردند. Yang و Li (۲۰۱۲) با استفاده از نرم افزار یک بعدی طولی، به پیش بینی دمای آب در مخزن لایه بندی شده، و اثرات رهاسازی آن بر منطقه ی پایین دست سد، پرداختند. Deus و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از نرم افزار شبیه سازی کیفیت آب CE-QUAL-W2 به بررسی تاثیر پرورش ماهی در مخزن سد Tucurui برزیل پرداختند. گام نخست در مطالعه ی مخزن، شناخت لایه بندی حرارتی و به دنبال آن لایه بندی های کیفی و تحلیل فرایندهای متناسب با آن می باشد، چرا که دما در تسریع واکنشهای شیمیایی، غلظت و روند تغییرات زمانی و مکانی این مواد، که مشخص کننده کیفیت آب مخزن می باشند، موثرترین نقش را داراست. خصوصیات دمایی و پایداری آب مخازن سدها را می توان با استفاده از مدل های ریاضی پیش بینی نمود و در صورت پیش بینی مشکلات زیست محیطی، می توان از طرق مختلف برای حل آن، راه کار مناسبی را پیش گرفت. استفاده از آبگیرهای ترازه، تخریب لایه بندی مخزن یا اختلاط، هوادهی زیرلایه و غیره از جمله این روشها می باشند (مددی و نجمی، ۱۳۸۷).

در دهه ی گذشته محققین زیادی از نرم افزار-CE-QUAL-W2 در طرح های پژوهشی و اجرایی خود استفاده کرده اند که حکایت از کارایی نرم افزار فوق دارد. Zylfi و Grazhdani (۲۰۱۴) با استفاده از نرم افزار-CE-QUAL-W2 اجزای اصلی کیفیت آب شامل اکسیژن محلول، فسفر کل، نیترات و سبزینه را در دریاچه های منطقه ی Prespa که مشترک با سه کشور آلبانی، مقدونیه و یونان می باشند را برای سال های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳ مورد شبیه سازی قرار دادند. نتایج نشان دادند که نرم افزار مذکور قادر به شبیه سازی عناصر کیفی آب با خطای مبه وسیله ی نسبی کمتر از ۱۰ درصد می باشد. (محمدی خلف بادام و همکاران ۱۳۸۳) به بررسی تغذیه گرایی در سد کرخه با استفاده از نرم افزار دو بعدی CE-QUAL-W2 پرداخته اند. (ظهوروند و همکاران ۱۳۹۰) به بررسی پدیده لایه بندی حرارتی مخزن سد ماملو با استفاده از نرم افزار دو بعدی CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج حاصل از شبیه سازی نشان دهنده وجود لایه بندی حرارتی مخزن سد ماملو می باشد. بر مبنای این نرم افزار امکان پیش بینی اثرات فرایندهای طبیعی و

وسيله ی نرم افزار ارایه می شوند اندرکنش پیچیده ای دارند (Williams, Ruckelshavs, ۲۰۰۷).

این نرم افزار بر اساس حل معادلات غیردائمی، دو بعدی هیدرودینامیک و پخش انتقال کار می کند. روش حل تغییرات زمانی نرم افزار بر اساس روش تفاضل محدود ضمنی می باشد که از حل همزمان معادله ی مومنوم افقی و معادله ی سطح آزاد آب حاصل می شود. سپس پیوستگی داخلی و مولفه ی انتقال محاسبه می شوند. در این برنامه جهت حل فرآیندهای انتقالی در معادله ی تعادل جرم، از طرح تفاضل محدود استفاده شده است (Cole, Strayer, ۲۰۰۶).

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز سد ایلام که در جنوب شرقی استان ایلام قرار دارد، از سه زیر حوضه ی گل گل، چاویز و اما تشکیل شده است. این حوضه دارای مختصات جغرافیایی " ۲۵ ° ۲۰' تا " ۴۶ ° ۵۸' ۳۶' عرض شمالی و " ۵۳ ° ۲۳' تا " ۳۳ ° ۵۶' ۳۸' عرض شمالی می باشد. سد ایلام در ۲۲ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان ایلام و بر روی رودخانه کنجانچم (محل تلاقی سه رودهای گل گل، اما و چاویز) قرار دارد. مشخصات فنی سد، از جمله تعداد و ترازهای آبیگری به شرح جدول ۱ می باشد. شکل ۱ نیز موقعیت محدوده ی مورد مطالعه را نشان می دهد.

جدول ۱- مشخصات سد مخزنی ایلام (چمگردلان)

نوع سد	سنگریزه ای با هسته رسی
ارتفاع از پی	۶۵ متر
طول تاج	۱۶۲ متر
گنجایش مخزن	۷۱ میلیون متر مکعب
دریچه تخلیه	سه عدد در رقومهای ۹۲۰ و ۹۲۳ و ۹۴۰ متر از سطح دریا

فعالتهای انسانی را بر روی ویژگیهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب در مخازن فراهم می آورد. بر همین اساس در مطالعه ی حاضر از نرم افزار CE-QUAL-W2 به منظور پیش بینی و تخمین شرایط لایه بندی حرارتی و مواد مغذی سد ایلام استفاده شده است.

۲- مواد و روشها

برای شبیه سازی کیفیت آب مخزن از نرم افزار CE-QUAL-W2 استفاده شده است. این نرم افزار یک نرم افزار دو بعدی (طولی- عمقی) آب پویایی و کیفی می باشد و به دلیل فرض همگن بودن جانبی، برای پیکره های آبی طویل و باریک مناسب است. توسعه و تکامل این نرم افزار از سه دهه پیش آغاز گردیده و برای مخازن، دریاچه ها، رود ها و خورها در سراسر دنیا به کار گرفته شده است. این نرم افزار برای مخازن توسعه یافته است ولی می تواند برای رود ها و خورها نیز به کار برده شود. این نرم افزار دو بعدی بر مبنای تفاوت محدود عمل کرده و قابلیت شبیه سازی توزیع قایم و طولی انرژی حرارتی و مواد شیمیایی و زیست شناسی انتخاب شده در پیکره آبی را در طول زمان دارد. همچنین در پیکره های آبی حجم، سطح آب، چگالی، سرعتهای قائم و طولی و غلظت اجزای کیفی را به خوبی شبیه سازی می کند. عامل شبیه سازی آب پویایی جریان غیر دائمی، تاثیرات تغییرات چگالی بر جریان را اعمال می کند. اندازه کیفی نرم افزار مذکور قابلیت مدل سازی حدود ۳۰ فراسنج کیفی به همراه دما و الگوی چرخه ای دما را دارا می باشد. همچنین نرم افزار دارای قابلیت های زیر نیز می باشد:

الف- شبیه سازی برای دوره های طولانی مدت ب- مدل سازی شاخه های متعدد در پیکره های آبی با پیچیدگی هندسی ج- پیکره های آبی متعدد متصل د- فاصله های متغیر طولی و ارتفاعی در شبکه بندی.

نرم افزار با چندین فرض و تقریب که برای شبیه سازی فرایندهای آب پویایی، انتقال و کیفی به کار می گیرد، محدودیت هایی دارد. نرم افزار به حل معادلات در راستای طولی و قائم پرداخته اما از تغییرات جانبی صرف نظر می کند. الگوریتمی برای اندازه ی حرکت در راستای قائم وجود نداشته و نتایج برای پیکره هایی با شتاب قائم زیاد ممکن است دقیق نباشند. مؤلفه های کیفی آب که به



شکل ۱- موقعیت سد ایلام نسبت به شهر ایلام

۲-۲- شبیه‌سازی مخزن سد ایلام

اطلاعات اولیه برای شبیه‌سازی دما و تغذیه‌گرایی در مخزن سد ایلام شامل: اطلاعات هیدرولوژیکی، هواشناسی و هندسی مخزن و داده‌های کیفیت آب شامل: اکسیژن محلول، فسفر کل، نیتروژن کل، جلبک در رودهای ورودی به مخزن سد می‌باشد که اطلاعات هیدرولوژیکی شامل بده‌های ورودی و خروجی از اطلاعات شرکت مدیریت منابع آب استخراج گردیده است. بده ورودی در محل ورودی رودخانه‌ها به مخزن سد (مصوب رودخانه‌ها) و بده خروجی از محل محور سد، از تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ به مدت دو سال می‌باشد. بده میانگین جریان ورودی به مخزن سد ایلام برابر با $1/55$ مترمکعب بر ثانیه و میانگین بده خروجی از مخزن جهت تامین نیاز شرب برابر $1/15$ مترمکعب بر ثانیه می‌باشد. بده ورودی در محل ورودی رودخانه‌ها به مخزن سد (مصوب رودخانه‌ها) و بده خروجی از محل محور سد، از تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ به مدت دو سال می‌باشد، تا پس از تطابق نرم افزار با واقعیت در سال ۱۳۸۵ بتوان با استفاده از نمونه‌برداری‌های انجام شده به واسنجی آن پرداخت. در این دوره مخزن دچار حالت خشکسالی می‌باشد.

داده‌های هواشناسی مورد نیاز شامل درجه حرارت هوا، درجه حرارت نقطه ی شبنم، سرعت و جهت باد و پوشش ابر می‌باشد که از داده‌های ایستگاه سینوپتیک شهر ایلام استفاده شده است. فراسنج دمای هوا از آمار و

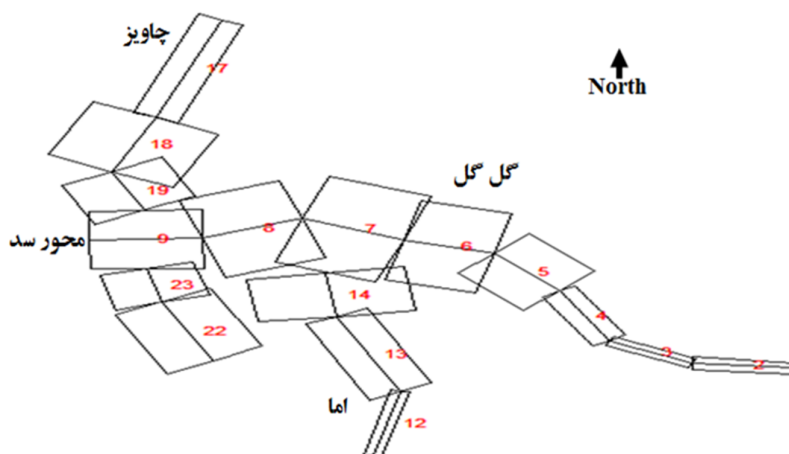
اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ایلام و در فواصل زمانی شش ساعته از تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ به مدت دو سال اخذ و در نرم افزار وارد گردیده است.

اولین اطلاعات لازم برای شبیه‌سازی، دوره و تاریخ آغاز شبیه‌سازی است. شروع شبیه‌سازی ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ انتخاب گردید. مخزن سد ایلام به صورت یک پیکره آبی با چهار انشعاب شبیه‌سازی گردیده است. در این شبیه‌سازی انشعابات به قطعات ۵۰۰ تا ۷۰۰ متری تقسیم شده و در مجموع شامل ۱۶ قطعه می‌باشد و همچنین عمق مخزن به ۴۳ لایه تقسیم‌بندی گردید که عمق هر لایه ۱ متر می‌باشد.

اطلاعات پستی و بلندی مربوط به مخزن سد ایلام تنها به صورت کاغذی در مقیاس $1/10000$ موجود است. به منظور شبیه‌سازی مخزن، مسیر رودخانه به قطعات کوچکتر مطابق شکل شماره ۲ تقسیم شده است. تقسیم بندی این قطعات بر اساس تغییر عرض مخزن سد و زاویه انحراف مسیر رودخانه می‌باشد. به این مفهوم که قطعه‌بندی در مقطعی انجام شده است که تغییر عرض مخزن یا مسیر جریان روی داده باشد. بنابراین جهت شبیه‌سازی کل مسیر مخزن سد ایلام از ۱۶ قطعه استفاده شده است. در ادامه با توجه به اینکه هدف از وارد کردن داده‌های جغرافیایی معرفی حجم و سطح مخزن به نرم افزار است، باید عمق مخزن را با استفاده از لایه‌بندی و با توجه به فاصله ترازهای ارتفاعی به نرم افزار معرفی کرده و فاصله این ترازهای ارتفاعی باید در بازه ی مناسب

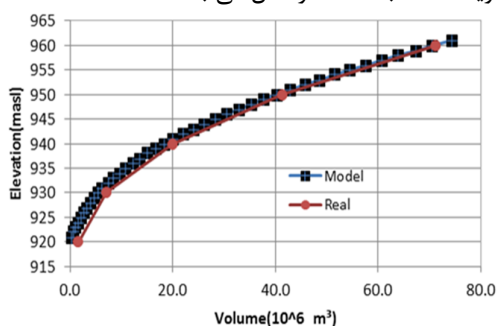
جهت بررسی تغییرات دما و سایر فراسنج ها در عمق، لازم است که آبیگر به لایه های با عمق های مناسب تقسیم بندی گردد. لذا با توجه به قابلیت های نرم افزار لایه های مخزن به عمق ۱ متری در جهت عمودی تقسیم بندی شده اند. لایه های عمقی مخزن از تراز نرمال تا تراز کف مخزن به نرم افزار وارد شده اند.

قرار گیرد. در صورتی که فواصل ترازهای ارتفاعی بیشتر از مقدار مناسب باشد، تحلیل نرم افزار واگرا خواهد شد که با توجه به عمق مخزن که ۴۳ متر است و جهت بررسی کیفیت مخزن با جزئیات دقیق در عمق، فواصل ارتفاعی برابر با ۱ متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۲ پلان قطعه بندی مخزن مطابق با اطلاعات وارد شده در نرم افزار و شماره هر یک از قطعات نشان داده شده اند.

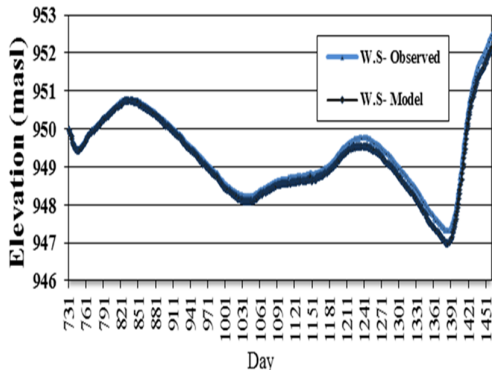


شکل ۲- شبکه بندی قطعات و لایه ها در نرم افزار مخزن سد ایلام

سازی می باشد که از تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ به مدت دو سال می باشد.



شکل ۳- واسنجی هندسه مخزن سد ایلام



۲-۳- واسنجی هندسه و تراز سطح آب مخزن

پس از ورود هندسه ی مخزن به نرم افزار و اجرای آن، منحنی سطح-حجم-ارتفاع مخزن در نتایج نشان داده می شود که با کنترل این منحنی و نمودار واقعی سطح-حجم-ارتفاع مخزن، طی چندین مرحله و با اصلاح عرض و طول قطعات، هندسه مخزن واسنجی گردید (شکل ۳). پس از انجام واسنجی هندسه ی مخزن و تطابق هندسه مخزن با منحنی حجم-سطح-ارتفاع واقعی مخزن، برای انجام واسنجی تراز سطح آب، با استفاده از داده های شرکت مدیریت منابع آب که در شکل ۴ نمایش داده شده و مقدار سطح آب مخزن را در روزهای شبیه سازی نشان می دهد در دوره ی واسنجی با خطای مبه وسیله ی مطلق ۰/۰۶۵ متر شبیه سازی گردید. با توجه به اینکه وضعیت کیفی مخزن می بایست در شرایط جریان ورودی و خروجی مخزن حاصل از نتایج برنامه ریزی منابع آب تعیین گردد، لذا انطباق تراز ذخیره مخزن در شرایط اجرای نرم افزار کیفی و شرایط برنامه ریزی منابع آب، لازم می باشد. در شکل ۴، محور افقی مربوط به دوره ی شبیه

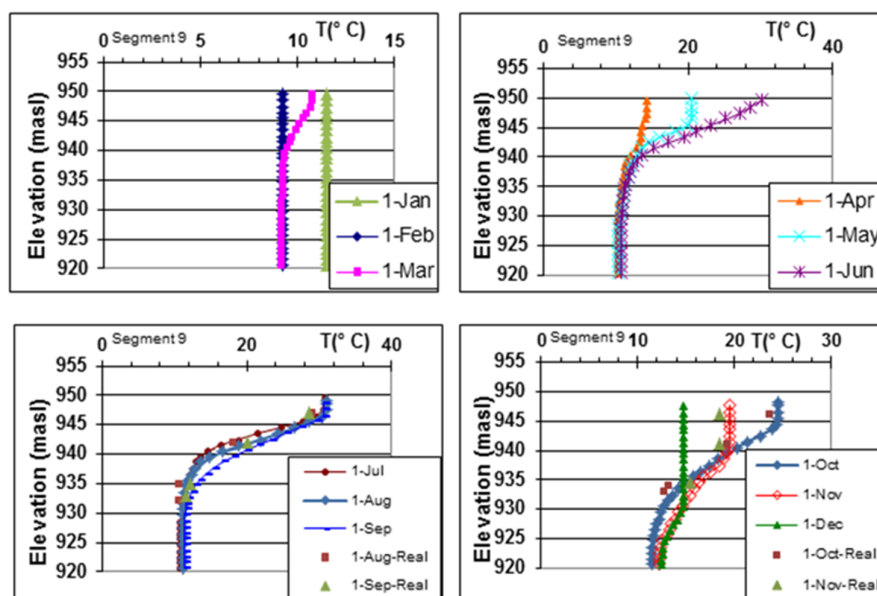
درجه می‌رسد. از ماه‌های شهریور (سپتامبر) به آذر (دسامبر)، با روند کاهش دما در مخزن عمق ترموکلاین (این عمق با توجه به مقادیر شبیه‌سازی و نتایج لایه بندی حرارتی در مخزن، ۷/۵ متری می‌باشد) افزایش یافته و نهایتاً در دی و بهمن واژگونی اتفاق می‌افتد. جهت محاسبه خطای واسنجی دما، از جذر میانگین مربعات خطای بین داده‌های خروجی نرم افزار مدل، و مقادیر مشاهداتی در روزهای نمونه برداری استفاده شده است. حداکثر میزان خطای محاسباتی در این روش برای فراسنج درجه دما ۱/۷۶ درجه ی سانتی‌گراد می‌باشد. مقادیر اندازه‌گیری شده دما و سایر فراسنج های کیفیت آب، که در ادامه کالیبره شده‌اند در اعماق ۳، ۵ و ۱۳ متری از سطح مخزن، و در روزهای اول آگوست، اول سپتامبر، اول اکتبر و اول نوامبر سال ۲۰۰۷، و در محل قطعه ی ۹ مخزن نمونه برداری شده‌اند. این مقادیر در نمودارهای ۵ تا ۸ با نقطه نشان داده شده‌اند.

شکل ۴- کالیبراسیون تراز بهره برداری مخزن ایلام

۲-۴- شبیه‌سازی و واسنجی دما در مخزن

دوره شبیه‌سازی از تاریخ ۱۲ دی ماه ۱۳۸۴ برابر با اول ژانویه ۲۰۰۶ به مدت دو سال می‌باشد. در شکل ۵ نتایج نیمرخ‌های شرایط اختلاط در مخزن وجود داشته و دمای آب ۱۱/۵ درجه سانتی‌گراد است. دمای آب ورودی به مخزن در هر سه شاخه در این ماه حدود ۱۰ درجه ی سانتی‌گراد می‌باشد.

با گرم شدن هوا در اسفند (مارس) شروع تشکیل لایه‌بندی حرارتی محسوس به نظر می‌رسد. در فروردین (آوریل) اختلاف دمای رولایه و زیرلایه به حدود ۴ درجه ی سانتی‌گراد می‌رسد، و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد (می و ژوئن) این روند ادامه یافته، و نهایتاً در ماه‌های تیر و مرداد (ژوئیه و آگوست) لایه‌بندی پایداری مشاهده می‌گردد. در تیر، دمای رولایه ۳۱ درجه و زیرلایه به ۱۱



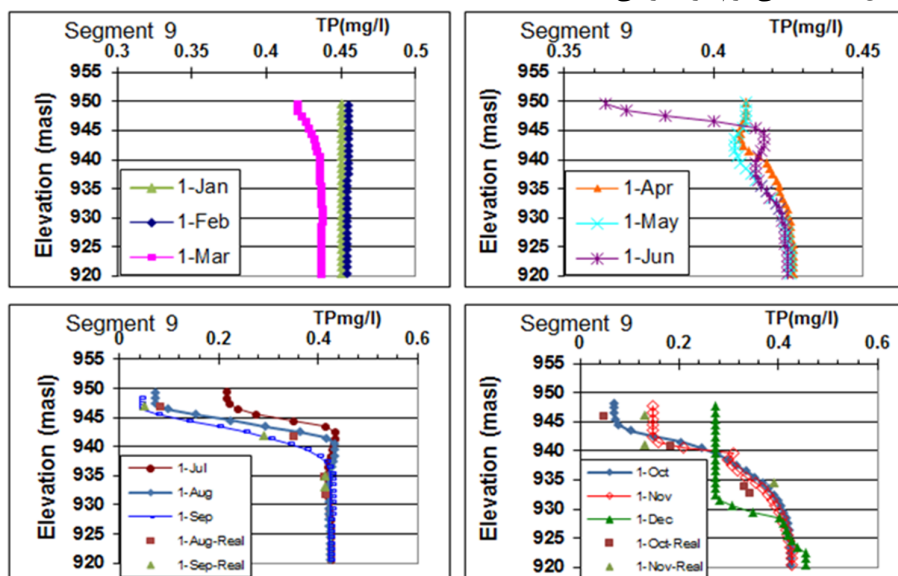
شکل ۵- تغییرات عمقی دمای آب مخزن طی ماه‌های سال ۲۰۰۷ میلادی

خروجی شهریور دارای کمترین غلظت فسفر کل (۰/۰۴ میلی‌گرم در لیتر) و در بهمن آب خروجی دارای بیشترین غلظت فسفر کل (۰/۴۵۵ میلی‌گرم در لیتر) می‌باشد. جهت محاسبه ی خطای واسنجی فسفر کل، از جذر میانگین مربعات خطای بین داده‌های خروجی نرم افزار و مقادیر مشاهداتی در روزهای نمونه برداری استفاده شده

۲-۵- شبیه‌سازی و واسنجی فسفر کل در مخزن

تعیین نسبت نیتروژن کل به فسفر کل در تعیین عامل محدود کننده ی رشد جلبک و وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن مهم می‌باشد. در شکل ۶ پروفیل عمقی تغییرات غلظت فسفر کل در ماه‌های مختلف در محل محور مخزن سد ایلام نشان داده شده است. مطابق این شکل در آب

است. حداکثر میزان خطای محاسباتی در این روش برای فراسنج فسفر کل ۰/۳۸ میلی گرم در لیتر می باشد.

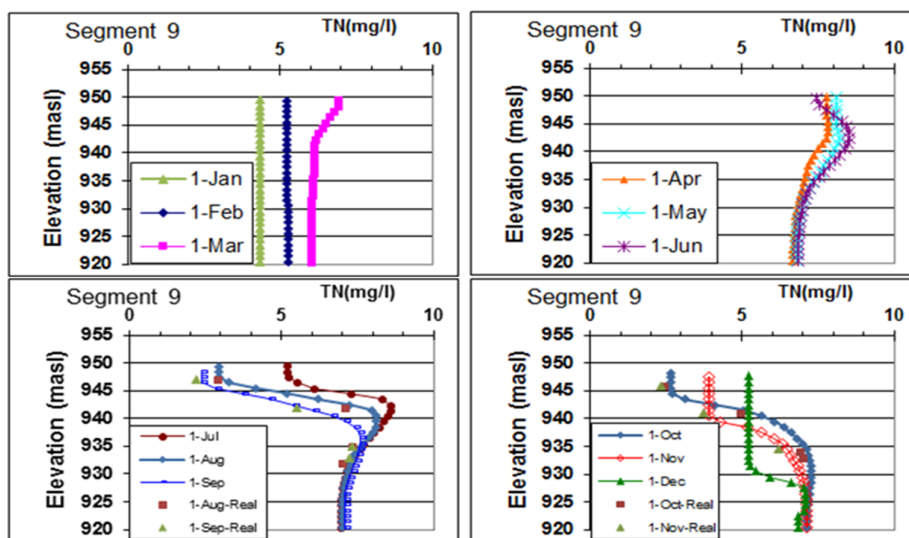


شکل ۶- تغییر سالانه ی پروفیل فسفر کل

غلظت نیتروژن کل رولایه در قطعه ۹، ۸/۵۸ میلی گرم در لیتر و در ماه تیر می باشد. جهت محاسبه ی خطای واسنجی نیتروژن کل، از جذر میانگین مربعات خطای بین داده های خروجی نرم افزار و مقادیر مشاهداتی در روزهای نمونه برداری استفاده شده است. حداکثر میزان خطای محاسباتی در این روش برای فراسنج نیتروژن کل ۱/۳۵ میلی گرم در لیتر می باشد.

۲-۶- شبیه سازی و واسنجی نیتروژن کل در مخزن

نیتروژن کل، به دلایل مورد اشاره برای فسفر کل، دارای اهمیت می باشد. در شکل ۷ تغییرات ماهانه ی پروفیل قائم نیتروژن کل در قطعه ی ۹ در ماههای مختلف سال نشان داده شده است. مطابق این شکل، تغییرات نیتروژن کل همانند نترات بوده و ماکزیمم

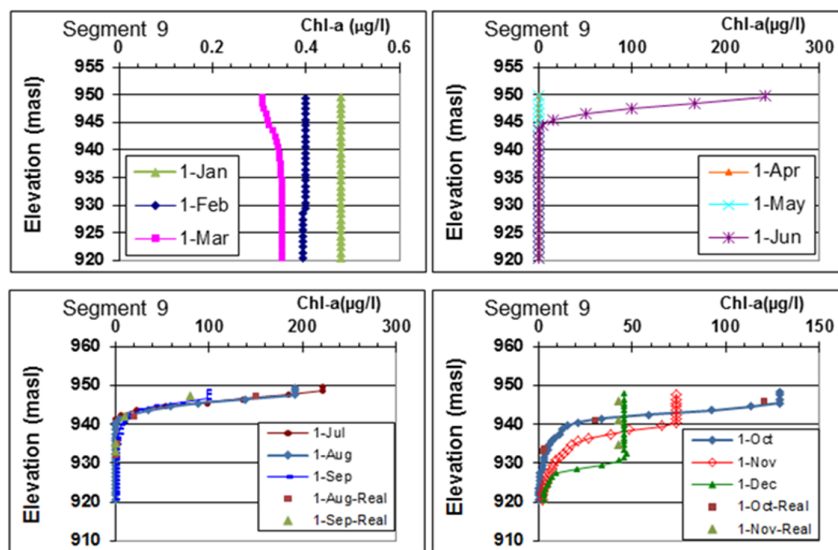


شکل ۷- تغییر سالانه ی پروفیل نیتروژن کل

سبزینه a مربوط به لایه ی سطحی در خرداد و برابر با ۲۴۳ میکروگرم در لیتر است. جهت محاسبه ی خطای واسنجی سبزینه a، از جذر میانگین مربعات خطای بین داده‌های خروجی نرم افزار و مقادیر مشاهداتی در روزهای نمونه برداری استفاده شده است. حداکثر میزان خطای محاسباتی در این روش برای فراسنج سبزینه a، ۱۴/۹ میکروگرم در لیتر می‌باشد.

۲-۷- شبیه‌سازی و واسنجی جلبک در مخزن

فراسنج جلبک مهمترین جزء تعیین کننده ی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن می‌باشد. شکل ۸ نمودار تغییرات عمقی در قطعه ی ۹ را برای فراسنج سبزینه a نشان می‌دهد. تغییرات این فراسنج نیز همانند تغییرات جلبک می‌باشند. مطابق این شکل، بیشترین غلظت



شکل ۸- تغییر سالانه ی پروفیل نیتروژن کل

جدول ۲- معیار والن واید ر جهت بررسی وضعیت تغذیه گرایی مخزن

مغذی	نیمه مغذی	کم مغذی	کیفیت آب
۱۶-۳۹۰	۱۱-۹۶	۳-۱۸	فسفر کل (میکروگرم بر لیتر)
۰/۳۹-۶/۱	۰/۳۶-۱/۴	۰/۳۱-۱/۱۶	نیتروژن کل (میلی گرم بر لیتر)
۲/۷-۷۸	۳-۱۱	۰/۳-۴/۵	سبزینه a (میکروگرم بر لیتر)
۱۰-۲۸۰	۵-۵۰	۱/۳-۱۱	سبزینه حداکثر a (میکروگرم بر لیتر)
۰/۸-۷	۱/۵-۸/۱	۵/۴-۲۸	عمق سکی (متر)

جدول ۳- معیار نووتنی و اولم برای بررسی وضعیت تغذیه گرایی مخزن

بسیار مغذی	مغذی	نیمه مغذی	کم مغذی	کیفیت آب
>>۷۰	۲۰-۷۰	۱۰-۲۰	<۱۰	فسفر کل (میکروگرم بر لیتر)
>۱/۵	۰/۶-۱/۵	۰/۳-۰/۶	<۰/۳	نیتروژن کل (میلی گرم بر لیتر)
>>۴۰	۱۰-۴۰	۴-۱۰	<۱۰	سبزینه a (میکروگرم بر لیتر)
<۱	۱-۲	۲-۴	>۴	عمق سکی (متر) در فصل تابستان
۰	<۱۰	۱۰-۸۰	<۸۰	اکسیژن زیرلایه (درصد اشباع)

۳- نتایج و بحث

نیتروژن، غلظت سبزینه a و میزان درصد اشباع اکسیژن محلول زیرلایه، وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن سد ایلام به صورت جدول های ۴ و ۵ طبقه‌بندی شده است. با توجه به غلظت سبزینه a، خرداد به عنوان بحرانی‌ترین ماه از لحاظ تغذیه‌گرایی مخزن محسوب می‌گردد. مقایسه ی تغییرات مقادیر اکسیژن محلول زیرلایه نشان می‌دهد که مهر و آبان بحرانی‌ترین ماه‌های سال می‌باشد.

جهت بررسی وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن سد ایلام از معیارهای والن‌وایدنر و کرس (Kerekes, Vollenweider, ۱۹۸۰) و نووتنی و اولم (Olem, Novotny, ۱۹۹۴) مطابق جداول ۲ و ۳ استفاده شده است. با توجه به این معیارها، و با بررسی شرایط کیفی مخزن در ماه‌های مختلف برای ۴ شاخص کل فسفر، کل

جدول ۴- شاخص‌های تغذیه‌گرایی مخزن سد ایلام در ماه‌های مختلف سال آبی ۸۵-۱۳۸۴

شاخص تغذیه‌گرایی	دی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر
فسفر کل (mg/L)	۰/۴۵	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴	۰/۳	۰/۲۹	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۳۲
نیتروژن کل (mg/L)	۴/۳۵	۷/۴۸	۸/۰۳	۷/۸۱	۷/۰۶	۶/۶۴	۶/۰۵	۶/۰۴	۵/۹
جلبک (µg/L)	۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۹	۹۷/۵	۸۱/۱	۶۹/۳	۵۸/۲	۵۷/۳	۴۵/۷
اکسیژن محلول زیر لایه (/)	۶۶	۷۴	۶۷	۵۸	۴۴	۳۷	۲۹	۲۰	۶۱

جدول ۵- شرایط حاکم کیفی مخزن با توجه به شاخص‌های تغذیه‌گرایی مخزن سد ایلام در ماه‌های مختلف سال آبی ۸۵-۱۳۸۴*

فراسنج	دی	فروردین	اردیبهشت	خرداد	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر
فسفر کل	E	E	E	E	E	E	E	E	E
نیتروژن کل	E	E	E	E	E	E	E	E	E
جلبک	O	O	O	E	E	E	E	E	E
اکسیژن محلول زیر لایه	M	M	M	M	M	M	M	M	M

* E: یوتروفیک، M: مزوتروفیک، O: الیگوتروفیک

۳-۱- نمایشنامه های بهبود کیفیت آب در مخزن سد ایلام

و در نمایشنامه ی ششم، میزان بار فسفر کل و نیتروژن کل ورودی به مخزن سد به میزان ۵۰ درصد نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت.

نرم افزار شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 در نمایشنامه های مختلف بار مواد مغذی ورودی به مخزن سد اجرا گردید. در شکل ۹، تغییرات اکسیژن محلول خروجی مخزن سد در نمایشنامه های مختلف بار فسفر کل و نیتروژن کل ورودی به مخزن نشان داده شده اند. مطابق این شکل با افزایش فسفر کل ورودی به مخزن سد، میزان غلظت DO به خصوص در ماه‌های رشد جلبک شدیداً تحت تاثیر واقع شده است. جدول ۶، نتایج ۶ نمایشنامه ی مختلف بار مواد مغذی در حالات مختلف را نشان می‌دهد. مقادیر درصد اکسیژن محلول زیرلایه، سبزینه a و نیتروژن کل و فسفر کل در محل قطعه ی ۹ در طول

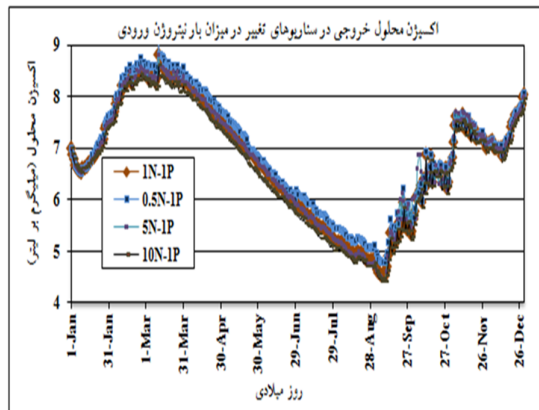
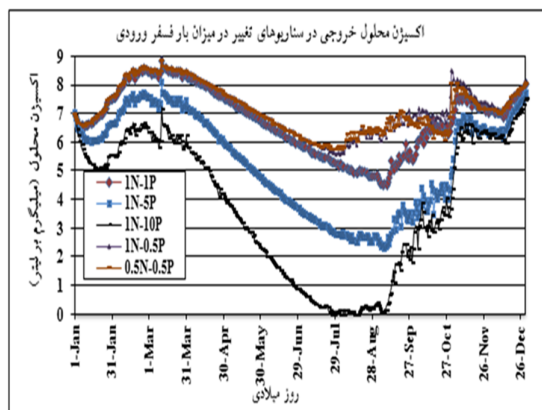
شش نمایشنامه بار مواد مغذی به نرم افزار معرفی کردند. نمایشنامه ی اول حالت نرمال (حالت شبیه‌سازی پایه) بوده، و تغییری در بار ورودی ایجاد نگردید. در نمایشنامه ی دوم، بار نیتروژن کل ورودی به مخزن سد به میزان ۱۰ برابر نسبت به شرایط نرمال افزایش یافت. در نمایشنامه ی سوم میزان بار نیتروژن کل ورودی به مخزن سد ۵۰ درصد نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت. در نمایشنامه ی چهارم میزان کل فسفر ورودی به مخزن سد ایلام به میزان ۱۰ برابر در مقایسه با شرایط نرمال افزایش یافت و در نیتروژن کل ورودی تغییری ایجاد نگردید. در نمایشنامه ی پنجم میزان فسفر کل ورودی به مخزن سد ۵۰ درصد نسبت به شرایط نرمال کاهش یافت

حرارتی تعریف شده‌اند. به این دلیل که در زمان وقوع لایه بندی، کیفیت آب در آبگیرهای پایینی مخزن افت شدید کرده، و به این ترتیب آبگیری از ترازهای فوقانی ملاک عمل قرار می‌گیرد، به این صورت نمایشنامه ی بهبود کیفیت آب به وسیله ی تغییر ترازهای آبگیری تعریف گردیده است.

سال در نمایشنامه های مختلف ارائه شده اند. وضعیت تغذیه‌گرایی مخزن نیز در هر نمایشنامه تحلیل گردیده است.

۳-۲- نمایشنامه های بده خروجی از مخزن

در ترازهای ۹۲۰ و ۹۲۳ و ۹۴۰ آبگیر وجود داشته، و نمایشنامه های بده خروجی از مخزن بر مبنای لایه بندی



شکل ۹- نمایشنامه های بار مواد مغذی

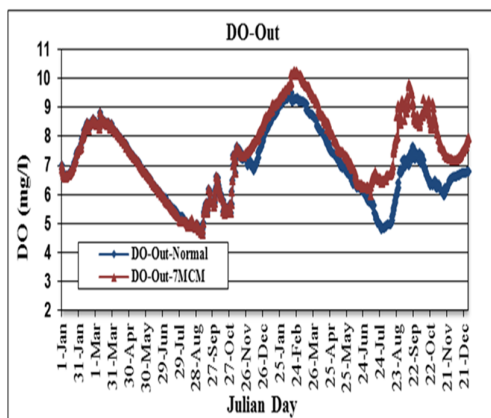
جدول ۶- نمایشنامه های مختلف بار مواد مغذی ورودی به مخزن

وضعیت تغذیه‌گرایی	فراسنج محدود کننده	Do زیرلایه (درصد اشباع)	Chla (µg/L)	TN/TP	TP (mg/L)	TN (mg/L)	حداقل خروجی از مخزن (mg/l)	نمایشنامه
مغذی	P	۲۰	۹۷/۵	۱۷/۸۴	۰/۴۵	۸/۰۳	۴/۵	1N-1P
فوق مغذی	P	۵	۱۵۰	۱۳۶/۳	۰/۴۶	۶۲/۷۲	۴/۴	10N-1P
مغذی	P	۱۲	۹۲	۱۲/۸۹	۰/۴۵	۵/۸	۴/۹	0.5N-1P
فوق مغذی	N	۱/۵	۲۰۵	۱/۷۳	۴/۸۳	۸/۳۱	۰	1N-10P
نیمه مغذی	P	۲۵	۶۴	۳۷/۸۴	۰/۲۲	۸/۳۲	۵/۶۵	1N-0.5P
نیمه مغذی	P	۲۷	۶۱	۱۹/۲۲	۰/۲۲	۴/۲۳	۵/۷۳	0.5N-0.5P

در کلیه ترازها تقریباً یکسان بوده، و بنابراین، آبگیری از مخزن سد در این ماه‌ها می‌تواند از هر تراز صورت گیرد. همان‌گونه که در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، در ماه‌های شهریور تا آبان، غلظت اکسیژن محلول در تراز ۹۲۰ به پایین‌ترین مقدار رسیده است. در سه ماه مذکور، غلظت اکسیژن محلول در تراز ۹۴۰ در کلیه زمان‌ها بالاتر از ۴ میلی‌گرم در لیتر است.

در شکل ۱۰ تغییرات اکسیژن محلول خروجی مخزن سد در نمایشنامه های بده خروجی مخزن نشان داده شده اند. نمایشنامه ی اول صرفاً آبگیری از تراز ۹۲۰ متر، نمایشنامه ی دوم صرفاً آبگیری از تراز ۹۲۳ متر، و نمایشنامه ی سوم صرفاً آبگیری از تراز ۹۴۰ متر بوده، و از خروجی‌های دیگر سد آبگیری انجام نمی‌گردد. مطابق این شکل، غلظت اکسیژن محلول در ماه‌های آذر تا مرداد

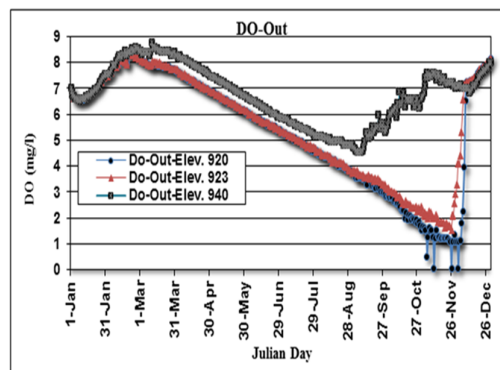
خروجی از مخزن سد، از نظر غلظت اکسیژن محلول به مدت ۲ سال از شروع تخلیه آب زیرلایه، نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، در سال اول تخلیه از زیر لایه، تغییر محسوس در افزایش مقدار اکسیژن محلول، خصوصاً در آبان که مقدار این فراسنج به مقدار حداقل در خروجی از مخزن رسیده است، مشاهده نمی‌گردد. اما در سال بعد و در همین زمان، مقدار اکسیژن محلول نسبت به شرایط عادی، به میزان ۱/۶۱ میلی‌گرم در لیتر افزایش دارد، که این امر نشان‌دهنده ی افزایش کیفیت آب خروجی از مخزن سد می‌باشد. از مزایای نمایشنامه ی تخلیه آب آلوده از لایه ی تحتانی، اختصاص آب کشاورزی از دریچه ی تحتانی می‌باشد، که به تبع آن هم آب با کیفیت پایین از مخزن تخلیه می‌شود، و هم زمان ماند مخزن کاهش یافته، و به دنبال آن، کیفیت آب مخزن بهبود خواهد یافت. از نقطه ی نظر امنیت رهاسازی آب به پایاب سد، بررسی مسیر رودخانه در پایین‌دست مخزن نشان می‌دهد تا فاصله حدوداً ۲۰ کیلومتری پایین‌دست سد، نقاط روستایی و کشاورزی وجود ندارند.



شکل ۱۱- تغییرات غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن سد در نمایشنامه ی تخلیه آب از زیرلایه

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از مدلسازی نشان دهنده وجود لایه بندی تابستانه ی حرارتی، و به تبع آن لایه بندی کیفی مخزن سد ایلام می‌باشد. با گرم شدن هوا در فصل بهار، شروع لایه‌بندی حرارتی در مخزن محسوس به نظر می‌رسد. و در فصل تابستان، این روند ادامه یافته، و نهایتاً در ژوئیه لایه‌بندی به پایدارترین وضعیت خود می‌رسد.



شکل ۱۰- تغییرات غلظت اکسیژن محلول خروجی از مخزن سد در نمایشنامه های مختلف بده خروجی

۳-۳- نمایشنامه ی تخلیه آب از زیرلایه

منابع عمده ی نقطه‌ای و غیر نقطه‌ای نیتروژن و فسفر فاضلاب‌های انسانی، و همچنین واحدهای پرورش دام، و نهایتاً فرسایش در منطقه می‌باشند. لازم به ذکر است کودهای فسفاته، که در کشاورزی استفاده می‌شوند، نیز می‌توانند از عوامل تولید کننده ی فسفر باشند، ولی در حوضه ی سد ایلام، سهم این آلاینده کمتر از سایر منابع می‌باشد. علاوه بر منابع فوق، فسفر موجود در رسوبهای کف مخزن نیز می‌تواند طی فرآیندهای بی‌هوازی از آنها جدا شده و باعث افزایش غلظت فسفر در آب، خصوصاً در فصول گرم سال شوند. که همان طور که در پروفیل‌های عمقی شبیه سازی فسفر نشان داده شد، این پدیده مشهود می‌باشد. لذا نمایشنامه ی تخلیه آب از زیر لایه، که یک نمایشنامه جهت بهبود کیفیت آب مخزن است، باعث می‌شود جریان غلیظ لایه‌ای با سرعت بالا از مخزن خارج شده، و به این ترتیب کیفیت آب مخزن ارتقا یابد.

نرم افزار شبیه‌سازی مخزن در نمایشنامه ی تخلیه از زیر لایه به مقدار ۷ میلیون متر مکعب در سال اجرا گردید. تخلیه ی آب از زیر لایه به مقدار ۵ مترمکعب بر ثانیه، و به مدت ۱۶ روز با شروع از ۲۱ آبان، که کیفیت لایه‌های زیرین مخزن افت شدید کیفیت دارند، اجرا گردید. به عبارتی، تخلیه به صورت غیریکنواخت در طول سال می‌باشد. این نمایشنامه ی تخلیه ی آب زیرلایه می‌تواند در مقاطع زمانی متغیر، و با مقادیر دیگر بده خروجی رخ دهد، اما بهترین زمان جهت تخلیه زمانی است که لایه‌ی تحتانی کمترین کیفیت و بیشترین مقدار فسفر را دارا باشد. در شکل ۱۱، تغییرات کیفیت آب

مانند کاهش زمان ماندن آب در مخزن سد ایلام با تخلیه ی نسبتاً سریع، جلوگیری از ورود فاضلاب‌های روستایی و زهاب‌های کشاورزی (منشا آلودگی فسفات و نترات) به رود، مدیریت استفاده از کودهای کشاورزی، جلوگیری از ورود دام به مناطق با پتانسیل بالای فرسایش در اطراف رودخانه‌ها، تخلیه ی آب از زیرلایه، اختلاط رولایه در بهبود کیفیت آب سد، و کاهش هزینه های تصفیه آب از جمله راهکارهای مفید خواهند بود.

۵- منابع

- ۱) کار آموز و کراچیان ۱۳۹۱. برنامه ریزی و مدیریت کیفی سامانه های منابع آب، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- ۲) محمدی خلف بادام ۱۳۸۳. تغذیه گرایی مخازن (نرم افزارسازی دوبعدی) مطالعه موردی سد کرخه، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علم و صنعت ایران.
- ۳) وزارت نیرو ۱۳۸۸. راهنمای مطالعات کیفیت آب مخازن سدهای بزرگ، نشریه شماره ۳۱۳.
- ۴) وفایی ۱۳۹۱. مقایسه نرم افزار های کیفی در مطالعات تغذیه گرایی مخازن و انتخاب نرم افزار مناسب، دومین سمپوزیوم بین المللی مهندسی محیط زیست.
- ۵) مددی و نجمی ۱۳۸۷. بررسی لایه بندی حرارتی مخزن سد دز با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2، دومین همایش تخصصی مهندسی محیط زیست.
- ۶) ظهره وند م. ۱۳۹۰. ارزیابی شرایط کیفی آب در مخازن سدها با استفاده از نرم افزار دوبعدی CE-QUAL-W2 مطالعه موردی مخزن سد ماملو، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس ملی سد و نیروگاههای برق آبی.
- 7) H. Mikio. 1994. Water quality and its control, Rotterdam, Netherlands.
- 8) Kagalou, Papastergiadou & Leonardos. 2008. Long term changes in the eutrophication process in a shallow Mediterranean lake ecosystem of W. Greece, Response after the reduction of external load, Elsevier.
- 9) Romero, Kagalou, Imberger & Hela. 2002. Seasonal water quality of shallow and eutrophic Lake Pamvotis, Greece, Hydrobiologia.
- 10) Reckhow & Chapra. 1979. A note on error Analysis for a phosphorus retention model, Water Resource Research.
- 11) Markram. 2007. Frontier, <http://journal.frontiersin.org/Journal/10.3389/fmicb.2013.00101/full>

در فصل پاییز، با ایجاد روند کاهش دما در مخزن، منجر به اختلاط و واژگونی در فصل زمستان می‌شود. بررسی تغییرات زمانی غلظت فسفر طبق شکل شماره ۶ نشان می‌دهد که میزان فسفات از فصل زمستان حالت کاهشی داشته، و در فصل های بهار و تابستان به رغم ثابت بودن آن در زیر لایه، به صورت محسوسی در رو لایه کاهش می‌یابد، که دلیل آن فعالیت جلبکها در آن لایه بوده، و به این ترتیب کاهش میزان غلظت فسفر در رو لایه می‌باشد. خاطر نشان می‌گردد که کاهش میزان فراسنج فسفر کل در طول فصل زمستان، به دلیل کاهش بار ورودی فسفر از حوضه به مخزن می‌باشد. در مورد فراسنج نیتروژن کل، همان گونه که در پروفیل‌های شکل شماره ۷ دیده می‌شود، تغییرات غلظت نترات در زیر لایه و در فصل بهار و تابستان ناچیز بوده، و بیشترین تغییرات مربوط به قسمت رو لایه مخزن می‌باشد که نوسانهای ایجاد شده بیشتر به دلیل فعالیت جلبکها در رو لایه می‌باشد. براساس شاخصهای موجود، مخزن سد ایلام در شرایط بین نیمه مغذی و مغذی بوده، و چون نسبت نیتروژن به فسفر بیشتر از ۱۰ میلی گرم بر لیتر بوده، محدود کنندگی فسفر را به همراه داشته است. نتایج تحلیل نمایشنامه های بار مواد مغذی حاکی از آن است که نمایشنامه های افزایش بار فسفر، تاثیر زیادی بر شرایط تغذیه‌گرایی داشته، و وضعیت تغذیه‌گرایی را از مغذی به فوق مغذی ارتقا داده، و نمایشنامه ی کاهش بار نیتروژن و فسفر به میزان ۵۰ درصد، شرایط مخزن را از مغذی به نیمه‌مغذی تغییر داده است. همچنین، تحلیل نمایشنامه های مختلف تراز برداشت آب از مخزن، منتج به این است که آگیری از مخزن در ماه‌های شهریور تا آبان از نظر فراسنج های اکسیژن محلول و فسفر کل، از تراز ۹۴۰ بهبود وضعیت کیفی آب خروجی را نشان می‌دهد. نتیجه ی نمایشنامه ی تخلیه ی آب از زیرلایه به میزان ۷ میلیون مترمکعب در سال (در زمان حداقل اکسیژن زیرلایه) نشان‌دهنده ی افزایش اکسیژن محلول به مقدار ۱/۶۱ میلی‌گرم بر لیتر در سال بعد، و در همان زمان، می‌باشد، که این امر نشان‌دهنده ی کارایی این روش در افزایش اکسیژن محلول زیرلایه، و به تبع آن افزایش کیفیت آب خروجی از مخزن سد می‌باشد. در خصوص تغذیه گرایی، جهت جلوگیری از ورود این مخزن به ناحیه ی مغذی شدید بایستی چاره اندیشی شود. ارایه ی راهکارهایی

- eelgrass (*Zostera marina*) and epiphytes. *Ecology* 74, 904–918.
- 15) Cole, and D. L. Strayer. 2006. Top-down control from the bottom: Regulation of eutrophication in a large river by benthic grazing. *Limnol. Oceanogr.* 51:664–670
- 12) Pope, Larry & Milligan. 2002. Sources and Concentrations of Phosphorus in the Cheney Reservoir Watershed, USGS.
- 13) Straskraba & Tundisi .1989. Guideline of lake management - Reservoir water quality management.
- 14) Williams, S.L., Ruckelshaus, M.H., 2007. Effects of nitrogen availability and herbivory on
- 16) Vollenweider, R.A. and Kerekes, J.J., 1980. Back-ground and Summary Results of the OECD Cooperative Program on Eutrophication. In: Proceedings of an International Symposium on Inland Waters and Lake Restoration. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 440/5-81-010. pp. 26-36.
- 17) Novotny, V., Olem. H., 1994. *Water Quality: Prevention, Identification, and Management of Diffuse Pollution* New York :Van Nostrand Reinhold.
- 18) Raphael, J, M, 1962. Prediction of temperature in rivers and reservoirs, *J, Power Div., ASCE* 88(2): 157-181.
- 19) Gaillard J. F., and Nriagu, J. O., 1984. The speciation of pollutant metals in lakes near the smelters at Sudbury, Ontario. In *Environmental Impacts of Smelters* (ed. J. O. Nriagu): pp. 349 – 374.
- 20) Bales, M.J., and Giorgino, J.D., .1997. “Rhodhiss Lake, North Carolina: Analysis of Ambient Conditions and Simulation of Hydrodynamics, Constituent Transport, and Water-Quality Characteristics, 1993-94”. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 97-4131.
- 21) Kuo, J.T., Liu, W.C., Lin, R.T., Lung, W.S., Yang, M.D., Yang, C.P., Chu, S.C., 2003. Water quality modeling for the Feitsui Reservoir in northern Taiwan. *Journal of the American Water Resources Association* 39(3), 671- 687.
- 22) Kuo, J.T., Wu, J.H., Chu, W.S. .2006. Water quality simulation of Te-Chi Reservoir using two-dimensional models. *Water Science and Technology* 30: (2), 63-72.
- 23) Yang and Li. 2012. Prediction of water temperature in stratified reservoir and effects on downstream irrigation area, Wuhan University, *China Physics and Chemistry of the Earth*, Volume 53, p. 38-42.
- 24) Deus, R., Brito, D., Mateus, M., Kenov, I., Fornaro, A., Neves, R., Alves, CN., 2013 Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Para, Brazil) using a two-dimensional water quality model. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 1–12.
- 25) Zyfi, A., and Grazhdani, S. .2014. Application of CE-QUAL-W2 model to water quality simulation in Prespa Lakes, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. : 3(5)