نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و ششم، شماره چهارم، ۱۳۹۸
۵۳-۷۳
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.14971.3010

مدل‌سازی عددی لایه‌بندی حرارتی و کیفیت آب مخزن سد با استفاده از مدل کیفی CE-QUAL-W2

*مصطفی صالحی[۱]، ذبیح‌الله خانی تملیه[۲]، نوید پرچمی[۳] و ظاهر احمدپور[۴]

[۱]مربی عضو علمی گروه مهندسی کشاورزی، دانشگاه پیام‌نور، تهران، ایران، [۲]دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه، [۳]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد سازه‌های آبی کارمند شرکت آب منطقه‌ای پیرانشهر، [۴]دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۳ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰٤/۱۷

چکیده

سابقه و هدف: یکی از مسائل مهم در مدیریت کیفی منابع آب، تعیین لایه‌بندی حرارتی و به دنبال آن سطح تغذیه‌گرایی در مخازن سدها و دیگر پیکره‌های آبی است. تعیین لایه‌بندی حرارتی با استفاده از مدل‌های کیفی صورت می‌گیرد. در انتخاب یک مدل کیفی آب باید تبادلی بین پیچیدگی مدل، قابلیت اطمینان لازم، هزینه عملیات و زمان در اختیار صورت پذیرد. تعیین پارامترهای شاخص تغذیه‌گرایی مانند غلظت فسفر و نیتروژن کل در دریاچه، غلظت متوسط و بیشینه کلروفیل a و میزان جلبک خشک با استفاده از این معادلات نیازمند به کم‌ترین داده‌های کیفی بوده و زمان و هزینه کم‌تری در مقایسه با مدل‌سازی‌های پیچیده رایانه‌ای طلب می‌کند. در پژوهش حاضر، کیفیت آب مخزن سد مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 که یک نرم‌افزار کارآمد در زمینه تحلیل و آنالیز کیفی آب مخازن و دریاچه‌ها می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. براساس نتایج حاصله مخزن سد مهاباد دارای یک لایه‌بندی نسبتاً قوی تابستانه است که از اواخر فروردین‌ماه شروع شده و در مردادماه به اوج خود می‌رسد، با شروع فصل پاییز و هم‌زمان با کاهش میزان تشعشعات ورودی به مخزن لایه‌بندی شکل گرفته نیز به‌سمت اختلاط پیش می‌رود به‌گونه‌ای که در آذرماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. از نظر تغییرات غلظت کل جامدات محلول (TDS) نیز می‌توان گفت که روند تغییرات نسبت به عمق یک سیر صعودی دارد، طوری‌که بیشینه غلظت در تمام طول سال در کف مخزن می‌باشد. تغییرات اکسیژن محلول نسبت به عمق آب در مخزن نیز سیر نزولی دارد، این تغییرات از خردادماه شروع شده و تا اواخر تابستان ادامه می‌یابد طوری‌که در این دوره از سال میزان غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه به صفر می‌رسد که این وضعیت در نهایت باعث تولید رنگ و بوی نامطبوع در مخزن می‌گردد.

مواد و روش‌ها: سد مخزنی مهاباد یک سد خاکی در رودخانه مهاباد، غرب شهر مهاباد واقع در استان آذربایجان غربی است. سد مهاباد دارای ظرفیت اسمی ۱۹۷ میلیون مترمکعب و ۱۷۲ میلیون مترمکعب ظرفیت مفید است که علاوه بر تأمین آب آشامیدنی به مهاباد، بیش از ۱۲ هزار هکتار زمین کشاورزی در شهر تحت پوشش آن قرار دارد. سد همچنین دارای نیروگاه برق‌آبی است. ساخت‌وساز در سال ۱۳۵۰ شمسی شروع و سد در سال ۱۳۵۲ تکمیل شد. در این

* مسئول مکاتبه: salehi.mostafa6@gmail.com

پژوهش مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی (ائتروفیکی) در سد مهاباد استفاده شد. سپس هندسه مخزن سد مهاباد، به مدل معرفی شده است. برای این کار با استفاده از جدیدترین نقشه‌های توپوگرافی مخزن سد و نرم‌افزار اتوکد اقدام به ایجاد پروفیل‌های عرضی در مسیر خط‌القعر مخزن و در فواصل معین کرده و با اندازه‌گیری پروفیل‌ها به فواصل دومتری در عمق، اطلاعات به‌دست آمده وارد فایل عمق‌سنجی (بسیمتری) شد. جهت بررسی آنالیز حساسیت موارد ۱- ضریب پوشش باد (WSC) ۲- ضریب نفوذ عمقی نور به آب (EXH2O) ۳- ضریب دمای رسوب (TSED) ٤- ضریب تابش خورشیدی جذب شده توسط سطح آب (BETA) ٥- ضریب لزجت گردابه افقی (AX) ٦- ضریب پخش گردابه افقی (DX) ۷- ضریب اصطکاک کف (FRICC)، مورد بررسی قرار گرفت.

یافته‌ها: پس از انجام این پژوهش نتایج به‌طور خلاصه به‌صورت زیر حاصل شد. ضریب پوشش باد در دوران لایه‌بندی بر تغییرات دمایی در رولایه تأثیر چشمگیری می‌گذارد. با افزایش تأثیر باد در دریاچه، لایه‌بندی حرارتی به‌سمت اختلاط پیش می‌رود. در دوران اختلاط کامل مخزن با افزایش ضریب، دمای آب تا ٤ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. ولی تأثیر این پارامتر در دوران اختلاط مخزن چشمگیر نیست. اختلاف حرارتی زیر لایه و رو لایه ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. از آن‌جایی‌که دوران اختلاط در فصول سرد از سال اتفاق می‌افتد بنابراین نور، زیاد پارامتر تأثیرگذاری بر افزایش دمای آب مخزن نخواهد بود؛ بنابراین می‌توان از تأثیر این پارامتر در دوران اختلاط چشم‌پوشی کرد. هرچه قدر ضریب BETA افزایش می‌یابد، مخزن به‌سمت اختلاط پیش می‌رود. از آنجایی‌که این ضریب نیز خطای محسوسی را در پروفیل حرارتی به‌جای نمی‌گذارد. نتایج حاصل از واسنجی مدل نسبت به پروفیل حرارتی نشان می‌دهد که اعمال ضرایب مناسب برای پارامترهای حساس و تأثیرگذار، می‌تواند در معرفی هرچه بهتر شرایط محیطی حاکم بر منطقه اعم از وضعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و هواشناسی، به محیط نرم‌افزار مؤثر بوده و در تطبیق هرچه بهتر داده‌های خروجی و مشاهداتی نقش به‌سزایی را ایفا نماید. با تشدید یافتن لایه‌بندی حرارتی، لایه‌بندی شوری نیز اتفاق می‌افتد و اوج این لایه‌بندی نیز هم‌زمان با لایه‌بندی حرارتی و در مرداد رخ می‌دهد و به‌دنبال آن و با گذر از تابستان به‌تدریج از شدت لایه‌بندی شوری کاسته شده و در نهایت از اوایل پاییز مخزن از نظر شوری به اختلاط کامل می‌رسد.

نتیجه‌گیری: در این مطالعه، مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی تغذیه‌گرایی و لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد مهاباد مورداستفاده قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مخزن سد مهاباد دارای سیکل لایه‌بندی تابستانه می‌باشد، به‌گونه‌ای که از اواخر فروردین‌ماه و با افزایش دمای هوا به‌تدریج لایه‌های حرارتی در مخزن پیدا شده و در اواسط تابستان به اوج خود می‌رسد. با گذر از فصل تابستان و ورود به فصول سرد سال لایه‌بندی شکل گرفته به‌تدریج تعدیل شده طوری‌که در آذرماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. سد مهاباد در یک اقلیم سرد واقع شده است طوری‌که دمای آب در طول زمستان به زیر ٤ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد، بنابراین انتظار می‌رود که لایه‌بندی زمستانه (لایه‌بندی معکوس) نیز در مخزن رخ دهد. همچنین میزان تغییرات غلظت (TDS) در عمق متأثر از لایه‌بندی حرارتی در مخزن بوده و روند تغییرات آن عکس تغییرات دمایی می‌باشد. غلظت اکسیژن محلول در آب (DO) نیز طبق انتظار به‌گونه‌ای است که در طول دوران لایه‌بندی با افزایش عمق کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: سد مهاباد، کیفیت، لایه‌بندی، CE-QUAL-W2

مقدمه

یکی از مهم‌ترین مسائل مرتبط با بهره‌برداری و محیط‌زیست مخازن سدها، مسأله پیش‌بینی کیفیت آب مخازن و جریان خروجی از آن طی دوران بهره‌برداری می‌باشد. بروز لایه‌بندی حرارتی و افزایش مواد مغذی آب (وتروفیکاسیون یا تغذیه‌گرایی) در مخازن موجب افت شدید کیفیت آب و عدم توانایی آن در تأمین حد مطلوب نیازهای مختلف و به مخاطره افتادن حیات آبی اکوسیستم پایین‌دست رودخانه می‌شود. این پدیده با افزودن بر رشد جلبک‌ها و گیاهان آبزی در مخازن و در نتیجه کاهش مقادیر اکسیژن محلول در آب، افت کیفیت آب و افزایش رسوب‌گذاری در مخزن را سبب می‌گردد (۱۸). چوی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از مدل دوبعدی کیفی به بررسی تأثیر افزایش حجم مخزن بر هیدرودینامیک و پارامترهای کیفی پرداختند. پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل اثر افزایش حجم مخزن را بر لایه‌بندی توسط مدل مورد پیش‌بینی قرار دادند. نتایج نشان دادند که پس از بازسازی سد لایه‌بندی حرارتی شدیدتر شده و دوره آن نیز افزایش می‌یابد (۲). ما و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد کوریس در قبرس توسط مدل دوبعدی کیفی CE-QUAL-W2 پرداختند. این مخزن در اغلب طول سال دارای لایه‌بندی حرارتی بوده و در اوایل بهمن اختلاط در مخزن رخ می‌دهد که پارامترهای هواشناسی به‌عنوان مهم‌ترین پارامترهایی هستند که بر شروع اختلاط در مخزن تأثیرگذارند. آن‌ها در ادامه اثر آبگیری انتخابی را بر روی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد با تعریف سناریوهای برداشت آب از ترازهای مختلف مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که طرح‌های مختلف برداشت آب نتوانست بر روی الگوی لایه‌بندی مخزن در طول سال تأثیری داشته باشد که علت آن حجم برداشت آب نسبتاً کم از سد بود. بااین‌حال خروج آب از لایه‌های عمیق‌تر توانست انتقال حرارت از سطح به عمق را تسهیل بخشیده و باعث عمیق‌تر شدن رولایه شود (۱۲). افشار و همکاران (۲۰۱۱)، با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به واسنجی خودکار پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی دما در مدل CE-QUAL-W2 که برای شبیه‌سازی دما در مخزن سد کرخه استفاده شده بود، پرداختند. با توجه به آنالیز حساسیت انجام گرفته، پارامترهای ضریب پوشش باد (WSC) در طی روزهای شبیه‌سازی، ضریب محو شدن نور در آب (EXH2O) و ضریب جذب نور در سطح آب (Beta) به‌عنوان پارامترهای مؤثر در واسنجی دما انتخاب شدند (۱). سلیمانی و همکاران (۲۰۱۲)، لایه‌بندی حرارتی و رقوم مناسب آبگیری از سد کرخه را با به‌کارگیری مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار دادند. مخزن سد برای مدت ۱۵ سال مورد شبیه‌سازی قرار گرفت که طبق نتایج مشخص گردید که در فصول بهار تا پاییز لایه‌بندی حرارتی در مخزن وجود دارد. همچنین طبق نتایج این پژوهش به‌منظور کنترل شرایط دمایی پایین‌دست بهتر است که دریچه در تراز ۱۸۱ متری نسبت به سطح تراز آب دریا منظور گردد (۱۷). نظریها و همکاران (۲۰۱۰)، رژیم حرارتی مخزن سد در دست احداث بختیاری را توسط مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی کردند و بر اساس تغییرات احتمالی در جریان آبدهی رودخانه سه سناریو برای سال‌های خشک، نرمال و تر تعریف و مدل را تحت این سناریوها مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در همه سناریوها یک لایه راکد در زیر تراز آبگیر مشاهده می‌شود و هرچه تأثیر وجود سد روی رژیم آبی بیش‌تر باشد (سال خشک)، امکان نزدیکی شرایط به وضعیت دریاچه‌ای بیش‌تر است؛ اما با کاهش آثار سد روی رژیم جریان (سال مرطوب)، کیفیت آب خروجی از همه جهات بیش‌تر تحت‌تأثیر رژیم ورودی قرار می‌گیرد (۱۳). سعیدی و همکاران در سال (۲۰۱۲) پدیده لایه‌بندی حرارتی در سد

پیشین را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده وجود یک رژیم حرارتی تقریباً پایدار بوده که اختلاط کامل را تنها در صورت بروز سیلاب‌های فصلی تجربه می‌کند. با توجه به لایه‌بندی حرارتی شکل گرفته در این مخزن، خروج آب از دریچه‌های پائینی و تخلیه از لایه پایدار عمق مخزن به اختلاط آب و بهبود کیفیت آن کمک می‌کند (١٦). کیانی صدر (۲۰۱۷) شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول با کاربرد مدل CE-QUAL-W2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان‌دهنده ایجاد لایه‌بندی حرارتی در فصل تابستان است (۱۰). دیاگو و همکاران (۲۰۰۸) به مقایسه دو مدل CE-QUAL-W2 و SNTEMP برای شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده دقیق‌تر بودن مدل CE-QUAL-W2 می‌باشد (٤). هانگ و لو (۲۰۰۸) با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به تعیین پارامترهای مدل در مدل‌سازی کیفیت آب پرداختند (۹). کیانوش و احمدیار (۲۰۱۵) به بررسی اثر قدرت لایه‌بندی حرارتی بر بازده اختلاط مصنوعی در مخازن سدها پرداختند. آن‌ها در پژوهش خود از یک مدل تجاری کاملاً سه‌بعدی دینامیک سیالات محاسباتی برای مطالعه اختلاط مصنوعی لایه‌بندی حرارتی در یک مخزن آزمایشگاهی استفاده کردند. نتایج حاصل از مدل عددی، قدرت لایه‌بندی عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان انرژی لازم برای اختلاط کامل در مخزن می‌باشد. همچنین با بررسی اختلاط در دو مخزن با قدرت لایه‌بندی برابر، مشخص گردید که با کاهش میزان هوای تزریق شده به سیستم، میزان کم‌تری از انرژی ورودی به سیستم طی آشفتگی اضمحلال می‌یابد و در نتیجه آن، بازده اختلاط مصنوعی افزایش پیدا خواهد کرد (۱۱). اعتماد شهیدی و همکاران (۲۰۱۰)، مخزن سد پانزده خرداد را توسط مدل یک‌بعدی شبیه‌سازی دینامیکی مخزن[1]، شبیه‌سازی نمودند. طبق نتایج مدل مشخص گردید که در طول ۲۱۰ روز از هر سال، در مخزن لایه‌بندی حرارتی حضور دارد. همچنین این پژوهشگران اختلاط مصنوعی توسط هوادهی و تأسیسات مکانیکی را بررسی نمودند و طبق نتایج مشخص گردید که بازده سیستم هوادهی بسیار بیش‌تر از تأسیسات مکانیکی است (٦). ابراهیمی و همکاران (۲۰۱۵) شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و شوری در مخزن سد بافت را با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها نشان دادند که لایه‌بندی حرارتی در ۹ ماه از سال رخ می‌دهد؛ که این امر از آوریل شروع و در اوت و سپتامبر به اوج خود می‌رسد. همچنین نتایج حاصل از پژوهش‌شان نشان داد که همبستگی شوری با همبستگی گرمایی وجود دارد. بیش‌ترین مقدار شوری ۳۰۷ میلی‌گرم در لیتر است که با حداکثر مطلوب (۵۰۰ میلی‌گرم / لیتر) نشان‌دهنده یک وضعیت مطلوب برای مخزن سد بافت از نظر آب آشامیدنی و کشاورزی است (۵). ثابتی و همکاران (۲۰۱۷) شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و شوری سد ماملو را با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از پژوهش‌شان نشان دادند که مخزن در تابستان و اختلاط عمودی در فصل زمستان، شیب تابشی را تجربه خواهد کرد. همچنین نتایج نشان دادند که لایه‌بندی حرارتی و شوری در یک زمان، غالب می‌شوند. علاوه بر این با افزایش ۲/۵ درصدی در نیاز آبی کاهش و دبی افزایش می‌یابد. همچنین در تابستان لایه‌بندی حرارتی کاهش و شدت دمایی افزایش می‌یابد (۱۵). حیدرزاده و همکاران (۲۰۱٤) لایه‌بندی حرارتی مخازن سدها در زمینه تغییرات پروفیل دما و غلظت را با استفاده از مدل‌های ساده ریاضی مورد بررسی قرار دادند، نتایج حاصل از

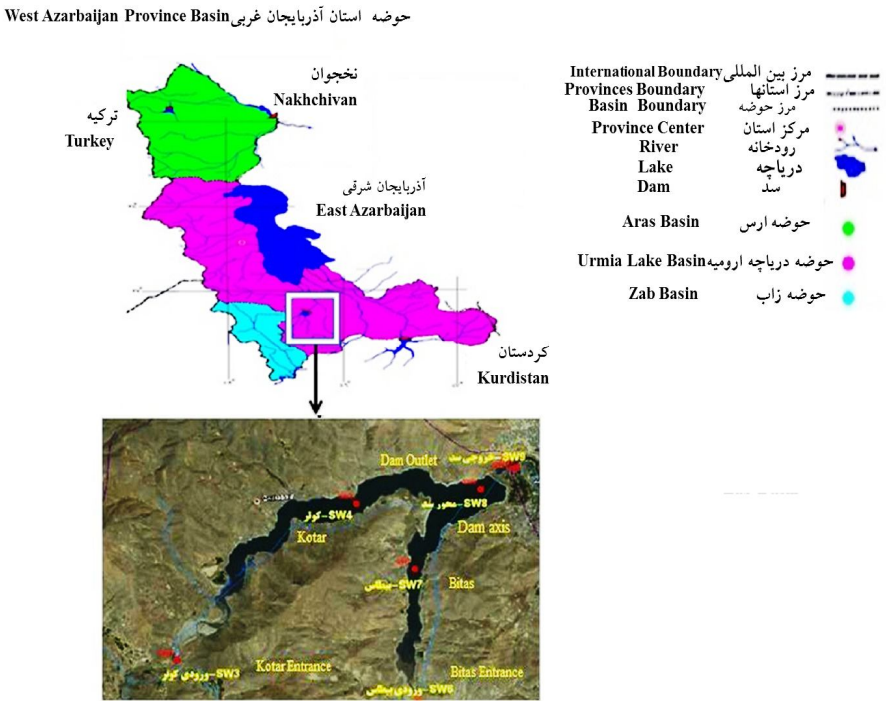
1- Dynamics Reservoir Simulation Model (DYRESM)

پژوهش آن‌ها نشان داد که میزان خطا در طول دوره شبیه‌سازی‌شده ۰/٤٥ سانتی‌گراد نشان داد، همچنین مدل اختلاط کامل مخزن به‌طور تقریبی خطای متوسطی کم‌تر از ۵ درصد را نسبت به نرم‌افزار CE-QUAL-W2 نشان داد (۸). رضایی برندق و همکاران (۲۰۱۸) به بررسی لایه‌بندی حرارتی و کیفی سد تهم زنجان با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج حاصل از پژوهش آن‌ها بیانگر وجود یک دوره لایه‌بندی حرارتی در مخزن است که حدود هشت ماه از سال به طول می‌انجامد. این پدیده از اواخر فروردین‌ماه شروع در مرداد و شهریور به اوج خود می‌رسد (اختلاف ۲۰ درجه سانتی‌گراد بین رولایه و زیرلایه) همچنین در ماه‌های دی تا فروردین نیز اختلاط مشاهده گردید. در فصل پاییز با کاهش اختلاف دمای آب در لایه‌های بالایی و پایینی لایه‌بندی حرارتی در مخزن تضعیف و در فصل زمستان کاملاً ناپدید گردید. همچنین نتایج دلالت بر وجود لایه‌بندی شوری هم‌زمان با لایه‌بندی حرارتی در مخزن داشت (١٤). هی و همکاران (۲۰۱۷) مدل‌سازی اثر کنترل پرده کنترل دما در ساختار لایه‌بندی حرارتی عمق مخزن سنبانگسی[1] Sanbanxi مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها در پژوهش از یک مدل هیدرودینامیکی دوبعدی استفاده کردند. که در آن شبیه‌سازی جریان تحت سناریوهای مختلف TCC[2] و قوانین ناپایداری و جریان‌های خروجی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد هنگامی که نسبت آب نگه‌دارنده (Pr) پایین‌تر از TCC افزایش می‌یابد، تفاوت دما بین جریان ورودی و خروجی به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد، در حالی‌که پایداری حرارتی ابتدا افزایش می‌یابد و بعداً کاهش می‌یابد؛ که در آن حداکثر پایداری حرارتی در Pr=٦٢/٥٪ رخ می‌دهد؛ که این نسبت برای مقادیر بیش‌تر از ۸۰ درصد در اعماق تفاوت بین دمای ورودی و خروجی بدون افزایش پایداری حرارتی است (۷). سد مهاباد علاوه بر تأمین آب شرب شهرستان مهاباد در زمینه کشاورزی و زیست‌محیطی نیز کاربرد دارد. در مطالعات قبلی تمرکز بر روی یکی از پارامترهای کیفی آب بوده است در حالی‌که جهت مطالعات کیفی آب باید پارامترهای مختلف بررسی شود؛ اما در این پژوهش علاوه بر اکسیژن محلول، کل مواد جامد محلول، لایه‌بندی حرارتی در زیر لایه و رو لایه نیز مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در اکثر مطالعات سایر سدهای کشور از لحاظ لایه‌بندی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند بنابراین عدم مطالعه کیفی آب در سد مهاباد ایجاب کرد که مطالعات کیفی سد مهاباد مورد مطالعه قرار گیرد. از این‌رو در این پژوهش، کیفیت آب مخزن سد مهاباد از لحاظ لایه‌بندی حرارتی واقع در استان آذربایجان غربی، با استفاده از مدل CE-QUAL-W2، موردمطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه واقع در استان آذربایجان غربی (حوضه رودخانه مهاباد) ناحیه‌ای است نسبتاً هموار و کم‌ارتفاع، واقع در عرض جغرافیایی نسبتاً بالا و دور از دریاهای آزاد که مجموعه این مشخصه‌ها سبب ایجاد آب و هوایی اقلیمی سرد و بری در منطقه شده است. سد مخزنی مهاباد در حوضه رودخانه مهاباد و در یک کیلومتری غرب شهر مهاباد قرار دارد. موقعیت جغرافیائی در طول جغرافیایی ٤٥ درجه و ٤٣ دقیقه و ۳۰ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی، ٣٦ درجه و ٤٦ دقیقه و ۳۰ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱).

1- Sanbanxi
2- Temperature-Control Curtain



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی سد مخزنی مهاباد.

Figure 1. Geographical location of Mahabad Reservoir Dam.

معرفی مدل CE-QUAL-W: قابلیت‌های مدل CE-QUAL-W2 توانایی پیش‌بینی تراز سطح آب، سرعت در جهات مختلف، دما و پارامترهای کیفی آب را دارد. کاربر می‌تواند، مدل را برای رودخانه، مصب، مخازن، دریاچه‌ها و یا هر ترکیبی از آن‌ها با هر تعداد شاخه و انشعاب به‌کار برد. برای اجرای مدل حداقل داده‌های موردنیاز شامل ورودی‌ها، خروجی‌ها، داده‌های هواشناسی و شرایط اولیه است که قابلیت‌های این مدل را به‌طور خلاصه به‌صورت زیر می‌توان بیان کرد. ۱- مدل‌سازی هیدرودینامیکی رودخانه و مخزن، ۲- شبیه‌سازی دما ۳- شبیه‌سازی پارامترهای کیفی آب، ٤- مناسب برای شبیه‌سازی دوره‌های درازمدت، ۵- مدل‌سازی شاخه‌های فرعی متعدد در توده‌های آبی دارای هندسه پیچیده، ٦- پیکره‌های آبی متعدد متصل، ۷- فاصله‌های متغیر طولی و ارتفاعی در شبکه‌بندی متغیرها یا در مرکز و یا در مرز سلول‌ها معرفی می‌شوند.

معادلات حاکم: این مدل بر اساس روش تفاضل محدود معادلات متوسط‌گیری‌شده در عرض شامل، سطح آزاد آب رابطه ۲، مومنتم در جهت z رابطه ۲، مومنتم در جهت x رابطه ۳، پیوستگی رابطه ٤، انتقال اجزا رابطه ۵ و معادلات حالت رابطه ٦ که ارتباط بین چگالی، دمای آب و غلظت مواد جامد محلول و معلق را برقرار می‌کند، مورد حل قرار داده و قادر به محاسبه تراز سطح آزاد، فشار، چگالی، سرعت قائم و افقی و غلظت اجزا می‌باشد. برای حل یک معادله عددی، ابتدا نیاز به تعریف شبکه محاسباتی می‌باشد. در واقع شبکه، پیکره آبی را به یک‌سری سلول‌های محاسباتی تقسیم می‌کند که موقعیت هر سلول توسط شماره ردیف (I) و شماره لایه (K) تعریف می‌شود. داده‌های موردنیاز برای اجرای مدل را می‌توان به ٦ دسته زیر تقسیم کرد: ۱- داده‌های هندسی، ۲- شرایط اولیه، ۳- شرایط مرزی، ٤- پارامترهای هیدرولیکی، ۵- پارامترهای جنبشی و ٦- داده‌های واسنجی (۳).

$$\frac{\partial B_\eta \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\int_\eta^h UBdz - \int_\eta^h qBdz \qquad (۱)$$

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \rho g \cos\alpha \qquad (۲)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB\sin\alpha + gB\cos\alpha\frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g\cos\alpha B}{\rho}\int_\eta^z \frac{\partial \rho}{\partial x}dz + \frac{1}{\rho}\frac{\partial B\tau_{xz}}{\partial z} + qBU_x \qquad (۳)$$

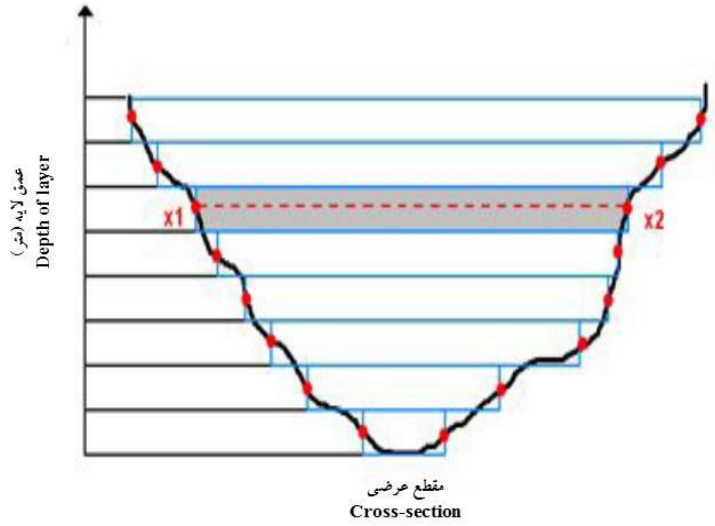
$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \qquad (٤)$$

$$\frac{\partial B\phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\phi}{\partial z} - \frac{\partial (BD_x \frac{\partial \phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial (BD_z \frac{\partial \phi}{\partial z})}{\partial z} = q_\phi B + s_\phi B \qquad (۵)$$

$$\rho = f\,(T_w, \phi_{TDS}, \phi_{SS}) \qquad (٦)$$

که در آن‌ها، x و z مختصات افقی و قائم، B عرض پیکره آبی، U سرعت افقی میانگین عرضی، W سرعت قائم میانگین عرضی، p چگالی آب، t زمان، P فشار، g شتاب ثقل، q دبی ورودی و خروجی، a شیب کف پیکره آبی، ϕ غلظت اجزا متوسط در جهت عرضی، Dz و Dx ضرایب پخش حرارت و اجزا در جهت‌های x و z، τ_{xx} و τ_{xz} تنش برشی آشفته در جهت x و z، q_ϕ غلظت اجزای ورودی و خروجی، s_ϕ ترم مربوط به منبع تولید یا هدررفت اجزای کیفی، β_η عرض سطح آب که با زمان و مکان متغیر می‌باشد، η محل سطح آزاد آب و h عمق می‌باشد. در معادله حالت نیز چگالی تابعی از Tw دمای آب، ϕ_{TDS} غلظت مواد جامد محلول و ϕ_{SS} غلظت مواد جامد معلق می‌باشد.

هندسه مخزن: یکی از مهم‌ترین و در عین‌حال وقت‌گیرترین فایل ورودی در نرم‌افزار CE-QUAL-W2 فایل عمق‌سنجی مخزن مورد مطالعه است. در این فایل باید از روی نقشه توپوگرافی، مخزن سد را به بخش‌هایی با مشخصات ظاهری تقریباً یکسان تقسیم کرده و در هر یک از این بخش‌ها بسته به حساسیت پروژه در لایه‌هایی با اعماق مختلف مقطع عرضی به مدل معرفی گردد. در این پژوهش، هندسه مخزن سد مهاباد، به مدل معرفی گردید. برای این کار با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی مخزن سد و نرم‌افزار اتوکد اقدام به ایجاد پروفیل‌های عرضی در مسیر خط‌القعر مخزن و در فواصل معین کرده و با اندازه‌گیری پروفیل‌ها به فواصل دومتری در عمق، اطلاعات به‌دست آمده وارد فایل عمق‌سنجی شد. به‌عنوان مثال اگر پروفیل عرضی مقطعی مطابق شکل ۲ باشد. بعد از تعیین فواصل بین لایه‌ها (با توجه به این‌که مدل CE-QUAL-W2 شبکه‌بندی را مستطیلی در نظر می‌گیرد) باید سعی شود که برداشت نقاط طوری صورت گیرد که در سطح پروفیل تغییر چندانی حاصل نگردد. بنابراین برداشت نقاط میانی عرض‌های مستطیل توصیه می‌گردد. در این شبیه‌سازی سد مهاباد در دو قسمت مجزا (شاخه اصلی سد و شاخه فرعی ورودی به مخزن) به ۳۵ قطعه (شامل ۳۱ مقطع عرضی و چهار بخش با عرض‌های صفر در ابتدا و انتها شاخه اصلی و شاخه فرعی بر اساس قواعد مدل) که به فواصل متغیر ۲۶۰ تا ۱۰۰۰ متر تقسیم شد. همچنین بعد قائم مخزن به ۲۵ لایه تقسیم شده که عمق لایه‌ها به‌میزان ثابت ۲ متر در نظر گرفته شده است. به‌طورکلی آن‌چه باید در فایل هندسه مخزن وارد شود به‌ترتیب شامل فواصل طولی بین بخش‌ها، تراز اولیه آب در اولین روز شبیه‌سازی، زاویه قرارگیری پروفیل‌های عرضی نسبت به شمال جغرافیایی، زبری کف مخزن برای مقاطع طولی مختلف، فواصل لایه‌ها از هم و عرض متوسط سلول‌ها در پروفیل‌های عرضی است که در قالب فایل bth.npt به مدل می‌شوند.



شکل ۲- معرفی عرض متوسط هر لایه در فایل عمق‌سنجی (بسیمتری).

Figure 2. Introduce the average width of each layer in a depth gage (bathymetry) file.

آنالیز حساسیت مدل: لایه‌بندی یک روند اساسی تأثیرگذار بر کیفیت آب در دریاچه‌ها و مخازن است. تعیین وجود لایه‌بندی و مشخصات آن برای منابع آبی، مسأله‌ای ضروری است. ساده‌ترین روش جهت تشخیص نوع لایه‌بندی، اندازه‌گیری مستقیم کیفیت آب و دما در لایه‌های مختلف مخزن یا دریاچه است. برای مخازن سدها از روش‌های اندازه‌گیری‌های میدانی و روش‌هایی برای تخمین پتانسیل لایه‌بندی پیشنهاد گردیده است. در این پژوهش داده‌های موجود از سازمان آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی دریافت گردید که بر مبنای اندازه‌گیری‌های میدانی صورت پذیرفته است. به‌منظور تعیین مقادیر عددی مناسب برای ضرایب تأثیرگذار در تحلیل پارامترهای مختلف و تعریف دقیق محیط مسأله به مدل طوری‌که با حداقل خطای ممکن بتوان بهترین و قابل اطمینان‌ترین نتایج را از مدل انتظار داشت، باید مدل نسبت به این ضرایب حساسیت‌سنجی شود، در این مرحله، آن دسته از پارامترهایی که مدل نسبت به آن‌ها حساسیت زیادی نشان می‌دهد، مشخص‌شده و سعی شد تا با توجه به شرایط مسأله مقدار بهینه‌ای برای آن‌ها انتخاب شود. از مهم‌ترین این ضرایب می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که در ادامه به‌طور مفصل مورد بحث و تحلیل قرار گرفته‌اند: ۱- ضریب پوشش باد (WSC)، ۲- ضریب نفوذ عمقی نور به آب (EXH2O)، ۳- ضریب دمای رسوب (TSED)، ٤- ضریب تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح آب (BETA)، ٥- ضریب ویسکوزیته گردابه افقی (AX)، ٦- ضریب پخش گردابه افقی (DX) و ۷- ضریب اصطکاک کف (FRICC).

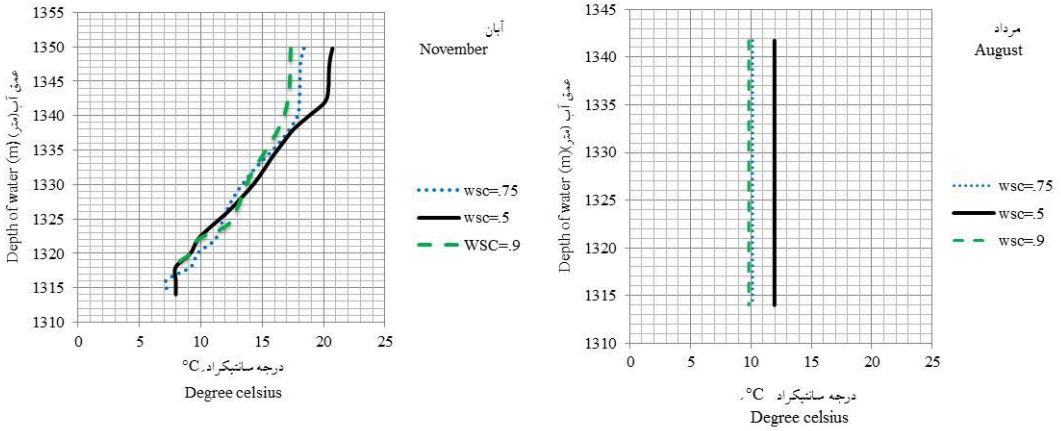
$$F_d = \sqrt{\frac{1}{ge}}\frac{LQ}{DV} \qquad (۷)$$

که در آن، Fd=۰/۰٤۲<<۰/۳۲: عدد فرود، g شتاب جاذبه بر حسب متر بر مجذور ثانیه، L طول مخزن بر حسب متر، Q دبی بر حسب مترمکعب بر ثانیه، D بر حسب متر و V حجم بر حسب مترمکعب بر ثانیه.

نتایج و بحث

ضریب پوشش باد (WSC): باد یکی از مهم‌ترین پارامتری است که در طول سال می‌تواند در رفتار

هیدرودینامیکی بدنه آبی تأثیرگذار باشد. ضریب پوشش باد، بیش‌ترین تأثیر را بر روی دما در طول کالیبراسیون داشته و باید قبل از دیگر ضرایب مقدار آن مشخص شود. این ضریب شاخصی از شرایط جغرافیایی و توپوگرافی منطقه و مؤثر بر سرعت باد است، به‌طوری‌که هرچه این ضریب، عدد بزرگ‌تری باشد، تأثیر موانع در کاهش سرعت باد کم‌تر می‌شود. در صورتی‌که مخزن در منطقه‌ای باشد که هیچ پوشش گیاهی در منطقه نباشد و هیچ مانعی جلوی وزش باد روی مخزن را نگیرد مقدار این ضریب یک خواهد بود و در صورت گسترده و انبوه شدن پوشش گیاهی در اطراف مخزن و افت تراز آب مقدار این ضریب از ۰/۵ تا ۰/۹ متغیر خواهد شد. برای روشن شدن تأثیر این ضریب بر روی پروفیل‌های دمایی مقدار آن به‌ترتیب ۰/۹، ۰/۷۵ و ۰/۵ در نظر گرفته شد و اثر آن بر روی پروفیل‌ها مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).



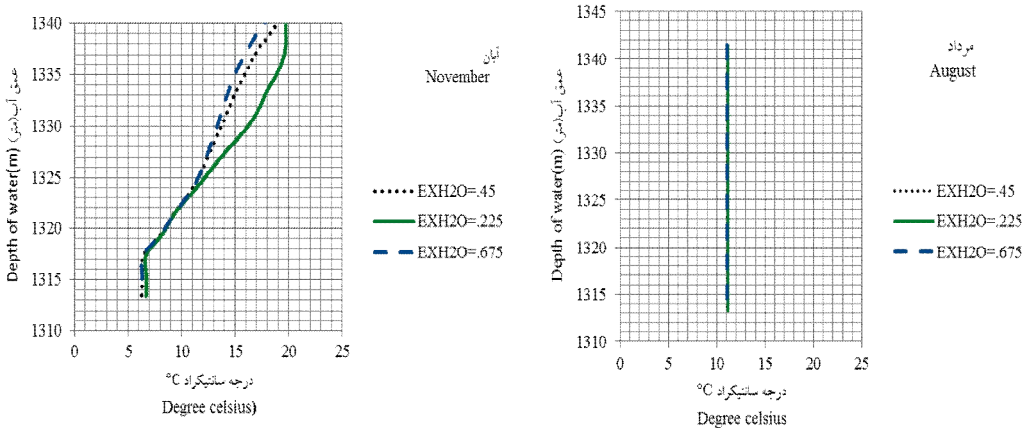
شکل ۳- تأثیر پوشش باد در دوران اختلاط مخزن.

Figure 3. Effect of the windfall during reservoir mixing.

همان‌طور که از شکل ۳ معلوم می‌شود ضریب پوشش باد در دوران لایه‌بندی بر تغییرات دمایی در رولایه تأثیر چشمگیری می‌گذارد. با افزایش تأثیر باد در دریاچه، لایه‌بندی حرارتی به‌سمت اختلاط پیش می‌رود. از شکل ۳ نیز می‌توان دریافت که در دوران اختلاط کامل مخزن با افزایش ضریب، دمای آب کاهش می‌یابد. ولی تأثیر این پارامتر در دوران اختلاط مخزن چشمگیر نیست.

ضریب نفوذ عمقی نور به آب (EXH2O): این ضریب وابسته به عمقی است که نور می‌تواند به داخل ستون آب نفوذ کند. واحد آن یک بر متر است. بدین معنی که هرچه عدد کوچک‌تری برای این ضریب وارد گردد، عمق نفوذ نور به داخل آب بیش‌تر است. برای آب خالص میزان این ضریب ۰/۲ است. هرچه مقدار کدورت آب زیاد باشد باید این ضریب بیش‌تر در نظر گرفته شود. مقدار این ضریب به‌میزان ۵۰ درصد از میزان پیش‌فرض مدل افزایش و کاهش داده شد تا تأثیر آن بر پروفیل‌های حرارتی مشخص شود. شکل ٤ پروفیل‌های حرارتی در سه حالت مقدار پیش‌فرض برای ضریب مذکور، ۰/٤٥ و ۵۰ درصد کاهش و افزایش برای دوره لایه‌بندی مخزن (مردادماه) را نشان می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود کاهش این ضریب از مقدار پیش‌فرض به معنی نفوذ بیش‌تر نور به داخل آب است که این امر سبب می‌گردد که آب تا

اعماق پایین‌تر تحت‌تأثیر نور قرار گرفته و دمای آن افزایش یابد و در کل باعث افزایش عمق رولایه گردد. به‌عبارت بهتر کم‌بودن این ضریب به شکل‌گیری لایه‌بندی حرارتی و بیش‌تر بودن آن به اختلاط مخزن سرعت می‌بخشد. زیر لایه تحت‌تأثیر این پارامتر قرار نمی‌گیرد.

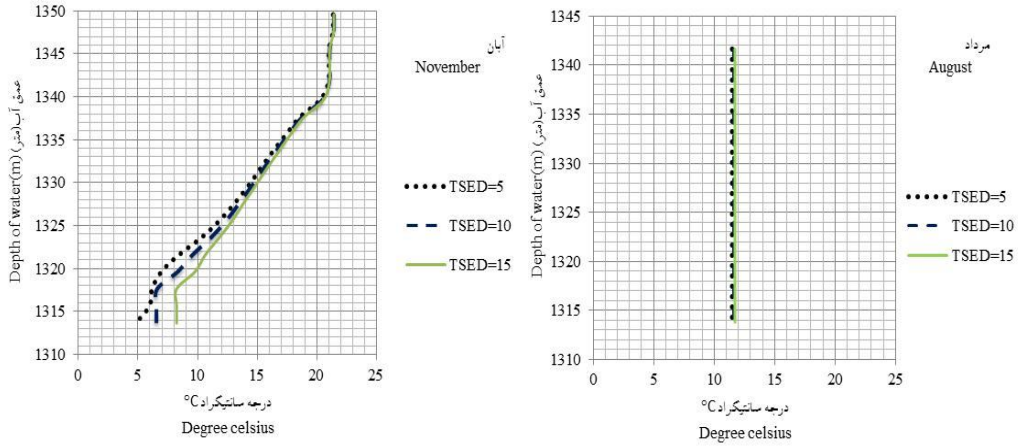


شکل ٤- تأثیر ضریب EXH2O در دوران لایه‌بندی مخزن.

Figure 4. Effect of EXH2O in reservoir layering.

شکل ٤ تأثیر همین پارامتر را بر پروفیل حرارتی در دوران اختلاط نشان می‌دهد. ازآن‌جایی‌که دوران اختلاط در فصول سرد از سال اتفاق می‌افتد بنابراین نور، زیاد پارامتر تأثیرگذاری بر افزایش دمای آب مخزن نخواهد بود؛ بنابراین می‌توان از تأثیر این پارامتر در دوران اختلاط چشم‌پوشی کرد. به‌منظور تعیین مقدار نهایی برای این پارامتر باید شرایط حاکم بر محیط مسأله در نظر گرفته شود. وضعیت ظاهری آب می‌تواند ملاک تعیین‌کننده میزان نفوذ نور در آب یا به‌عبارتی، ضریب پارامتر EXH2O در نظر گرفته شود. طبق اعلام وضعیت ظاهری نمونه‌های برداشت‌شده از مخزن این سد، معلوم گردید که در اکثریت مواقع آب شفاف یا کمی کدر است، بنابراین به‌نظر می‌رسد که نور در آب این مخزن می‌تواند نفوذ قابل‌توجهی داشته باشد، بنابراین مقدار ۰/۳ برای این پارامتر لحاظ گردید.

ضریب دمای رسوب (TSED): این ضریب که به معنی دمای رسوب است، به همراه ضریب تبادل حرارت در کف برای محاسبه انتقال حرارت در زیر لایه مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقدار پیش‌فرض مدل ۱۰ می‌باشد. در شکل زیر تأثیر این پارامتر بر روی پروفیل‌های حرارتی در فصول مختلف در طول دوره شبیه‌سازی آمده است. بدین‌منظور مقدار این پارامتر به‌ترتیب ۵۰ درصد افزایش و کاهش داده شد (شکل ۵).

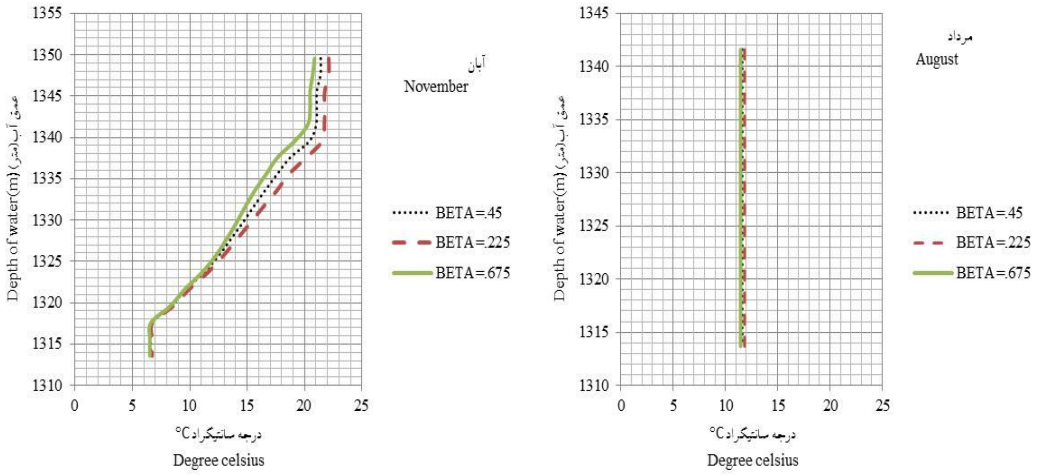


شکل ۵- تأثیر ضریب TSED در دوران لایه‌بندی مخزن.

Figure 5. Effect of TSED coefficient during reservoir layering.

تأثیر این پارامتر را نیز می‌توان در زیر لایه احساس نمود طوری‌که با افزایش عددی این ضریب در دوران لایه‌بندی مخزن، دمای نیز افزایش می‌یابد، البته به‌نظر می‌رسد که در کل تأثیر چشم‌گیری بر لایه‌بندی حرارتی نداشته باشد چراکه فقط در زیرلایه و آن هم به افزایش ۲ تا ۳ درجه‌ای دمای آب می‌انجامد. در دوران اختلاط نیز در هیچ‌یک از لایه‌های حرارتی تأثیری مشاهده نگردید؛ بنابراین برای این ضریب همان پیش‌فرض نرم‌افزار یعنی عدد ۱۰ لحاظ گردید.

ضریب تابش خورشیدی جذب‌شده توسط سطح آب (BETA): این ضریب نشان‌دهنده کسری از تابش خورشیدی است که توسط سطح آب جذب می‌شود. مقدار پیش‌فرض این ضریب برای مدل ۰/٤٥ است. بدین معنی که ٤٥ درصد تابش ورودی به مخزن توسط لایه سطحی جذب می‌شود و نشان‌دهنده قسمتی از تابش است که با طول‌موج بلند انجام می‌شود، زیرا تابش با طول‌موج بلند است که به‌آسانی جذب می‌گردد. مقدار این ضریب به‌ترتیب به‌میزان ۲۵ و ۵۰ درصد از میزان پیش‌فرض مدل افزایش و کاهش داده شد تا اثر آن بر پروفیل‌ها دیده شود. در شکل ٦ پروفیل‌های حرارتی در سه حالت مقدار پیش‌فرض برای ضریب مذکور، ۰/٤٥ و ۵۰ درصد کاهش و افزایش ضریب از مقدار پیش‌فرض نشان داده شده است. این ضریب نیز مانند ضریب EXH2O تأثیر خود را بر رولایه و میان لایه گذاشته و با کاهش مقدار عددی آن دمای این دولایه افزایش می‌یابد؛ به‌عبارت دیگر هرچه قدر ضریب BETA افزایش می‌یابد، مخزن به‌سمت اختلاط پیش می‌رود. از آن‌جایی‌که این ضریب نیز خطای محسوسی را در پروفیل حرارتی به‌جای نمی‌گذارد، بنابراین به مقدار پیش‌فرض آن در مدل بسنده شده است.



شکل ٦- تأثیر ضریب BETA در دوران لایه‌بندی مخزن (مردادماه).

Figure 6. Effect of BETA coefficient during reservoir layering.

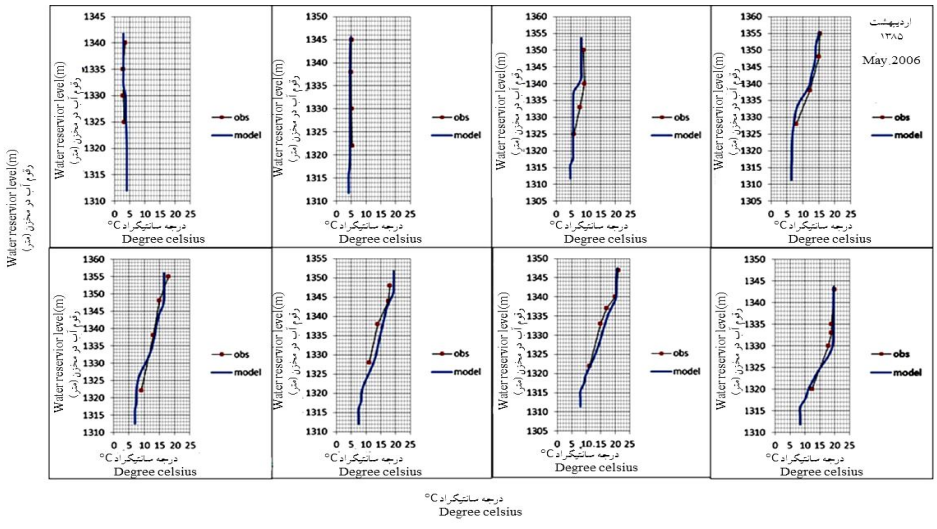
ضریب AX، DX و FRECC: این ضرایب به‌ترتیب لزجت گردابه افقی، پخش گردابه افقی و ضریب اصطکاک کف می‌باشد. مقادیر پیش‌فرض AX و DX یک و ضریب اصطکاک کف توسط یکی از روابط شزی یا مانینگ مشخص می‌گردد؛ که برای رودخانه‌ها معمولاً از رابطه مانینگ و برای مخازن از رابطه شزی با پیش‌فرض ۷۰ استفاده می‌شود. با تغییر این ضرایب به‌ترتیب ۲۵ و ۵۰ درصد افزایش و کاهش از مقدار پیش‌فرض معلوم شد که این ضرایب بر پروفیل حرارتی بی‌تأثیر بوده و از مقادیر پیش‌فرضشان استفاده شده است. با توجه به مطالب عنوان شده و انجام آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مهم و تأثیرگذار، در نهایت با انتخاب ضرایب متناسب با شرایط حاکم، محیط مسأله به نرم‌افزار معرفی گردید. جدول ۱ مقدار ارزشی ضرایب را برای سد مهاباد نشان می‌دهد. با اجرای مدل در بخش‌های مختلف مخزن معلوم گردید که تفاوت چندانی در نتایج حاصله وجود ندارد به‌عبارت دیگر می‌توان مخزن را تک‌بعدی در نظر گرفت؛ بنابراین تنها به تحلیل دو بخش ۲۱ (اولین بخش بعد از محور سد) که عمیق‌ترین بخش مربوط به مخزن می‌باشد بسنده شده است.

کالیبراسیون پروفیل حرارتی در مخزن: با تعریف مقادیر ضرایب مؤثر، مطابق جدول ۲ به مدل، سعی گردید، اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده به حداقل رسیده و در نهایت انطباق قابل‌قبولی بین این دو سری داده شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی برقرار گردد (سعی و خطا در تعیین ضرایب تا رسیدن به جواب مطلوب). کالیبراسیون مدل برای یک دوره ۸ ماهه، از بهمن ٨٤ تا شهریور ۸۵ انجام گرفت که نتایج را می‌توان در شکل ۷ مشاهده نمود.

جدول ۱- ارزش نهایی ضرایب تبادلات سطحی کالیبراسیون در مخزن سد مهاباد.

Table 1. Final value of surface coefficients of calibration in Mahabad dam reservoir.

علامت اختصاری Symbol	ارزش ضریب Coefficient value	عنوان ضریب Coefficient title
AX	1	لزجت گردابه افقی Horizontal vortex viscosity
AD	1	پخش گردابه افقی Horizontal vortex scatering
SHD	1	ضریب سایه‌اندازی Shadow Coefficient
WSC	0.5	ضریب پوشش باد Coefficient of wind cover
BETA	0.45	تابش جذب‌شده در لایه سطحی Radiation absorbed in the surface layer
EXH2O	0.3	عمق نفوذ نور Depth of permeation of light
CBHE	0.6	ضریب تبادل حرارت در کف Heat transfer coefficient on the floor
T2I	4	دمای اولیه شبیه‌سازی Initial simulation temperature
Z0	0.001	ضریب زبری باد Wind force coefficient
AFW	14	ضریب تبخیر a در تابع باد The evaporation coefficient a in the wind function
BFW	5.3	ضریب تبخیر b در تابع باد Evaporation coefficient b in the wind function
CFW	16	ضریب تبخیر c در تابع باد The evaporation coefficient c in the wind function
ALBEDO	0.25	آلبیدو Albidou
TSED	10	دمای رسوب Sediment temperature



شکل ۷- واسنجی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد مهاباد (مقطع ۲۱).

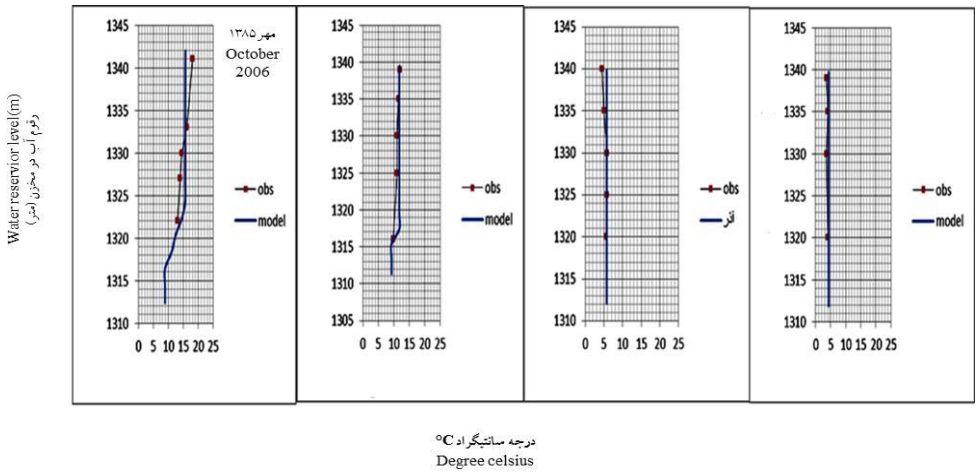
Figure 7. Calibration of the thermal layering of the Mahabad dam reservoir (section 21).

صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی پروفیل حرارتی: بعد از انجام عمل واسنجی و کسب نتایج قابل‌قبول، مدل برای یک دوره ٤ ماهه از مهر ۸۵ تا دی ۸۵ برای همان بخش مورد صحت‌سنجی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۸ و خطای صحت‌سنجی در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خطای صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی پروفیل حرارتی.

Table 2. Validation error in model simulation of thermal profile.

معیار سنجش Benchmarking	مهر ۸۵ October 2006	آبان ۸۵ November 2006	آذر ۸۵ December 2006	دی ۸۵ January 2006
AME(cm)	0.33	0.2	0.14	0.5
RMSE(cm)	0.73	0.44	0.29	1



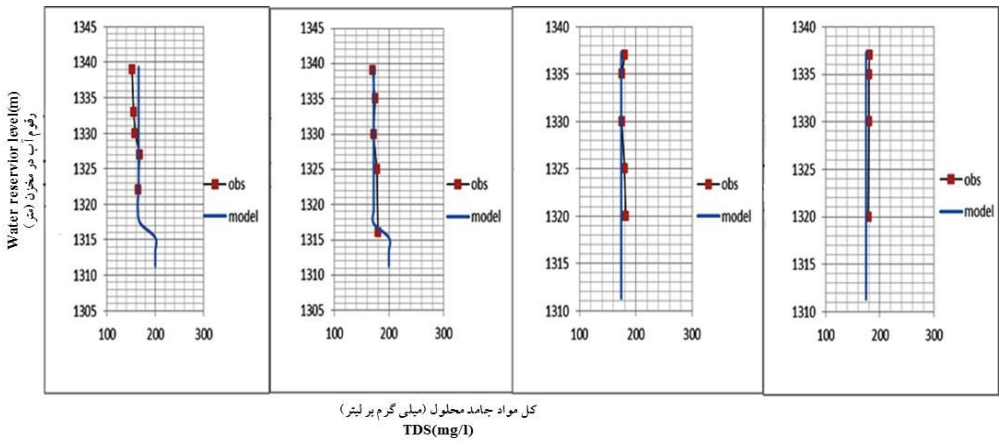
شکل ۸- صحت‌سنجی مدل به‌منظور شبیه‌سازی پروفیل حرارتی برای مقطع ۲۱.

Figure 8. Verification of the model to simulate the thermal profile for the section21.

نتایج حاصل از واسنجی مدل نسبت به پروفیل حرارتی نشان می‌دهد که اعمال ضرایب مناسب برای پارامترهای حساس و تأثیرگذار، می‌تواند در معرفی هرچه بهتر شرایط محیطی حاکم بر منطقه اعم از وضعیت هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و هواشناسی، به محیط نرم‌افزار مؤثر بوده و در تطبیق هرچه بهتر داده‌های خروجی و مشاهداتی نقش به‌سزایی را ایفا نماید. با توجه به جدول ۲ ماکزیمم مقدار میانگین خطای مطلق در صحت‌سنجی مدل در حدود ۱ درجه سلسیوس به‌دست آمد که این خود می‌تواند دقت مناسب مدل را در شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخزن نشان دهد؛ اما همان‌طور که در نتایج نیز آورده شده است، تطبیق کامل داده‌ها امکان‌پذیر نخواهد بود. چرا که فرآیند مدل‌سازی 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 شبیه‌سازی‌شده می‌گردند. با استفاده از نتایج خروجی مدل که در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه گردید می‌توان در یک نتیجه‌گیری کلی گفت که مخزن سد مهاباد با یک لایه‌بندی حرارتی تابستانه مواجه می‌گردد که به‌تدریج

این لایه‌بندی از اواخر فروردین شروع‌شده و با گرم‌تر شدن هوا و افزایش تشعشعات ورودی به مخزن تشدید یافته و در مردادماه که درجه حرارت هوا به ماکزیمم می‌رسد سبب می‌گردد که لایه‌بندی به اوج خود رسیده و اختلاف درجه حرارت رولایه و زیر لایه به ۱۳ درجه سانتی‌گراد برسد، با گذر از مردادماه لایه‌بندی حرارتی تقریباً با همان سرعت اوج‌گیری، فروکش می‌کند، به‌طوری‌که رفته‌رفته عمق رولایه افزایش پیدا می‌کند و در آذرماه اختلاط کامل در مخزن صورت گرفته و در طول زمستان مخزن در حالت اختلاط قرار می‌گیرد. ناگفته نماند از آن‌جایی‌که سد از لحاظ موقعیت جغرافیایی در یک منطقه سردسیر قرار دارد در زمستان درجه حرارت آب زیر ٤ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد، بنابراین انتظار می‌رود که در مخزن لایه‌بندی معکوس (لایه‌بندی زمستانه) نیز صورت گیرد که این مهم را می‌توان با دقت بیش‌تر در نمودار مربوط به بهمن‌ماه شکل ۷ یافت، ولی از آن‌جایی‌که با توجه با داده‌های مربوط به دمای سطحی آب، یخبندان در آب سد صورت نمی‌گیرد و اختلاف درجه حرارت رولایه و زیرلایه ۲ الی ۳ درجه سانتی‌گراد است؛ بنابراین لایه‌بندی حرارتی معکوس قابل‌ملاحظه نبوده و مخزن را می‌توان در طول زمستان با اختلاط کامل در نظر گرفت.

صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی TDS: صحت‌سنجی مدل به‌ازای دوره ٤ ماهه (مهر ۸۵ – دی ۸۵) برای بخش مورد مطالعه (مقطع ۲۱) نشان از دقت مناسب مدل در به‌کارگیری آن برای پیکره آبی موردنظر می‌باشد.



شکل ۹- صحت‌سنجی مدل به‌منظور شبیه‌سازی TDS برای مقطع ۲۱.

Figure 9. Verification of the model to simulate TDS for the section 21.

جدول ۳- خطای صحت‌سنجی مدل در شبیه‌سازی TDS.

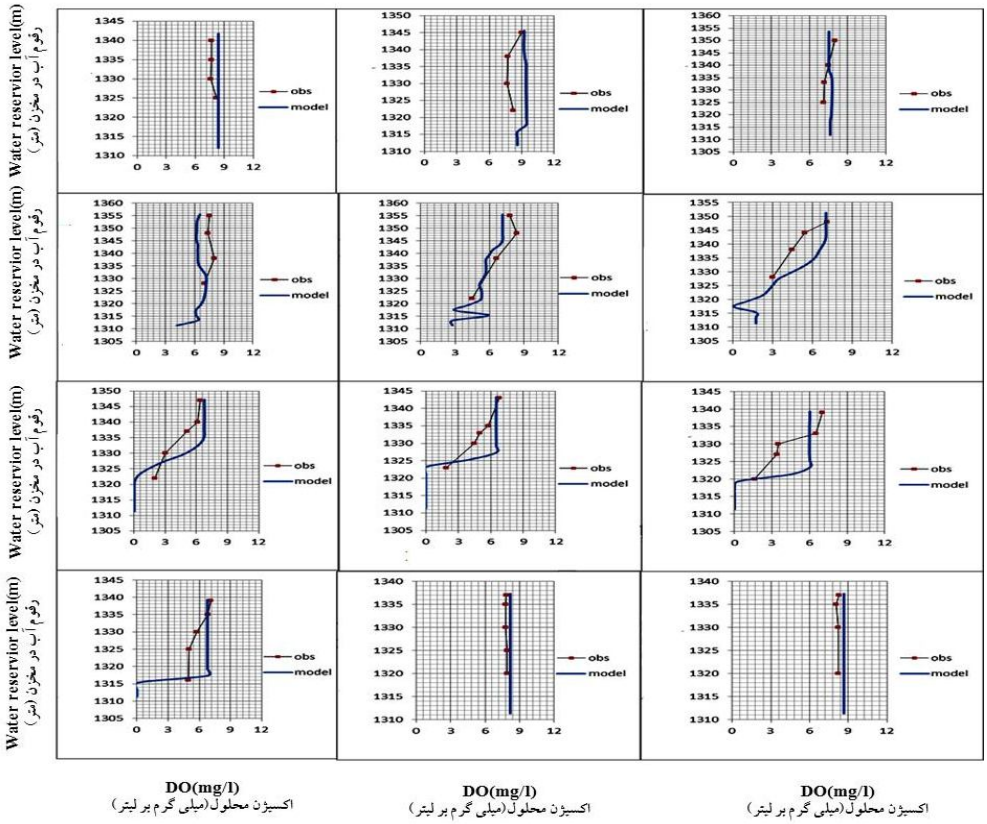
Table 3. Model validation error in TDS simulation.

معیار سنجش	مهر ۸۵	آبان ۸۵	آذر ۸۵	دی ۸۵
Benchmarking	October2006	November2006	December2006	January2006
AME(cm)	6.86	2.95	4.93	5.82
RMSE(cm)	15.33	59.34	9.18	10.65

نتایج شکل ۹ و همچنین جدول ۳ نیز بیانگر واسنجی دقیق مدل نسبت به پارامتر کیفی TDS می‌باشد. مقدار ماکزیمم خطای مطلق بیش‌تر از ۷ میلی‌گرم بر لیتر نبوده و در نهایت مدل برای شبیه‌سازی این پارامتر کیفی نیز تأیید گردید. در یک نگاه کلی می‌توان دریافت که تغییرات غلظت TDS در مخزن زیاد نیست، ولی اندک تغییرات ایجاد شده نیز از یک روند نسبتاً ثابتی پیروی می‌کند که بی‌ارتباط با چرخه لایه‌بندی حرارتی در مخزن نیست، به این صورت که از اوایل بهار که به‌تدریج لایه‌های حرارتی در مخزن خود را نشان می‌دهد، تغییرات غلظت TDS نیز از روند یکنواختی در عمق خارج می‌گردد به‌طوری‌که برعکس تغییرات دمایی نسبت به عمق، غلظت مواد محلول جامد در آب مخزن سد مهاباد با نزدیک‌تر شدن به کف مخزن افزایش می‌یابد به‌عبارت دیگر زیرلایه شورتر از رولایه می‌گردد، نتایج حاصله انطباق خوبی با واقعیت دارد، زیرا همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید سد مهاباد از لحاظ موقعیت جغرافیایی در یک منطقه سردسیر کوهستانی واقع شده است، به‌طوری‌که می‌توان با درصد خطای اندک از تبخیر سطحی صورت گرفته از سطح آب در طول فصول گرم چشم‌پوشی کرد، از آن‌جایی‌که تبخیر زیاد موجب افزایش غلظت در رولایه می‌گردد و این اتفاق بنا به‌دلیل ذکرشده در مخزن این سد اتفاق نمی‌افتد، بنابراین می‌توان به‌درستی نتایج حاصله اطمینان نمود. با تشدید یافتن لایه‌بندی حرارتی، لایه‌بندی شوری نیز اتفاق می‌افتد و اوج این لایه‌بندی نیز هم‌زمان با لایه‌بندی حرارتی و در مرداد رخ می‌دهد و به دنبال آن و با گذر از تابستان به‌تدریج از شدت لایه‌بندی شوری کاسته شده و در نهایت از اوایل پاییز مخزن از نظر شوری به اختلاط کامل می‌رسد.

تغییرات اکسیژن محلول (DO) در مخزن سد: یکی دیگر از پارامترهای کیفی مهم آب برای مصارف مختلف میزان اکسیژن محلول است. نبود اکسیژن محلول کافی در آب موجب بی‌هوازی شدن فعالیت‌های شیمیایی درون آب می‌گردد که این امر به‌مرور باعث تولید بو مشمئزکننده، رنگ و طعم نامطبوع در آب دریاچه‌ها و مخازن سدها می‌گردد. میزان اکسیژن محلول کم‌تر از ۵ میلی‌گرم در لیتر آب، موجب مرگ آبزیان می‌شود، ازاین‌رو توجه به این پارامتر در آن دسته از مخازنی که اهداف شیلات و پرورش آبزیان را نیز دنبال می‌کند لازم است. به‌منظور مشاهده نحوه توزیع اکسیژن محلول در مخزن سد مهاباد، تغییرات غلظت اکسیژن محلول نسبت به عمق مخزن در ماه‌های مختلف سال برای بخش ۲۱ از مخزن مدل‌سازی شد؛ که نتایج حاصله در شکل ۱۰ آورده شده است. از این شکل چنین می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اکسیژن محلول نسبت به عمق آب در مخزن سیر نزولی دارد و این یک رخداد مورد انتظار می‌باشد چرا که وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن و عمق زیاد آب مانع از ورود هوای اتمسفر به لایه هیپولمنیون (زیر لایه) می‌گردد. همان‌گونه که از نمودارهای این شکل پیداست با ورود به فصول گرم از سال و تشدید لایه‌بندی حرارتی در مخزن، غلظت اکسیژن محلول نیز همسو با پروفیل دما نسبت به عمق کاهش می‌یابد، این تغییرات از خردادماه شروع‌شده و تا اواخر تابستان ادامه می‌یابد طوری‌که در این دوره از سال میزان غلظت اکسیژن محلول در زیرلایه به صفر نیز می‌رسد و این امر، شرایط بی‌هوازی را در مخزن و در زیرلایه به وجود می‌آورد که در نهایت باعث تولید رنگ و بوی نامطبوع در مخزن می‌گردد. به‌تدریج با گذر این دوره و ورود به دوره اختلاط دمایی در مخزن، روند تغییرات اکسیژن محلول نسبت به عمق نیز تعدیل شده و در عین‌حال افزایش می‌یابد به‌طوری‌که در طول فصل زمستان در سراسر عمق مخزن غلظت این پارامتر کیفی بین ۸ الی ۱۱ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد. با

توجه به اشکال و این‌که تراز آبگیری از سد در رقوم ۱۳۳۰ قرار گرفته است، بنابراین غلظت اکسیژن محلول در آب خروجی از سد در بحرانی‌ترین شرایط که مربوط به تیر و مردادماه می‌باشد، بین ٤-٦ میلی‌گرم در لیتر در نوسان بوده که این مقدار ممکن است برای مصارف شرب مشکل‌آفرین باشد. تشکیل لایه‌بندی حرارتی در مخزن و عمق زیاد آب مانع از ورود هوای اتمسفر به لایه‌های تحتانی که این موضوع می‌تواند بر روی اکسیژن محلول در لایه‌های تحتانی اثرگذار باشد و این مسأله باعث می‌شود که اکسیژن محلول نتواند، جواب مناسبی را داشته باشد.



شکل ۱۰- تغییرات اکسیژن محلول در طی دوره شبیه‌سازی‌شده در مخزن سد مهاباد بخش ۲۱.

Figure 10. Changes in dissolved oxygen during simulated periods in Mahabad Dam reservoir section 21.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش از مدل CE-QUAL-W2 جهت لایه‌بندی حرارتی مخزن سد مهاباد استفاده گردید. در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که: ۱) هنگام انجام آنالیز حساسیت مدل نسبت به پارامترهای مختلف تأثیرگذار مشخص گردید که سرعت باد در منطقه، از دیگر پارامترها، تأثیرگذارتر می‌باشد؛ بنابراین سعی گردید تا با استفاده از داده‌های اخذشده از ایستگاه سینوپتیک مهاباد ضریب ارزشی مناسبی برای پارامتر مذکور لحاظ گردد. ۲) اولین و مهم‌ترین پارامتر کیفی آب که همه فعالیت‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی در آب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد دمای آب می‌باشد که در این سد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که مخزن سد مهاباد دارای

سیکل لایه‌بندی تابستانه است به‌گونه‌ای که از اواخر فروردین‌ماه و با افزایش دمای هوا به‌تدریج لایه‌های حرارتی در مخزن پیدا شده و در اواسط تابستان به اوج خود می‌رسد. با گذر از فصل تابستان و ورود به فصول سرد سال لایه‌بندی شکل گرفته به‌تدریج تعدیل‌شده طوری‌که در آذرماه اختلاط کامل در مخزن رخ می‌دهد. ۳) از آن‌جایی‌که سد مهاباد در یک اقلیم سرد واقع شده است به‌طوری‌که دمای آب در طول زمستان به زیر ٤ درجه سانتی‌گراد نیز می‌رسد بنابراین انتظار می‌رود که لایه‌بندی زمستانه (لایه‌بندی معکوس) نیز در مخزن رخ دهد، این واقعیت را می‌توان از پروفیل حرارتی مربوط به بهمن‌ماه در نمودارها به‌خوبی مشاهده نمود، ولی ازآن‌جایی‌که یخبندان طولانی‌مدت در سطح آب اتفاق نمی‌افتد، بنابراین مدت دوام این لایه‌بندی زیاد نیست، همچنین اختلاف حرارتی لایه فوقانی و لایه تحتانی در این حالت در حدود ۲-۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، بنابراین زیاد چشمگیر نبوده و می‌توان در مخزن تنها لایه‌بندی تابستانه را لحاظ نمود. ٤) مدل برای بخش‌های مختلفی در طول مخزن اجرا گردید و از آن‌جایی‌که بین پروفیل‌های حرارتی به‌دست آمده در این بخش‌ها تفاوت زیادی به چشم نمی‌خورد، بنابراین تنها به نتایج به‌دست آمده از بخش ۲۱ و ۳٤ بسنده شده است، چرا که این دو بخش به‌ترتیب عمیق‌ترین بخش از شاخه اصلی و شاخه فرعی می‌باشد که می‌تواند نماینده خوبی برای بیان وضعیت بخش‌های دیگر می‌باشد. به‌عبارت دیگر مخزن تک‌بعدی در نظر گرفته شده است و تنها تغییرات در بعد عمودی موردبررسی قرار گرفته است. ۵) علاوه بر شبیه‌سازی پروفیل دمایی در عمق، تغییرات غلظت کل جامدات محلول در آب مخزن نیز در طی دوره شبیه‌سازی‌شده مورد تحلیل قرار گرفت که طی آن معلوم شد میزان تغییرات غلظت (TDS) در عمق متأثر از لایه‌بندی حرارتی در مخزن بوده و روند تغییرات آن عکس تغییرات دمایی می‌باشد به‌گونه‌ای که دوران لایه‌بندی حرارتی در لایه هیپولمنیون (زیرلایه) با غلظت بالایی از (TDS) نسبت به لایه فوقانی مواجه می‌شویم و در طول دوران اختلاط مخزن (TDS) نیز در لایه‌های مختلف تغییراتی را از خود نشان نمی‌دهد. با توجه به جدول استاندارد جهانی غلظت (TDS) که بالاترین حد مجاز برای مصارف کشاورزی و شرب، ۱۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر آورده شده است و از آن‌جایی‌که بالاترین غلظت در مخزن سد مهاباد ۱۸۰ میلی‌گرم بر لیتر می‌باشد، بنابراین هیچ مشکلی در این خصوص در سد مذکور وجود نخواهد داشت. ٦) غلظت اکسیژن محلول در آب (DO) نیز طبق انتظار به‌گونه‌ای است که در طول دوران لایه‌بندی با افزایش عمق کاهش می‌یابد، چرا که لایه‌بندی حرارتی شکل‌گرفته از یک‌طرف و ممانعت رولایه در برابر ورود هوای اتمسفر به لایه‌های تحتانی از طرف دیگر باعث این کمبود می‌شوند. البته به هم خوردن لایه‌بندی حرارتی و اختلاط کامل آب لایه فوقانی با لایه‌های تحتانی باعث افزایش اکسیژن محلول در اعماق مخزن سد در طول زمستان می‌شود. لازم به ذکر است که از اواسط تابستان تا اواسط پاییز در هیپولمنیون (زیرلایه) شرایط بی‌هوازی حاکم است که می‌تواند موجب تنزل کیفی آب در اعماق مخزن شده و باعث تولید بو مشمئزکننده و طعم و رنگ نامطبوع در آب گردد. ولی با توجه به موقعیت تراز آبگیری، آب استحصالی از مخزن در بحرانی‌ترین شرایط که مربوط به اوایل تابستان می‌باشد، دارای حداقل ٤-٦ میلی‌گرم بر لیتر اکسیژن محلول می‌باشد، طوری‌که این مقدار نمی‌تواند بیانگر سالم بودن آن برای شرب به حساب آید؛ بنابراین هوادهی آب خروجی از سد در طول دوران لایه‌بندی برای مصرف شرب از ملزومات می‌باشد.

منابع

1. Afshar, A., Kazemi, H., and Saadatpour, M. 2011. Particle swarm optimization for automatic calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran. J. Water Resour. Manage. 25: 2613-2632.
2. Choi, J.H., Jeong, S.A., and Park, S.S. 2007. Longitudinal-vertical hydrodynamic and turbidity simulations for the prediction of dam reconstruction effects in Asian Monsoon Area. J. Amer. Water Resour. Assoc. (JAWRA), 43: 6. 1444-1454.
3. Cole, T.M., and Wells, S.A. 2015. CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.72. Department of civil and environmental engineering Portland state univeristy Portland, publication. 797p.
4. Diogoa, P.A., Fonsecab, M., Coelhoa, P.S., Mateusa, N.S., Almeidaa, M.C., and Rodriguesa, A.C. 2008. Reservoir phosphorous sources evaluation and water quality modeling in a Tran's boundary watershed. Desalination, 226: 200-214.
5. Ebrahimi, M., Jabbari, E., and Abbasi, H. 2015. Simulation of thermal stratification and salinity in dam reservoir using CE-QUAL-W2 software (Case study: Baft Dam). J. Civil Engin. Urban. 5: 1. 07-11.
6. Etemad Shahidi, A., Afshar, A., Alikia, H., and Moshfeghi, H. 2009. Total dissolved solid modeling; Karkheh reservoir case example. Inter. J. Environ. Res. 3: 4. 671-680.
7. He, W., Lian, J., Yao, Y., Wu, M., and. Ma, Ch. 2017. Modeling the effect of temperature-control curtain on the thermal structure in a deep stratified reservoir. J. Environ. Manage. 202: 1. 106-116.
8. Heyidarzadeh, N., and Motiee Nejad, A. 2014. Investigation of thermal stratification of dams and feasibility of using simple mathematical models. 8th National congress on civil engineering, faculty of civil engineering, Babol, Iran, 8p. (In Persian)
9. Huang, Y., and Liu, L. 2008. Sensitivity analysis for the identification of important parameters in a water quality model. 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, ICBBE. Pp: 3131-3134.
10. Kiani Sadr, M. 2017. Simulation of thermal layering and dissolved oxygen concentration using the CE-QUAL-W2 model. (Case study: Garshah Dam). J. Quar. Wetland Ecol. 9th year, 32: 39-52. (In Persian)
11. Kianoush, B., and Ahmadyar, D. 2016. Evaluation the effect of thermal layering power on the efficiency of artificial mixing in the dams' reservoirs. J. Hydr. Sci. Res. 10: 4. 17-33. (In Persian)
12. 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 & Reservoirs: J. Res. Manage. 13: 51-61.
13. Nazariha, M., Danaie, A., Hashemi, S.H., and Ezad Dostdar, A.H. 2010. Prediction of thermal layering in Bakhtiari construction dam using CE-QUAL-W2 model. J. Environ. Stud. 54: 11-18. (In Persian)
14. Rezaei Brandgh, H., Salmasi, F., and Sahebi, F. 2018. Study of thermal and qualitative layers of Tahm dam in Zanjan using CE-QUAL-W2 software. J. Water Soil Cons. 25: 1. 127-145. (In Persian)
15. Sabeti, R., Jamali, S., and Hajikandi Jamali, H. 2017. Simulation of thermal stratification and salinity using the Ce-Qual-W2 Model (Case Study: Mamloo Dam). Engineering, Technology and Applied Science Research. 7: 3. 1664-1669.
16. Saeedi, P., Mirakhorli, Sh., Aeini, Sh., and Mehrdadi, N. 2012. Two-dimensional simulation of the thermal regime of Shahid Rajaee Dam reservoir. 6th National Conference on Environmental Engineering, Tehran University, Faculty of Environment. Iran, 8p. (In Persian)
17. Soleymani, Sh., Bozerge Hadad, A., and Sadatpour, M. 2015. Simulation of thermal layering and determination of the sluice gate Karkhe dam reservoir using the two-dimensional model CE-QUAL-W2 2nd conference on new findings in environmental and agricultural ecosystems, University of Tehran, New energy and environment research center. (In Persian)
18. Wurbs, R.A., and James, W.P. 2009. Water Resources Engineering, 3rd Ed. Prentice-Hall, Inc. The USA. 840p.

Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(4), 2019
http://jwsc.gau.ac.ir
DOI: 10.22069/jwsc.2019.14971.3010

Numerical Modeling of Thermal Stratification and Water Quality in the Reservoir using CE-QUAL-W2 Model

***M. Salehi[1], Z. Khani Temeliyeh[2], N. Parchami[3] and Z. Ahmadpour[4]**

[1]Instructor, Scientific Member of Dept. of Agriculture Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran, [2]Ph.D. Student of Water Resources Engineering, Dept. of Water Science and Engineering, University of Urmia, [3]M.Sc. Graduate, Employee of Regional Water Company of Piranshahr, [4]M.Sc. Graduate, Dept. of Water Science and Engineering, University of Urmia

Received: 04.23.2018; Accepted: 07.08.2019

Abstract

Background and Objectives: One of the main issues in water quality management is the determination of thermal layering followed by nutritional levels in reservoirs of dams and other water structures. Determination of thermal stratification is done using qualitative models. To select a water quality model, there should be an exchange between the complexity of the model, the reliability, the cost of operation and the time available. Determining the parameters of a nutritional index such as total phosphorus and total nitrogen concentration in the lake, the average and maximum chlorophyll a concentration, and the amount of dry algae using these equations requires the least qualitative data and less time and cost compared to complicated computer modeling. In the current study, water quality of Mahabad dam reservoir located in West Azarbaijan province was investigated using CE-QUAL-W2 model, which is an efficient software for the analysis and qualitative analysis of water reservoirs and lakes. According to the results, the Mahabad Dam reservoir has a roughly strong summer stratification, which begins in late April and reaches its peak in August, with the onset of autumn and a decrease in the amount of incoming radiation to the stratified reservoir, leads to mixing so that in December, the complete mixing takes place in the reservoir. In terms of the Total Soluble Solids (TDS) level, it can be stated that the trend towards depth changes is rising, so that the maximum concentration is throughout the year at the bottom of the reservoir. The changes in dissolved oxygen relative to the depth of water in the reservoir are also reducing; these changes start from June and continue until last summer so that the concentration of dissolved oxygen in the substrate reaches zero during this time of year, which eventually produces unpleasant color and odor in the reservoir.

Materials and Methods: Mahabad storage dam is a dike dam on the Mahabad River, west of Mahabad city in the West Azerbaijan province. Mahabad Dam has a trifling capacity of 197 million cubic meters and 172 million cubic meters of useful capacity. In addition to supplying drinking water to Mahabad, more than 12 thousand hectares of agricultural land in the city are under its coverage. The dam also has a hydroelectric power plant. Construction began in 1968 and the dam was completed in 1970. In this research, a two-dimensional CE-QUAL-W2 model was used to simulate nutritional (eutrophic) in Mahabad Dam. Then, the geometry of Mahabad Dam reservoir was introduced to the model. For this purpose, it was produced cross-sectional profiles along the reservoir's line at specified intervals and obtained information by measuring the profiles at depths of two meters using the topographic maps of the dam reservoir and the AUTOCAD software, collecting data entered to depth gauge. To investigate the sensitivity analysis, the following items were used: 1. Windscreen coefficient (WSC) 2. Light-to-water

* Corresponding Author; Email: salehi.mostafa6@gmail.com

penetration coefficient (EXH2O) 3.Temperature Sedimentation Coefficient (TSED) 4. Solar absorption coefficient (BETA) 5. Viscosity coefficient of vortex Horizontal (AX); Horizontal Swing Diffuser (DX); Friction Coating Friction (FRICC).

Results: The results were summarized as follows after the accomplished research. The coefficient of wind cover during the layering process has a significant effect on the temperature variations in the sublayer. As the wind influences on the lake, thermal inequality moves toward mixing. During the complete mixing of the reservoir with an increasing coefficient, the temperature of the water decreases to 4 degrees Celsius. But, the effect of this parameter during the mixing of the reservoir is not significant. The thermal difference between sublayer and the top layer is 2 to 3 degrees Celsius. Since the mixing season occurs in cold seasons from year to year, so the light, the high parameter will not affect the increase in reservoir water temperature. Therefore, the effect of the parameter can be ignored during the mixing phase. As the BETA coefficient increases, the reservoir flows goes toward mixing. Since this coefficient does not place a noticeable error in the thermal profile. The results of calibration of the model with respect to the thermal profile show that applying suitable coefficients for sensitive and effective parameters can be used to better the environmental conditions governing the region, including hydrological, hydraulic and meteorological conditions effective into the software environment. It is effective and can play a significant role in the better implementation of output and observational data. With the escalation of thermal layering, salinity layering also occurs, and the peak of this layer occurs simultaneously with the thermal layering in August, and after that, as the summer progressively decreases the degree of salinity and ultimately the reservoir will be fully mixed in terms of salinity in the first autumn.

Conclusion: In this study, the CE-QUAL-W2 model was used to simulate the eutrophication in Mahabad Dam reservoir. The results show that the reservoir of Mahabad Dam has a summer layering cycle, so that by end April, with increasing air temperature, the thermal layers were gradually found in the reservoir and peaked in the middle of summer. By passing the summer season and entering the cold seasons, the layered formation is gradually adjusted so that it occurs completely in the reservoir in December. Mahabad Dam is located in a cold climate so that winter temperatures fall below 4 °C. Therefore, winter layering (inverse layering) is expected to occur in the reservoir. Also, the amount of variation in concentration (TDS) at depth is influenced by the thermal layering in the reservoir and the process of its variation is the reversal of temperature variations. The concentration of dissolved oxygen in water (DO) is also expected to decrease as the depth increases during layering.

Keywords: CE-QUAL-W2, Layering, Mahabad Dam, Quality