شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و غلظت اکسیژن محلول با کاربرد مدل CE QUAL W2 (مطالعه موردی: سد گرشا)

مریم کیانی صدر[1]*

۱. استادیار گروه محیط زیست، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان، همدان، ایران

***مسئول مکاتبات:**
mkianysadr@gmail.com

کد مقاله: ۱۳۹۶۰۲۰۳۳۷
تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۲۱
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۲/۳۰
این مقاله برگرفته از طرح پژوهشی است.

چکیده

بروز فرآیندهایی نظیر لایه‌بندی حرارتی و تغذیه گرایی در مخازن موجب افت شدید کیفیت آب و عدم تأمین حد مطلوب برای مصارف مختلف و به مخاطره افتادن حیات آبی اکوسیستم پایین‌دست می‌گردد. امروزه مخزن بسیاری از سدهای کشور با مشکلات کیفیت آب مواجه هستند و کاهش اکسیژن محلول در پایین‌دست در شرایط کم‌آبی و فصول گرم شاید از مهم‌ترین اثرات منفی این مخازن می‌باشد. مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن ابزار مناسبی در پیش‌بینی کیفیت آب و برآورد اثر آلودگی‌های کمی کردن میزان و شدت اثرات زیست‌محیطی پس از شروع بهره‌برداری با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی و اقلیمی مخزن و جریان رودخانه ورودی می‌باشد. سد موردمطالعه گرشا در بالادست مخزن سد کوران بوزان در حدود ۶۵ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان کرمانشاه قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه در مسیر عبور رودخانه بالادست تا محل سد منابع آلودگی متعددی وجود دارد هدف تحقیق حاضر بررسی شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در سد مذکور در راستای انجام مطالعات زیست‌محیطی سد گرشا جهت پیشگیری از ایجاد آثار زیان‌بار احداث سد بر محیط زیست منطقه می باشد که مطالعات مذکور در سال ۱۳۹۳ انجام پذیرفت. در این راستا ابتدا مدل هیدرودینامیک مخزن سد گرشا به‌وسیله نرم‌افزار CE QUAL W2 ساخته و کالیبره شد و برای شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در سد مذکور مورداستفاده قرار گرفت. مطالعات مربوط به سال ۹۳ می باشد. نتایج نشان‌دهنده ایجاد لایه‌بندی حرارتی در فصل تابستان می‌باشد.

واژگان کلیدی: لایه‌بندی حرارتی، اکسیژن محلول، سد گرشا، CE QUAL W2.

مقدمه

مخازن سدها یکی از مهم‌ترین منابع آب می‌باشند که برای اهداف ویژه‌ای مانند تأمین آب شهری، کشاورزی، آبیاری و ... مورداستفاده قرار می‌گیرند. یکی از جنبه‌های مهم پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی احداث یک سد، پیش‌بینی کیفیت آب مخزن و جریان خروجی از مخزن پس از بهره‌برداری می‌باشد. در این راستا اطلاعات جامع و دقیق در خصوص کیفیت مخازن سدها می‌تواند عامل مهمی در سیاستگذاری‌های کلان باشد . بروز فرآیندهایی نظیر لایه‌بندی حرارتی و تغذیه گرایی در مخازن موجب افت شدید کیفیت آب و عدم تأمین حد مطلوب برای مصارف مختلف و به مخاطره افتادن حیات آبی اکوسیستم پایین‌دست می‌گردد. لایه‌بندی یک‌روند مهم تأثیرگذار بر کیفیت آب دریاچه‌ها و مخازن می‌باشد (VPSPC, 2003). لایه‌هایی از جرم‌های سیال که به‌وسیله اختلاف در دانسیته، درجه حرارت، مواد محلول و یا مواد معلق ایجاد می‌گردند را لایه‌بندی آب عمق مخزن می‌گویند. در اغلب دریاچه‌ها لایه‌بندی نتیجه تعادل حرارتی بین آب نگهداری شده در مخزن و دیگر ورودی‌ها به مخزن می‌باشد (Rockwell, 2005). الگوی لایه‌بندی حرارتی مخازن با توجه به موقعیت و ارتقاء از سطح دریا متغیر است. این تقسیم‌بندی به شرح زیر آمده است:

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

دریاچه مولومیکتیک: در طول سال کل ستون آب مخلوط است.

دریاچه مرومیکتیک: دریاچه‌هایی که به‌طور کامل مخلوط نمی‌شوند و یک‌لایه کاملاً ساکن و عمیق دارند. اختلاط در این دریاچه‌ها ممکن است براثر پدیده‌های شیمیایی و بیولوژیک و یا فیزیکی اتفاق بیافتد. هیپولیمنیون این‌گونه دریاچه‌ها معمولا فاقد اکسیژن است.

دریاچه‌های مونومیکتیک: فقط یک‌بار در سال مخلوط می‌شوند. این دریاچه‌ها مونومیکتیک سرد نامیده می‌شوند. اگر دریاچه در ترازهای پایین‌تر و عرض‌های جغرافیایی کمتر قرار داشته باشد، دمای دریاچه هرگز از ۴ درجه پایین‌تر نمی‌رود و ممکن است در ماه‌های تابستان لایه‌بندی تشکیل‌شده و در زمستان نیز اختلاط کامل رخ دهد. این دریاچه‌ها منومیکتیک گرم نامیده می‌شوند.

دریاچه‌های دیمکتیک: دوبار در سال مخلوط می‌شوند.

دریاچه‌های پلی‌میکتینگ: دارای اختلاط‌های متعدد و یا حتی پیوسته هستند. توزیع قائم کیفی این دریاچه‌ها معمولاً متغیر است.

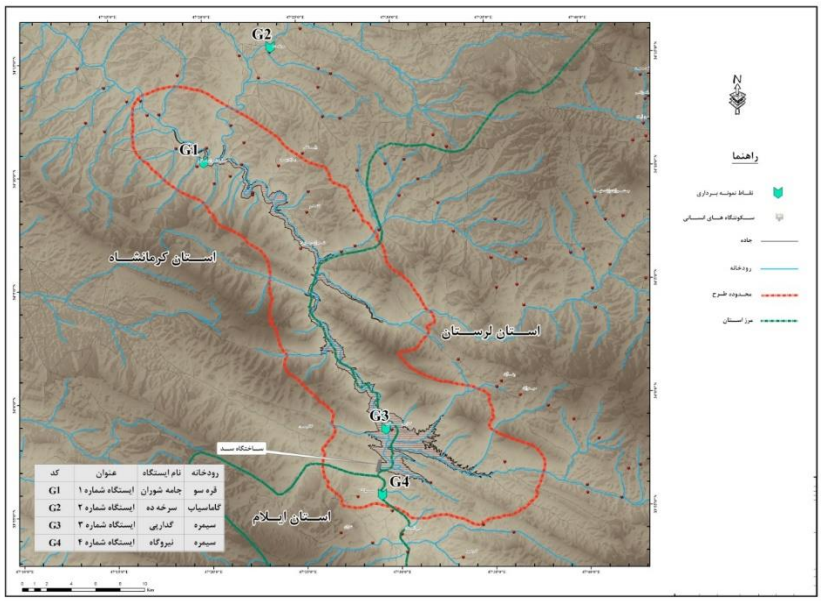
دریاچه‌های اولیگومیکتیک: این دریاچه‌ها که در مناطق استوایی بیشتر دیده می‌شوند. غالبا" لایه‌بندی شده‌اند (به‌طور پیوسته) و بندرت مخلوط می‌شوند.

دریاچه‌های امیکتیک: این دریاچه‌ها به دلایلی مانند تمرکز بسیار بالای مواد محلول و درنتیجه چگالی معمولا مخلوط نمی‌شوند (Caruso, 2000).

Palmer روش‌های تشخیص و اندازه‌گیری لایه‌بندی حرارتی را در دو گروه تقسیم‌بندی کرد: ۱- اندازه‌گیری مستقیم دما و کیفیت آب در لایه‌های مختلف مخزن که در مورد مخازن موجود به کار می‌رود. ۲- استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی کیفی برای تخمین پتانسیل لایه‌بندی حرارتی که این مورد برای سدهای پیشنهادی یا مخازن فاقد اندازه‌گیری‌های میدانی کاربرد دارد (Palmer, 2001). روش دوم یعنی مدل به‌طورکلی ایده‌ای از فرآیندهای دنیای واقعی محسوب می‌شود و قابلیت اساس روابط و معادلات بین اجزا و مشخصه‌های فیزیک و شیمیایی و بیولوژیکی آب به شبیه‌سازی روابط علت و معلولی بین آلاینده‌ها و کیفیت آب می‌پردازد. بنابراین رویکرد مدل‌سازی در پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی احداث سدها یک رویکرد مهندسی با تکیه‌بر نتایج تحلیلی فرآیندها و روابط اجزا مؤثر در این مسئله است که در تعیین دقیق‌تر اثرات اهمیت دارد. بنابراین مدل‌های شبیه‌سازی کیفیت آب مخزن ابزار مناسبی در پیش‌بینی کیفیت آب و برآورد اثر آلودگی‌ها و کمی کردن میزان و شدت اثرات زیست‌محیطی پس از شروع بهره‌برداری با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی و اقلیمی مخزن و جریان رودخانه ورودی می‌باشد (Gelda *et al.*, 2000). برای اولین بار در سال ۱۹۵۳ مقوله‌ی لایه‌بندی حرارتی در ایالات‌متحده آمریکا توسط سازمان ارتش آمریکا بر روی مخازن آب موردبررسی قرار گرفت. Kurup و همکاران در سال ۲۰۰۰ به مقایسه دو مدل CE QUAL W2 و TISAT پرداختند. نتایج مطالعه آنان نشان داد که مدل CE QUAL W2 نتایج دقیق‌تری نسبت به مدل TISAT به‌ویژه در خصوص لایه‌بندی فصلی چگالی ارائه می‌دهد (Kurup *et al.*, 2000). Kuo و همکاران در سال ۲۰۰۶ به مدل‌سازی لایه‌بندی حرارتی آب در چن سد با استفاده از مدل CE QUAL W2 پرداختند و نتایج قابل قبولی به دست آوردند (Kuo *et al.*, 2005). Diogoa و همکاران در سال ۲۰۰۸ نیز به مقایسه دو مدلSNTEMP و CE QUAL W2 برای شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی پرداختند. نتایج این مطالعه نیز نشان‌دهنده دقیق‌تر بودن نتایج مدل CE QUAL W2 می‌باشد (Diogoa *et al.*, 2008). Huang و Liu نیز در سال ۲۰۰۸ با استفاده از مدل CE QUAL W2 به تعیین پارامترهای مدل در مدل‌سازی کیفیت آب پرداختند. هدف از این مطالعات شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی در فصول مختلف در مخزن سد گرشا می‌باشد. با توجه به خصوصیات هندسی مخزن سد گرشا مدل ce-qual-w2 برای شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد گرشا پیشنهاد شد. مهم‌ترین نکاتی که برتری مدل ce-qual-w2 را نسبت به سایر مدل‌ها مشخص می‌نماید موارد زیر می‌باشد: سازگاری شکل هندسی مخزن با شرایط دوبعدی، در نظر گرفتن توپوگرافی بستر (بسیمتری) در مدل ce-qual-w2 که اطلاعات آن موجود است، پیش‌بینی بهتر شرایط لایه‌بندی حرارتی مخزن با توجه به داده‌های هواشناسی و جریان ورودی. سد گرشا باهدف تولید انرژی برقابی و کنترل و تنظیم جریان‌های سطحی بر روی رودخانه سیمره که از سرشاخه‌های اصلی رودخانه کرخه می‌باشد، احداث خواهد شد. رودخانه گرشا، شاخه کوچکی است که به قره‌سو متصل می‌گردد. محل در نظر گرفته‌شده سد گرشا، محدوده‌ای

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

پس از اتصال گرشا به قره‌سو می‌باشد. سد گرشا از نوع مخزنی است و با احداث آن انرژی کل تولیدشده سالانه در حدود ۴۸۶ گیگاوات ساعت خواهد بود. از این مقدار ۳۳۸ گیگاوات ساعت در سال انرژی مطمئن و ۱۴۸ گیگاوات ساعت در سال انرژی ثانویه می‌باشد. سد گرشا با آورد متوسط ۲۰۹۴ میلیون مترمکعب بر سال در حال مطالعه می‌باشد. حجم آورد رسوب ۵۰ ساله آن ۲۹۶/۵ میلیون مترمکعب برآورد شده است. طرح حجم تنظیمی مخزن سد حدود ۱۴۴۵/۴ میلیون مترمکعب می‌باشد. نوع سد، سنگریزه‌ای با هسته رسی و ارتفاع آن از بستر حداکثر ۱۵۳ متر می‌باشد. طول تاج سد حدود ۶۰۰ متر و سرریز آن از نوع آزاد می‌باشد. همچنین سیستم انحراف سد از نوع فرازبند و تونل انحراف پیش‌بینی‌شده است. تعداد تونل‌های انحراف دو رشته و محل قرارگیری آن در جناح چپ می باشد. نوع فرازبند خاکی و تراز تاج آن ۱۱۳۳ متر از سطح دریا است. قطر تونل‌های انحراف نیز ۹ متر و طول هر یک از آن‌ها ۷۰۰ متر است. اطلاعات فنی مربوط به سد گرشا در جدول ۱ ارائه‌شده است. نقشه موقعیت مخزن سد گرشا به همراه ایستگاه‌های نمونه‌برداری آب که نتایج آن به‌عنوان داده‌های ورودی نرم‌افزار مورداستفاده قرار گرفت، در شکل ۱ ارائه‌شده است.



شکل ۱: نقشه موقعیت مخزن سد گرشا در حوزه آبخیز به همراه ایستگاه‌های نمونه‌برداری.

جدول ۱: مشخصات سد گرشا.

ردیف	عنوان	مقدار
۱	عرض جغرافیایی	۳۳ ° ۵۷′
۲	طول جغرافیایی	۴۷ ° ۲۸′
۳	نوع سد	سنگریزه‌ای با هسته رسی
۴	تراز نرمال (متر از سطح دریا)	۱۲۴۴
۵	تراز حداقل بهره‌برداری (متر از سطح دریا)	۱۲۰۰
۶	ترازپایین تر از آبگیر نیروگاه (متر از سطح دریا)	۱۱۶۷
۷	تراز کف مخزن (متر از سطح دریا)	۱۰۹۷
۸	طول دریاچه مخزن سد در تراز نرمال	۴۷/۷۳KM

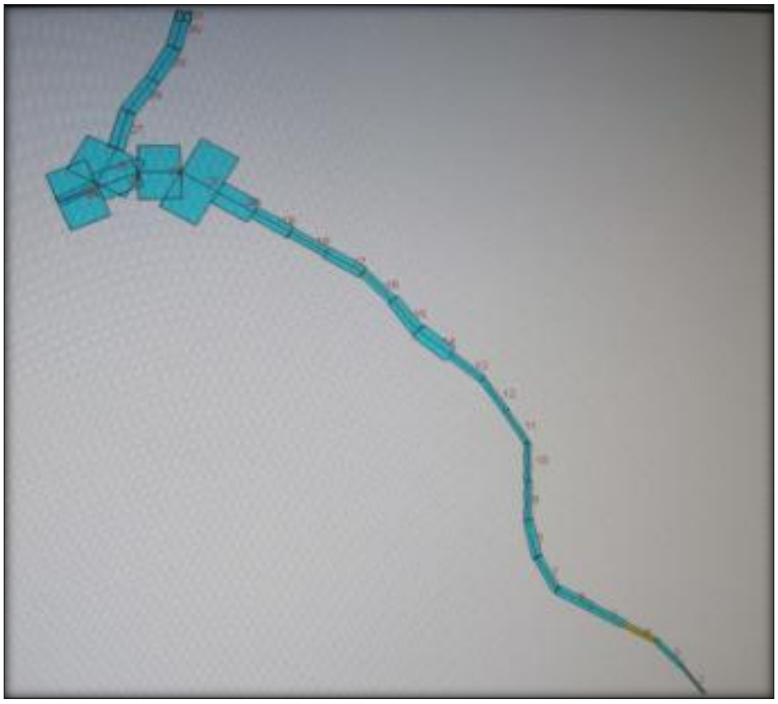
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

ردیف	عنوان	مقدار
۹	متوسط دبی ورودی به مخزن	۶۵/۸۳ مترمکعب بر ثانیه در ۲۴ ساعت
۱۰	عمق متوسط مخزن	۵۹/۵ متر
۱۱	حجم مخزن در تراز نرمال زمان بهره‌برداری	۱۰۸۸/۷۵ میلیون مترمکعب
۱۳	حجم کل مخزن	۱۳۸۵ میلیون مترمکعب
۱۴	متوسط درازمدت آبدهی طبیعی رودخانه سیمره در محل گرشا	۶۶/۵۴ (مترمکعب بر ثانیه)
۱۵	تبخیر از سطح آزاد آب (میلی‌متر)	۱۴۷۴
۱۶	میانگین بارندگی سالانه (میلی‌متر)	۳۸۴/۷

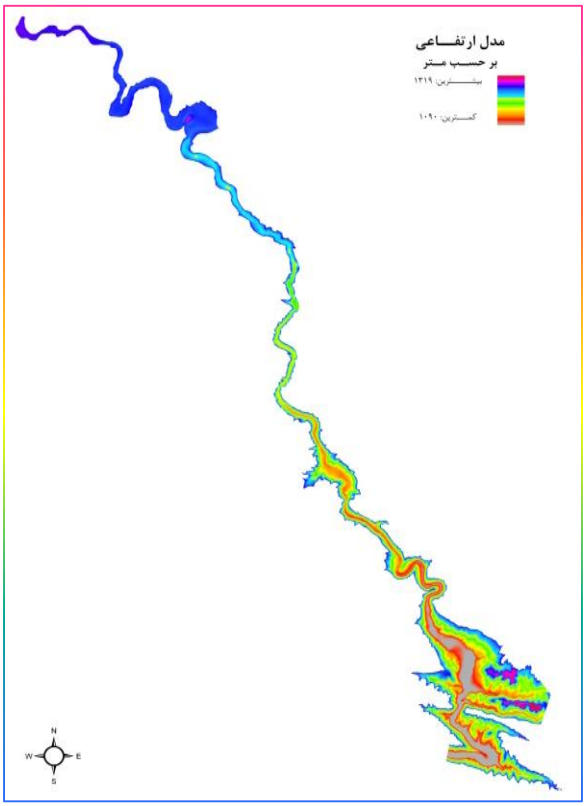
مواد و روش‌ها

مدل CE QUAL W2 توسط گروه مهندسین ارتش آمریکا توسعه‌یافته که قابلیت شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرودینامیکی و کیفی را دارد. این مدل برای مخازن توسعه‌یافته است ولی می‌توان برای رودخانه‌ها و خورها نیز به کار رود. این مدل دوبعدی از روش حل اختلاف محدود استفاده نموده و قابلیت شبیه‌سازی توزیع قائم و طولی انرژی حرارتی و مواد شیمیایی و بیولوژیکی انتخاب‌شده در توده آبی را در طول زمان دارد. این مدل قادر به شبیه‌سازی حجم، سطح آب، چگالی، سرعت‌های قائم و طولی و غلظت اجزای کیفی آب می‌باشد. این مدل برای مخازن و دریاچه‌های نسبتا طولانی و باریک جهت نمایش پارامترهای کیفی به‌صورت نیمرخ قائم و طولی بسیار مناسب می‌باشد (Zhang and Johnson, 2014). مدول شبیه‌سازی هیدرودینامیکی جریان غیردائمی، تغییرات چگالی و تأثیرات آن را بر جریان اعمال می‌کند. مدول کیفی مدل مذکور قابلیت مدل‌سازی حدود ۳۰ پارامترهای فیزیکی (مثل دما و جریان) و فاکتورهای شیمیایی (مثل مواد مغذی) را مدل‌سازی می‌نماید. تراز سطح آب به‌صورت غیرصریح (implicit) محاسبه می‌شود و لذا محدودیت امواج سطحی ثقلی بر گام زمانی حذف می‌شود. این بدان معنا است که اجازه گام‌های بزرگ‌تر زمانی در دوره شبیه‌سازی سبب کاهش زمان محاسبات خواهد شد (Chung and J.K, 2006). حداقل داده‌های اصلی موردنیاز نرم‌افزار عبارت بودند از: توپوگرافی منطقه و نقشه‌های بسیمتری مربوط به هندسه مخزن، سری زمانی دمای آب ورودی، سری زمانی دبی ورودی، پارامترهای کیفی آب شیرین و شور، اطلاعات هواشناسی شامل (دمای هوا، دمای نقطه شبنم، سرعت باد، جهت باد، پوشش ابر، تغییرات تراز آب از ایستگاه هواشناسی)، نیم‌رخ‌های دما و سایر پارامترهای کیفی موردنیاز (برای شرایط اولیه)، ضریب اضمحلال نور در عمق، نرخ واکنش‌های شیمیایی و بیولوژیکی شامل: نرخ کاهش نیترات (1/day)، نرخ دنیتریفکاسیون نیترات (1/day)، غلظت اولیه رسوب (mg/1)، تراز جزر و مدی در دهانه به‌عنوان شرایط مرزی پایین‌دست (Cole and Wells, 2008). جهت تدوین مدل شبیه‌سازی کیفی منتخب برای مطالعات حاضر، شکل مخزن موردبررسی قرار گرفت. شکل مخزن گرشا به‌صورت یک شاخه بوده، مرحله اول در تدوین مدل، قطعه‌بندی شکل مخزن به‌صورت مناسب ۱۵۰۰ تا ۴۰۰ متر می‌باشد. برای این منظور مخزن سد گرشا به ۳۰ قطعه ۱۵۰۰ متری و دو قطعه‌ی ۴۰۰ متری تقسیم شد (شکل ۲). در مرحله بعدی بایستی روابط سطح–ارتفاع هر یک از این قطعات محاسبه گردد که برای این منظور نقشه توپوگرافی بستر مخزن به کار گرفته شد. با پردازش این منحنی‌های تراز در محیط GIS، مدل رقومی هر یک از قطعات به‌صورت ارائه‌شده در شکل ۳ تهیه و روابط سطح–ارتفاع برای هر یک از این قطعات محاسبه گردید.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]



شکل ۲: نمایی از قطعه‌بندی مخزن سد گرشا توسط نرم‌افزار CE QUAL W2.



شکل ۳: مدل رقومی ارتفاع بستر مخزن.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

جهت بررسی تغییرات کیفی مخزن در عمق، لازم است که دریاچه مخزن به لایه‌های با عمق‌های مناسب تقسیم‌بندی گردد. لذا با توجه به قابلیت‌های مدل لایه‌های مخزن در ۲ رده‌ی ۳ متری و ۲/۵ متری در جهت عمودی تقسیم‌بندی شده‌اند. دولایه عمقی ابتدایی به فواصل ۲/۵ متری و ۳۸ لایه باقیمانده به فواصل ۳ متری تقسیم‌بندی شدند. برای ساخت مدل داده‌های سال آبی ۸۰ تا ۹۳ مورداستفاده قرار گرفت. گام بعدی در شبیه‌سازی رژیم حرارتی مخزن سد گرشا کالیبراسیون مدل جهت تنظیم آن برای شرایط حاکم بر محدوده مطالعاتی می‌باشد. درواقع هدف از کالیبراسیون مدل دستیابی به ضرایب درستی از مدل برای دستیابی به بهترین نتایج در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده می باشد. با توجه به اینکه هدف از این مطالعه شبیه‌سازی مخزن سد در حال مطالعه گرشا است لذا تنها کالیبراسیون ممکن به پارامترهای هیدرولیکی محدود می‌شود. جهت کالیبراسیون هندسه مخزن نیز از نتایج به‌دست‌آمده حاصل از نقشه‌های رقومی قطعات استفاده شد، بدین‌صورت که حجم قطعات در ترازهای مختلف محاسبه و این مقادیر با فرمت ویژه وارد مدل گردید. با اجرای فایل آماده‌سازی مدل، نتایج محاسبات حجم ـ ارتفاع مخزن، توسط مدل در یک فایل ذخیره شد. با مقایسه این نتایج و رابطه حجم ـ ارتفاع واقعی مخزن، مقادیر حجم ـ ارتفاع ورودی در صورت وجود اختلاف معنی‌دار، اصلاح می‌گردد. با توجه به اینکه در این مطالعات روابط سطح، حجم ـ ارتفاع بدست آمده با استفاده از نقشه رقومی قطعات محاسبه و وارد مدل گردید، لذا حتی در مرحله اول نیز اختلاف معنی‌داری با رابطه واقعی نشان نداد، بااین‌حال، جهت تدقیق سطح ـ حجم ـ ارتفاع مدل و روابط ورودی مدل کالیبره گردید. یکی از قابلیت‌های مهم مدل ce-qual-w2 شبیه‌سازی لایه‌بندی حرارتی و پیش‌بینی تغییرات دمایی در راستای قائم مخزن در شرایط مختلف می‌باشد. میزان تبادل گرمایی بین آب و محیط در پروفیل حرارتی مخزن بسیار مهم است. این مقدار شامل اجزا مشخص‌شده در رابطه ۱ می‌باشد:

$$H_{n=}H_{s+}H_{a+}H_{e+}H_{c-}(H_{sr+}H_{ar+}H_{br})$$

که در آن:

H_n = نرخ خالص تبادل گرمایی در امتداد سطح آب ((Wm^{-2})

H_s = تشعشع با طول‌موج کوتاه لحظه‌ای (Wm^{-2})

H_a = تشعشع با طول‌موج بلند لحظه‌ای (Wm^{-2})

H_{sr}=اشعه با طول‌موج کوتاه منعکس‌شده (Wm^{-2})

H_{ar}=اشعه طول‌موج بلند منعکس‌شده (Wm^{-2})

H_{br}=اشعه برگشتی از سطح آب (Wm^{-2})

H_e=افت ناشی از تبخیر (Wm^{-2})

H_c=هدایت گرمایی (Wm^{-2})

تشعشع طول‌موج کوتاه خورشید یا به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود و یا از روابط زاویه تابش خورشید و پوشش ابر محاسبه می‌شود. مقدار تشعشع طول‌موج بلند از دمای هوا و پوشش ابر و فشار بخار هوا با استفاده از فرمول Brants در مدل محاسبه می‌شود.

در پروژه گرشا با توجه به عدم اندازه‌گیری این مقادیر توسط مدل محاسبه‌شده‌اند.

معادله سایر پارامترهای موجود در رابطه ۱ به شرح زیر می‌باشند:

رابطه ۱: مقدار اشعه برگشتی از سطح آب $H_{br=}\epsilon\sigma(T_{s+}273.15)^4$

که در آن E مقدار قابلیت انتشار آب و σ ثابت استفان بولتزمن، T_s مقدار دمای آب برحسب درجه سیلسیوس است.

رابطه ۲: افت ناشی از تبخیر $H=f(W)\ (e_{s-}e_a)$

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

f (W): برابر تابع سرعت تبخیری باد و e_s معادل مقدار فشار بخار اشباع در سطح آب و e_a مقدار فشار بخار اتمسفری می‌باشد.

رابطه ۳: هدایت گرمایی $H=C_c f(W)\ (T_s - T_a)$

C_c ضریب Bowen و T_a دمای هوا (درجه سانتی‌گراد) می‌باشد.

رابطه ۴: تشعشع با طول‌موج کوتاه در عمق Z $H.(z) = (1 - \Re)H, e^{-n}$

که β درصد جذب اشعه در سطح آب و η ضریب کاهش و H_s مقدار اشعه خورشید در سطح می‌باشد.

رابطه ۵: $f(w) = a + bw^c$

a، b و c ضرایب تجربی و w سرعت باد در ۲ متری سطح زمین است که این ضرایب بیشترین عدم قطعیت در مدل را ایجاد می‌کنند (Cole and Wells, 2006).تحلیل حساسیت مدل یکی از روش‌های تحلیل عدم قطعیت مدل است (Dai *et al*., 2012) و در این روش جهت بررسی عدم قطعیت مدل، پارامترهایی که در پروفیل لایه‌بندی حرارتی مخزن تأثیر دارند تعیین گردیده و با توجه به دامنه تغییرات مجاز این پارامترها برای حدود بالا و پایین آن در مدل اجرا گردید و نتایج آن موردبررسی قرارگرفته است. درنهایت مشخص گردید ۲ پارامتر اصلی درجه حساسیت بیشتری نسبت به بقیه پارامترها در لایه‌بندی حرارتی دارند، که عبارت‌اند از:

ضریب پوشش باد (WSC): این ضریب یکی از مؤثرترین پارامترها در دمای آب می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش و یا کاهش مقدار WSC به میزان ۰/۲، دمای سطح آب در دولایه به میزان حدود ۱ درجه به‌صورت معکوس تغییر می‌یابد.

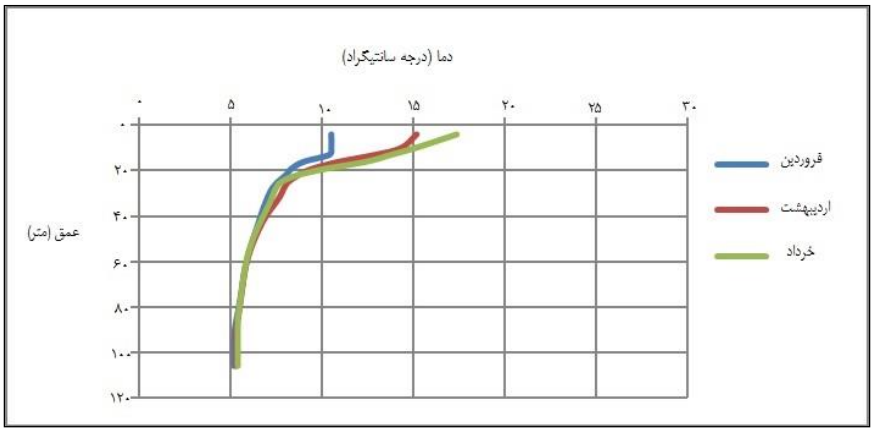
ضرایب تجربی a.b.c در تابع سرعت باد: این ضرایب از تأثیرگذارترین پارامترهای لایه‌بندی حرارتی می‌باشند، با توجه به رابطه ۵ تأثیر پارامتر C به دلیل توانی بودن بیشتر از دو پارامتر a.b می‌باشد. به‌طورکلی افزایش این پارامترها به دلیل افزایش اثر سرعت باد می‌باشد و موجب کاهش دمای آب تا عمق دولایه می‌گردد.

نتایج

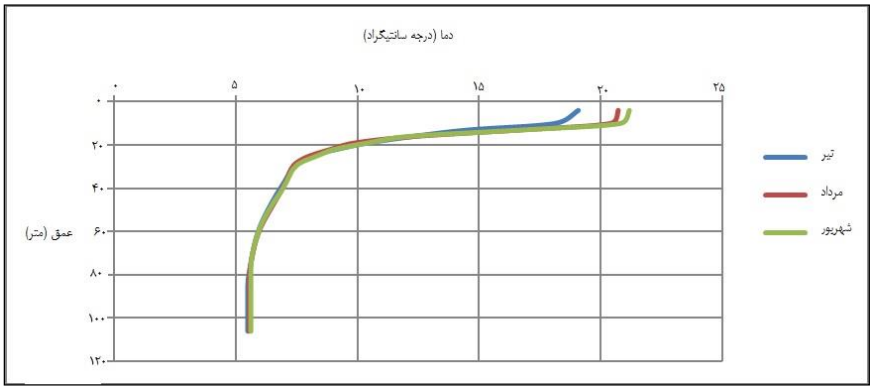
بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی نشان می دهد که آغاز لایه‌بندی حرارتی مخزن سد گرشا فصل بهار می‌باشد (شکل ۴). به‌گونه‌ای که در ابتدای این فصل لایه‌بندی بسیار ضعیفی در مخزن شکل می‌گیرد. در اردیبهشت‌ماه براثر وزش باد اختلاط عمودی آب تا حدودی باعث کاهش تفاوت دمایی سطح و کف مخزن می‌گردد. اما به‌تدریج با افزایش دمای هوا نسبت به سطح اختلاط عمودی آب، تفاوت دمایی در حدود ۱۰ درجه سانتی‌گراد در خردادماه ایجاد می‌شود. اما هنوز لایه‌بندی حرارتی مشخصی در مخزن سد ایجاد نگردیده است. دلایل اصلی تغییرات دما در سطح آب تماس حرارتی با اتمسفر و تغییرات میزان تابش خورشیدی است. انتقال حرارت از سطح به عمق بیشتر تحت تأثیر تشعشعات خورشیدی، تشعشعات موج‌بلند اتمسفر، جریانات حرارتی مرتبط بارندگی، جریانات ورودی و خروجی سطحی و زیرزمینی و تماس حرارتی با بستر دریاچه است (Imboden and Wu est, 1995). با شروع تابستان و گرم شدن هوا تفاوت دمایی سطح و کف افزایش می‌یابد و شرایط برای ایجاد لایه‌بندی حرارتی شدید ایجاد می‌گردد (شکل ۵). به این نحو که مقدار حرارت جذب‌شده توسط آب سطحی بیشتر می‌شود اما ازآنجاکه این حرارت جهت یکسان کردن توزیع عمودی درجه حرارت کافی نمی باشد، لذا باعث تقویت لایه‌بندی حرارتی می‌گردد. این روند تا اوایل پاییز ادامه می‌یابد و با کاهش دمای هوا و دمای آب ورودی، دمای آب سطحی مخزن نیز کاهش می‌یابد (شکل ۶). با کاهش تدریجی دمای هوا لایه‌بندی تقریبا به قوی‌ترین حالت خود می‌رسد. این امر در آبان ماه به‌خوبی مشهود می‌باشد. در آذرماه با کاهش بیش‌ازحد انرژی حرارتی ورودی به مخزن و سرد شدن لایه سطحی و وزش باد از سوی دیگر اختلاط شدید لایه سطحی با لایه‌های پایینی باعث کاهش تفاوت دمایی آب سطحی و کف می‌گردد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

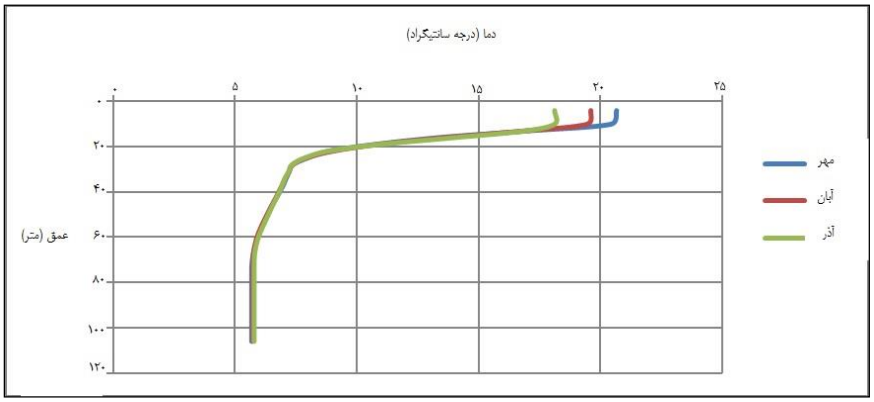
این امر سبب کاهش تفاوت دمایی می‌شود. با شروع فصل زمستان و کاهش شدید دمای هوا و دمای آب ورودی، دمای آب در تمامی مخزن به‌تدریج همگن‌شده و در اوایل اسفندماه گردش کامل رخ می‌دهد (شکل ۷).



شکل ٤: پروفیل دما در نزدیکی محور سد گرشا در فصل بهار.

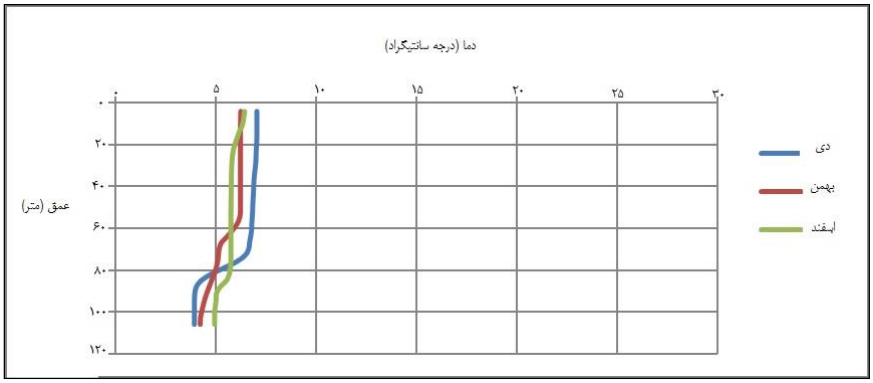


شکل ٥: پروفیل دما در نزدیکی محور سد گرشا در فصل تابستان.



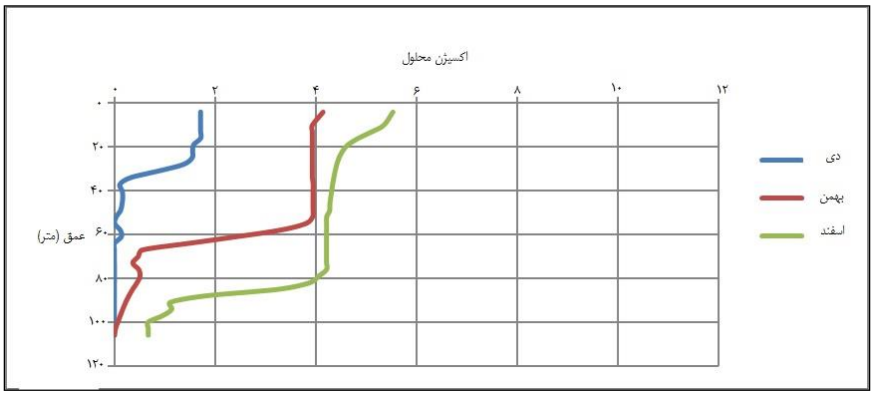
شکل ٦: پروفیل دما در نزدیکی محور سد گرشا در فصل پاییز.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]



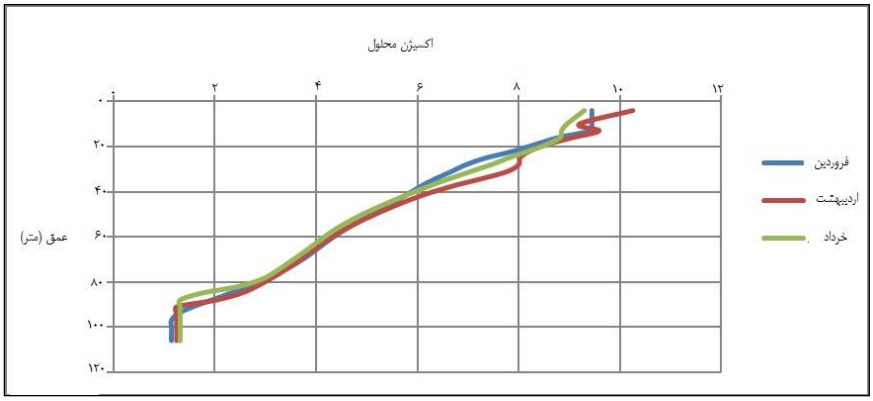
شکل ۷: پروفیل دما در نزدیکی محور سد گرشا در فصل زمستان.

در مرحله بعد میزان اکسیژن محلول در مخزن سد گرشا شبیه‌سازی شد. این پارامتر به‌عنوان مهم‌ترین پارامتر کیفی ازلحاظ حیات آبزیان مخزن اهمیت دارد. به‌منظور مشاهده نحوه توزیع اکسیژن محلول در مخزن سد، تغییرات غلظت اکسیژن محلول نسبت به عمق مخزن در روزهای مختلف سال مدل‌سازی شد. اکسیژن محلول سیستم از طریق فتوسنتز جلبک‌ها و اتمسفر تأمین می‌شود. از طرفی فرآیند نیتریفیکاسیون، تنفس جلبک‌ها و تجزیه مواد آلی محلول باعث مصرف اکسیژن محلول می‌گردند (Kannel, 2011). در شکل‌های شماره ۸ تا ۱۱ پروفیل عمقی تغییرات اکسیژن محلول در ماههای مختلف در محل محور سد گرشا ارائه‌شده است. مطابق این شکل‌ها در دی‌ماه مخزن ازنظر تغییرات DO تقریباً به حالت اختلاط کامل درمی‌آید. غلظت اکسیژن محلول در ماههای فروردین، اردیبهشت و خرداد در سطح آب به‌شدت افزایش می‌یابد. این امر به علت فتوسنتز جلبک‌ها در این ماه‌ها می‌باشد. کمترین اکسیژن محلول در زیر لایه معادل ۰ میلی‌گرم در لیتر در ماه دی و آذر رخ می‌دهد و بیشترین اکسیژن محلول در سطح آب در ماه اردیبهشت برابر ۱۰/۲ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد.

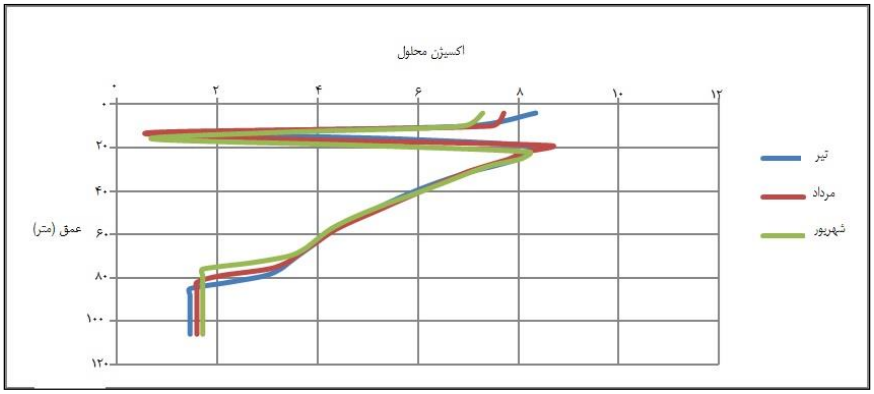


شکل ۸: پروفیل اکسیژن محلول در نزدیکی محور سد گرشا در فصل زمستان.

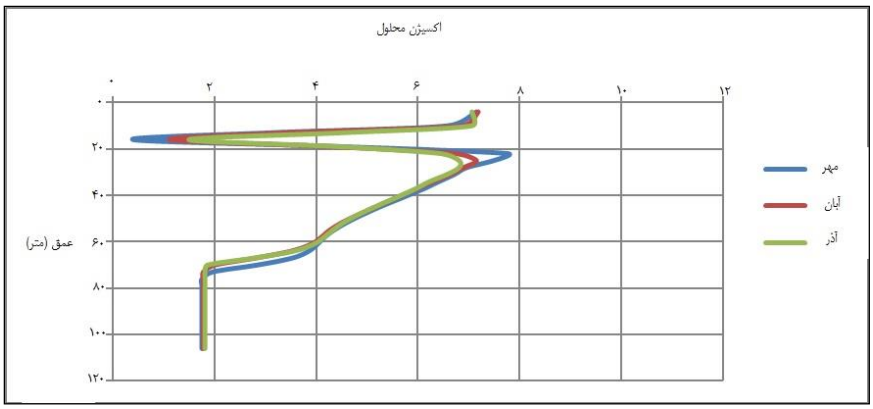
[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]



شکل ۹: پروفیل اکسیژن محلول در نزدیکی محور سد گرشا در فصل بهار.



شکل ۱۰: پروفیل اکسیژن محلول در نزدیکی محور سد گرشا در فصل تابستان.



شکل ۱۱: پروفیل اکسیژن محلول در نزدیکی محور سد گرشا در فصل پاییز.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج مدل شبیه‌سازی لایه‌بندی مخزن سد گرشا در سال یک بار لایه بندی و یک بار اختلاط کامل را نشان می‌دهد و در دسته دریاچه‌های مونومیکتیک قرار می‌گیرد. با توجه به موقعیت کشور ما (ازنظر ارتفاع و موقعیت جغرافیایی) بیشتر سدهای کشور در این ناحیه قرار دارند. بامطالعه تغییرات دمای سطح دریاچه‌های مختلف در شرایط آب و هوایی مشابه مشخص شد متوسط دمای روزانه دریاچه‌های مختلف، مشابه است و فقط در بهار تفاوت کوچکی بین آن‌ها وجود دارد. در تابستان دریاچه‌های کوچک‌تر به جذب گرمای سریع‌تری تمایل دارند (Boehrer, 2005). علاوه بر دما، اکسیژن محلول نیز در این تحقیق مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. حضور اکسیژن محلول در آب یک علامت مثبت و عدم حضور آن‌یک علامت منفی در جهت آلودگی است (Kuo *et al*., 2006). علائم کمبود شدید اکسیژن محلول تغییر کیفیت آب و فقدان حیات آبزیان در منابع آب است. آب‌های دارای اکسیژن محلول زیاد به‌عنوان اکوسیستم‌های پایدار و سالم موردتوجه بوده و برای مصرف تقریبا در همه‌جا از الویت برخوردار هستند (Chapman, 2002). بیشتر اکسیژن محلول از اتمسفر وارد آب می‌شود و همچنین تلاطم و خروشان بودن آب نیز به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای میزان اکسیژن محلول را بالا می‌برد. از سوی دیگر گیاهان و برخی جلبک‌های آبزی نیز طی مدت روز با فرایند فتوسنتز میزان زیادی اکسیژن به‌صورت محلول وارد آب می‌کنند. دما و دبی آب از مؤثرترین عوامل در تعیینDO هستند. گازها ازجمله اکسیژن به‌راحتی در آب‌های سرد محلول‌اند. لذا منابع آب با دمای پایین‌تر عموما DO بیشتری دارند (Fuentetaja, 1999). نتایج نشان داد میزان غلظت اکسیژن محلول با افزایش ارتفاع کاهش می‌یابد اما در میان لایه میزان کاهش اکسیژن به دلیل تغییرات دمای فاحش این لایه نسبت به سایر لایه‌ها بیشتر است. بر اساس نتایج مدل شروع لایه‌بندی با شروع فصل گرما می‌باشد. به عبارتی اختلاط تقریبا کاملی در زمستان وجود دارد که فرض لایه‌بندی تابستانه را نیز تائید می‌کند. این اختلاط کامل زمستانه می‌تواند توجیه‌کننده افزایش DO در لایه‌های پایین‌تر با شروع فصل بهار باشد، به این صورت که وارونگی ایجادشده در لایه‌بندی موجب اختلاط کیفی مخزن شده و غلظت بالای اکسیژن محلول در لایه‌های فوقانی به لایه‌های زیرین مخزن منتقل‌شده است. بالا بودن DO در لایه‌های فوقانی در کلیه فصول نشان‌دهنده تعامل خوب این لایه‌ها با اتمسفر می‌باشد. تأخیر زمانی مشاهده‌شده در لایه‌بندی اکسیژن محلول نسبت به لایه‌بندی حرارتی، یک نوع وابستگی موخر را بیان می‌نماید و نشان‌دهنده رابطه علت و معلولی لایه‌بندی حرارتی و لایه‌بندی کیفی می‌باشد. Fataei و همکاران (۲۰۱۴) در تحقیقی تحت عنوان لایه‌بندی حرارتی سد سیمره با استفاده از مدل CE QUAL W2 به نتایج مشابه تحقیق حاضر رسیدند. طبق مطالعات ایشان سد سیمره در سال یکبار با پدیده لایه‌بندی حرارتی و یک‌بار با پدیده اختلاط کامل روبرو خواهد شد. Ebrahimi و همکاران (۲۰۱۵) نیز در تحقیقی مشابه تحقیق حاضر با عنوان بررسی لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد بافت به این نتیجه رسیدند که نه ماه از سال در مخزن سد بافت پدیده لایه‌بندی حرارتی اتفاق می‌افتد. مروت دوست انار کولی و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود به بررسی کیفیت آب رودخانه سفیدرود در محدوده شهرستان رودبار پرداختند که در پژوهش خود به این نتیجه رسیدند که میزان (DOشاخص سلامتی رودخانه) در رودخانه سفیدرود مطلوب بوده و بالاتر از حداقل میزان استاندارد آب شرب WHO بوده است. علیزاده اوصالو و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود با عنوان بررسی مقطعی روند تغییرات کیفی آب دریاچه پشت سد ارس پارامترهای دیگری مانند آمونیاک، نیترات و فسفات را نیز موردبررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که آب دریاچه سد ارس در رده آب‌های یوتروف قرار دارد. این تحقیق تأکید بیشتری بر روی تغذیه گرایی داشت. شکری و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیق خود به شبیه‌سازی کیفی آمونیوم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدلQUAL2KW پرداختند و نتایج نشان داد که مدل تطابق خوبی با واقعیت دارد. مدل مورداستفاده در تحقیق حاضر (CE QUAL W2) نیز دارای قابلیتی مشابه مدل QUAL2KW می‌باشد و قادر به شبیه‌سازی کیفی و بررسی عکس‌العمل محیط آبی در اثر ورود آلاینده‌ها می‌باشد و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آینده نتایج کاربرد دو مدل برای محیط یکسان جهت ارزیابی و مقایسه مدل‌های مذکور، موردبررسی قرار گیرد.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

منابع

شکری، س.، هوشمند، ع. و معاضد، ه.، ۱۳۹٤. شبیه‌سازی کیفی آمونیوم و نیترات در طول رودخانه گرگر با استفاده از مدلQUAL2KW . فصلنامه علمی پژوهشی اکوبیولوژی تالاب، سال ششم، شماره ۲۳، صفحات ۶۸-۵۷.

علیزاده اوصالو، ژ.، پورآذری، ع.، نکوئی فرد، ع.، صیدگر، م.، یحیی زاده، ی.، شیری، ص. و علیزاده کلشانی، م.، ۱۳۹٤. بررسی مقطعی روند تغییرات کیفی آب دریاچه پشت سد ارس. فصلنامه علمی پژوهشی اکوبیولوژی تالاب، سال ششم، شماره ۲۳، صفحات ۱۴-۵.

مروت دوست انار کولی، م.، حائری پور، س. و امیر نژاد، رضا.، ۱۳۹٤. بررسی کیفیت آب رودخانه سفیدرود در محدوده شهرستان رودبار. فصلنامه علمی پژوهشی اکوبیولوژی تالاب، سال هفتم، شماره ۵۲، صفحات ۴۲-۳۳.

Bartram, J., 1996. Water Quality Monitoring: Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Program. Taylor & Francis.

Boehrer, B., 2005. Path of the 2002 Mulde flood through Lake Goitsche, Germany. Verhandlungen des. International Verein Limnology, 29: 369–372.

Caruso, B., 2000. Integrated assessment of phosphorus in the Lake Hayes catchment, South Island New Zealand. Journal of Hydrology, 229(3): 168-89.

Chapman, D.V., 2002. Water quality assessments (WQA): a guide to the use of biota, sediments, and water in environmental monitoring. 2th Ed. Britain, London, E & FN Spon.

Chung, S. W. and Oh, J. K., 2006. Calibration of CE-QUAL-W2 for a Monomictic reservoir in a monsoon climate area. Journal of Water Science and Technology, 54: 29-37.

Cole, T. M. and Wells, S. A., 2008. CE-QUAL-W2 a two-dimensional, laterally averaged. Hydrodynamic and Water Quality Model. Version 3.6, User Manual. Instruction Report, Prepared for U.S. Army Corps of Engineers Washington, DC.

Dai, L., Dai, H. and Jiang, D., 2012. Temporal and spatial variation of thermal structure in Three Gorges Reservoir: a simulation approach. J. Food Agriculture Environment, 10 (2): 1174–117.

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.

Ebrahimi, M., Jabbari, E. and Abbas, H., 2015. Simulation of Thermal Stratification and Salinity in Dam Reservoir Using CE-QUAL-W2 Software (Case study: Baft Dam). Journal of Civil Engineering and Urbanism, 5(1): 7-11.

Fataei, E., Ansari Moghdam, D. and Nasehi, F., 2014. Prediction of thermal stratification of Seymareh Damusing CEQUAL-W2 Model. Advances in Bioresearch, 5(1): 150-159.

Gelda, R. K., Brooks, C. M., Effler, S. W. and Auer, M. T., 2000. Interannual variations in nitrification in a hyper eutrophic urban lake: occurrences and implications. Water research. 34(4): 1107-18.

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. 3131-3134.

Imboden, D. M. and Wu¨est, A., 1995. Mixing mechanisms in lakes, in Physics and Chemistry of Lakes. Springer Verlag. 83-138Roberts, R.D., 2003. Perspectives on Environmental Monitoring in Freshwater Management, Springer.pp. 23-82.

Kannel, P. R., 2011. A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams. Journal of Environmental Model Assessment, 16: 183–204.

Kuo, J. T., Lung, W. S., Yang, C. P., Liu, W. C., Yang, M. D. and Tang, T. S., 2006. Eutrophication modeling of reservoirs in Taiwan. Environmental Modeling and Software, 21: 829-844.

Kurup, R. G., Hamilton, D.P. and Phillips, R.L., 2000. Comparison of two 2-dimensional, laterally averaged hydrodynamic model applications to the Swan River Estuary. Mathematics and Computers in Simulation, 51: 627–638.

Palmer, M. D., 2001. Water Quality Modeling: Guide to Effective Practice. World Bank Publications.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

Pe´rez-Fuentetaja, A., 1999. Significance of dissolved organic carbon in the prediction of thermocline depth in small Canadian Shield lakes. Journal of Aquatic Ecology, 33(2):127–133.

Rockwell, D. C., 2005. The US EPA Lake Erie indicators monitoring program 1983-2002: Trends in phosphorus, silica, and chlorophyll a in the central basin. Journal of Great Lakes Research, 31(2): 23-34.

Vice President of Strategic Planning and Control (VPSPC)., 2003. Reservoir water quality monitoring guidelines, 522: 140-47.

Zhang, Z. and Johnson, B. E., 2014. Aquatic Nutrient Simulation Modules (NSM) Developed for Hydrologic and Hydraulic Models. ERDC/EL TR-14-X. U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]

[Downloaded from jweb.ahvaz.iau.ir on 2026-11-09]