نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant
10th Year/ No. 36/ March 2024

بررسی لایه‌بندی حرارتی سد کرخه با استفاده از مدل CE-QUAL-W2

ساقی باقرزاده [۱]
مهناز قائینی حصاروئیه ۲*
کوروش قادری [۳]

چکیده

دریاچه‌ها و مخازن از جمله منابع مهم آب‌های سطحی محسوب می‌شوند که برای مصارف گوناگونی مانند شرب، کشاورزی، صنعت و غیره استفاده می‌شوند. یکی از عوامل بسیار مهمی که کیفیت آب مخازن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لایه‌بندی حرارتی می‌باشد. انتخاب مدل مناسب با شرایط فیزیکی مخازن و جمع‌آوری و اندازه‌گیری داده‌های مورد نیاز برای اجرای آن، مهمترین گام در فرآیند مدل‌سازی و کالیبراسیون می‌باشد. درتحقیق حاضر، از رویکرد شبیه‌سازی بر مبنای تلفیق مدل کیفی CE-QUAL-W2 و روش الگوریتم چرخه آب (WCA) برای مدلسازی کیفی مخزن سد کرخه استفاده شده است. برای مطالعه و بررسی دقیق لایه‌بندی حرارتی ابتدا از مدل کیفی CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی دما در سال های ۱۳۹۳ و۱۳۹۴ استفاده شد و سپس برای کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر دما در مدل CE-QUAL-W2، یک مدل کامپیوتری بر مبنای الگوریتم WCA توسعه داده شد. بررسی کارآیی مدل ساخته شده با استفاده از یک سری شاخص‌های آماری نظیر ضریب همبستگی (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) صورت گرفت. مقادیر R^2 در الگوریتم WCA در۳ مرداد، ۲۶ مرداد و ۱۶ شهریور (۱۸۳، ۲۰۶، ۲۲۷) به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۰/۹۵ و ۰/۹۹ به دست آمده است. همچنین مقادیر RMSE و MBE در الگوریتم WCA به ترتیب برابر۱/۸۷، ۱/۳۳، ۱/۲۱و۰/۶۹-، ۰/۸۴ و ۰/۶۸ می باشد. به طورکلی می توان نتیجه گرفت که الگوریتم WCA در تخمین پارامترهای مؤثر بر دما از دقت خوبی برخوردار می‌باشند.

واژگان کلیدی
مدل CE-QUAL-W2، کالیبراسیون، لایه‌بندی حرارتی، الگوریتم چرخه آب.

۱. دانشجوی دکتری بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
*۲. استاد بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان (نویسنده مسئول). mghaeini@uk.ac.ir
۳. دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

علمی-پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

۱- مقدمه

یکی از ابتدایی‌ترین و مهم‌ترین مسائل زندگی بشری، تأمین آب مورد نیاز و با کیفیت قابل قبول است. به همین دلیل داشتن منابع آب سالم، پیش نیاز ضروری و اساسی برای حفظ محیط زیست، رشد و توسعه اقتصادی، سیاسی، اجتماعی و فرهنگی کشور می‌باشد (اولیوریا و همکاران[۱]، ۲۰۱۲). در طی سال‌های اخیر، با افزایش جمعیت و توسعه‌ی روزافزون صنعت و به تبع آن تخلیه بیشتر پساب-های شهری، صنعتی و کشاورزی به منابع آب، اکثریت منابع آب موجود در سطح جهان اعم از رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن و آب‌های زیرزمینی آلوده شده‌اند. این تغییرات عمدتاً منفی بوده و بهره‌برداری از منابع آب را به شدت محدود می‌سازد (دارنالت و همکاران[۲]، ۲۰۰۳). احداث سد و ذخیره‌کردن جریان سطحی، خود باعث تغییر در خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب مخزن می‌شود. یکی از جنبه‌های مهم پیش‌بینی اثرات زیست‌محیطی احداث یک سد، پیش‌بینی کیفیت آب مخزن و جریان خروجی از مخزن پس از بهره برداری است. یک روند مهم تأثیرگذار که کیفیت و خصوصیات آب دریاچه‌ها و مخازن سدها را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لایه-بندی حرارتی[۳] است. به طور کلی، وجود لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد، بیانگر تغییرات کیفی آب در ترازهای مختلف آب مخزن است که در صورت تداوم منجر به شرایط کیفی نامناسب آب در مخزن می گردد. در این شرایط معمولاً سه لایه با میانگین‌های حرارتی مختلف به صورت سطحی (اپیلیمنیون)، لایه‌ی میانی (متالمینیون) و لایه‌ی زیرین (هیپولیمنیون) به وجود می‌آید. لایه‌بندی حرارتی، تابعی از شرایط دمایی محیط بوده در فصول مختلف سال رفتارهای متفاوتی از آن مشاهده می‌شود. شدیدترین حالت لایه‌بندی حرارتی، عموماً در فصل تابستان، رخ می‌دهد. لایه‌بندی به مفهوم ایجاد لایه‌هایی از جرم‌های سیال است که به دلیل اختلاف در چگالی، درجه حرارت و مواد محلول و معلق ایجاد می‌شود. در مخازن عمیق، ممکن است اختلاف درجه حرارت بین لایه‌های بالا و پایین به بیش از ۱۵ درجه سانتی گراد نیز برسد (رینولدز[۴]، ۱۹۹۲). اولین بار در سال ۱۹۵۳ مقوله لایه‌بندی حرارتی در ایالات متحده آمریکا توسط سازمان ارتش آمریکا بر روی مخازن آب مورد بررسی قرار گرفت. کو[۵] و همکاران در سال ۲۰۰۶، به مدل سازی لایه‌بندی حرارتی آب در چند سد با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند و نتایج قابل قبولی به دست آوردند. همچنین لو[۶] و همکاران در سال ۲۰۰۹، به شبیه سازی مخزن مینگدر واقع در تایوان با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2 طی یک دوره‌ی دو ساله پرداختند. نتایج حاصل از این مطالعه به این صورت می باشد که، با کاهش ۲۰ و ۸۰ درصدی بار فسفر، کیفیت دریاچه از حالت مغذی به نیمه مغذی و شاداب تغییر پیدا کرده است. در تحقیق دیگری آنتونوپولوس و گیانیو[۷] در سال ۲۰۰۳، به شبیه سازی لایه‌بندی حرارتی و اکسیژن محلول در دریاچه‌ی وگوریست در یونان پرداختند. اطلاعات مربوط به این دریاچه در دو سال مختلف جمع آوری گردیده است. این مدل بر اساس معادله‌ی انتشار ناپایدار با شار اکسیژن از طریق سطح آزاد و تولید اکسیژن فتوسنتز، تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی و تنفس گیاه به عنوان منابع داخلی بررسی شده است. نتایج مدل نشان داد که تطابق خوبی بین مقادیر شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده‌ی دمای آب و D.O وجود دارد. همچنین در سال ۲۰۱۸ لی[۸] و همکاران، به بررسی تغییرات حرارتی و هیدرودینامیکی تحت آب و هوای گرم تر در مخازن با لایه‌بندی متغییر پرداختند. نتایج آنها نشان داد که در ماه‌های پائیز و زمستان، اختلاط کامل در مخزن سد ایجاد شده است و با گرم شدن دمای سطحی آب به دلیل بالا رفتن دمای هوای منطقه، اختلاف دما در بالا و پایین مخزن زیاد شده و در نهایت در فصل تابستان این اختلاف به بالاترین میزان رسیده است.

1. Oliveira
2. Darnault
3. Thermal Stratification
4. Reynolds
5. Kuo
6. Liu
7. Antonopoulos and Gianniou
8. Lee

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

در همین راستا، خداشناس[1] و همکاران ، درسال ۲۰۱۹ به بررسی مدلسازی کیفی سد با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 پرداختند. نتایج براساس دوره‌ی زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۴ انجام شده است. در این تحقیق، لایه‌بندی حرارتی سه ماهه در مخزن انجام شد و همچنین، براساس پارامترهای کیفی بدست آمده، نشان داد که مخزن سد دوستی در معرض خطر فرسایش می‌باشد. در تحقیق اخیر، ضیایی[2] و همکاران در سال ۲۰۱۹، بر روی لایه‌بندی حرارتی و شوری مخزن سد زاینده‌رود مطالعه نمودند. کالیبراسون و صحت سنجی از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ انجام گردید و نتایج نشان داد که تطابق مناسبی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده وجود داشت. براساس داده‌های شبیه سازی شده، لایه‌بندی مخزن سد در تابستان، منجر به تغییر در کیفیت آب و شرایط بی هوازی لایه‌ی زیرین می‌شود. در تحقیق دیگری، در سال ۲۰۲۱ آزادی[3] و همکاران به ارزیابی تغییرات آب و هوا بر روی لایه‌بندی حرارتی مخازن با استفاده از نرم‌افزار CE-QUAL-W2 و HadCM3 پرداختند. در این تحقیق، آنها تغییرات دمایی آینده مخازن را برای برداشت بهینه‌ی آب از دریچه‌ها پیش‌بینی کردند. نتایج این تحقیق، نشان داد که به طور میانگین، دمای سطح آب بالا و پایین مخزن در طی تغییر آب و هوایی به ترتیب ۱/۶۹ و ۱/۲۴ درجه افزایش یافت.

علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، تحقیقات وسیعی در مورد الگوریتم‌ها و روش‌های بهینه‌سازی مربوط به چرخه‌ی آب و کاربرد آن صورت گرفته است. لازم به ذکر است، انتخاب الگوریتم و روش‌های بهینه‌سازی، به خصوصیات سامانه در نظر گرفته شده، نوع تابع هدف، در دسترس بودن داده ها، قیود و متغیرها بستگی دارد (لابادیه[4]، ۲۰۰۴). در چند دهه‌ی اخیر روش های متعدد بهینه سازی توسط محققان مختلف در سراسردنیا توسعه یافته است. وربز[5] در سال ۱۹۹۳، مروری کلی را بر انواع روش‌های بهینه سازی و شبیه‌سازی در مهندسی منابع آب و به‌ویژه بهره وری از مخازن، انجام داد. شریف و وارلا[6] در سال ۲۰۰۰، بهینه‌سازی مخازن با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. این روش از طریق کاربرد در سیستم مخزنی در اندونزی با در نظر گرفتن وضعیت توسعه‌ی موجود در حوضه و دو سناریوی توسعه منابع آب نشان داده شد. همچنین نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک را با برنامه‌ی دینامیکی دیفرانسیل گسسته مقایسه کردند. همچنین، چانگ[7] و همکاران در سال ۲۰۱۶، از الگوریتم ژنتیک برای استخراج منحنی فرمان در سامانه های چند مخزنه استفاده کردند. نتایج به دست آمده حاکی از عملکرد مناسب این الگوریتم می‌باشد. همچنین اُسفِلد و سالمون[8] در سال ۲۰۰۵، از الگوریتم GA-KNN جهت کالیبراسیون مدل CE-QUAL-W2 در منطقه‌ی ارگان آمریکا استفاده کردند. با وجود اینکه این که، نتایج مشابهی با الگوریتم ژنتیک دارد، ولی زمانی اجرایی این روش نسبت به ژتنیک کمتر است. به طور مشابه، بوکُلا[9] و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 به شبیه‌سازی دما در طول سال‌های ۲۰۰۴- ۱۹۹۸ در دریاچه دتروی[10] اُرگان[11] پرداختند. نتایج نشان داد که در ماههای آگوست و فوریه، دریاچه دچار لایه‌بندی شدید بوده است.

علاوه بر روش‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی در بالا، الگوریتم چرخه‌ی آب (WCA) [12]، یکی از کارهای فرا ابتکاری است که مفاهیم بنیادی و ایده‌های زیر بنایی این روش، از طبیعت و براساس مشاهدات، فرآیند چرخه‌ی آب و جریان رودخانه‌ها و نهرها به دریا در جهان واقعی الهام گرفته شده است (اسکندر[13] و همکاران، ۲۰۱۲. اسکندر[14] و همکاران در سال ۲۰۱۳ از الگوریتم چرخه‌ی آب در بهینه‌سازی وزن

1 . Khodashenas
2 . Ziaie
3 . Azadi
4 . Labadie
5 . Wurbs
6 . Sharif and Wardlaw
7 . Zhang
8 . Ostfeld and Salomons
9 . Buccola
10. Detroit
11. Oregon
12. Water Cycle Algorithm
13 . Eskandar
14 . Eskandar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

سازه‌ی خرپا، و باقی پور[1]در سال ۲۰۱۴ برای تخصیص بهینه در مسایل زیست‌محیطی، از این الگوریتم استفاده کرده‌اند. در مطالعه‌ای دیگر، حداد[2] و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از روش WCA به بهینه‌سازی مخازن پرداختند و نتایج آن را با نتایج حاصل از دیگر الگوریتم‌های مشهور و با پیاده‌سازی بر روی توابع آزمون استاندارد مقایسه کرده‌اند. نتایج، حاکی از برتری الگوریتم چرخه‌ی آب نسبت به اکثر الگوریتم‌ها بود. در سال‌های اخیر، چن[3] و همکاران در سال۲۰۲۱، به بررسی بهنیه‌سازی مسائل جریان قوی طبق یک استراتژی محدود با استفاده از الگوریتم WCA پرداختند. مقایسه‌ی نتایج حاصل از این الگوریتم با الگوریتم PSO نشان داد که الگوریتم ترکیبی WCA دارای همگرایی بالا و پایداری قوی می‌باشد. در تحقیق دیگری، شعاعی[4] و همکاران در سال۲۰۲۲، مدل هیدرودینامیکی و مدل کیفی آب را در CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی فاز محلول در مورد مخزن سد شهید رجایی ارائه کردند که این مدل میزان فرایند انتقال-انتشار را توصیف کردند. همچنین قلی زاده و نمین[5] در سال ۲۰۲۲ به بررسی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد چنگوله در استان ایلام به کمک مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 پرداختند. ایشان به این نتیجه رسیدند که غلظت اکسیژن محلول در پروفیل قائم مخزن از سطح تا کف تغییر چندانی ندارد.

با توجه به مطالب گفته شده و اهمیت روش‌های بهینه سازی، در پژوهش حاضر، از الگوریتم چرخه‌ی آبWCA، به عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری جدید، در حل مسائل بهینه‌سازی، بهره‌وری از سامانه مخزن سد کرخه، استفاده شده است. هدف از این تحقیق، بررسی پدیده‌سی لایه‌بندی حرارتی مخزن سد کرخه، براساس دما و الگوی چرخه‌ای دما، با استفاده از مدل دوبعدیCE-QUAL-W2 می‌باشد و به منظور کالیبراسیون دما و پارامترهای مؤثر بر آن از الگوریتم WCA استفاده می‌شود.

۲- مواد و روش ها

۲-۱- منطقه‌ی مورد مطالعه

سد مخزنی کرخه در حدود ۲۰ کیلومتری شمال غربی شهر اندیمشک در استان خوزستان بر روی رودخانه‌ی کرخه و در ۱۲ کیلومتری بالادست پای پل احداث شده است. این سد در ´۸/۷ °۴۸ شرقی و ´۶/۲۹ °۳۲ شمالی واقع شده است. رودخانه‌ی کرخه در بالادست محور سد، ۹۰ درجه تغییر جهت می‌دهد و در نتیجه دریاچه سد در سمت راست محور سد قرار گرفته است. مشخصات مربوط به سد، شامل مشخصات عمومی سد و حوضه‌ی آبریز در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱ : مشخصات اصلی سدکرخه و حوزه آبریز آن (ترابی حقیقی، ۱۳۸۲)

نام سد	کرخه
نوع سد	خاکی همگن با هسته رسی
نام رودخانه	رودخانه کرخه
ارتفاع سد	۱۲۷ متر
طول تاج	۳۰۳۰ متر
حداکثر تراز سطح آب در وقوع سیل	۲۳۰/۹ متر بالاتر از سطح دریا
تراز نرمال	۲۲۰ متر بالاتر از سطح دریا
حجم مخزن در تراز نرمال	۵۹۰۰ میلیون متر مکعب
حجم مفید مخزن	۳۹۰۳/۸۱ میلیون متر مکعب
حجم مرده مخزن	۱۴۴۳ میلیون متر مکعب
نوع سرریز	اوجی
متوسط دبی سالانه رودخانه	۵۵۸۰ میلیون متر مکعب
طول دریاچه در تراز بهره‌برداری	۶۰ کیلومتر
مساحت دریاچه در ترازبهره‌برداری	۱۶۲/۴۷ کیلومتر مربع

1 . Baghipour
2 . Haddad
3 . Chen
4 . Shoaei
5 . Gholizade and Namin

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

۲-۲- مدلسازی با نرم افزار CE-QUAL-W2

نرم‌افزارCE-QUAL-W2 یک مدل دوبعدی (افقی و عمودی) هیدرودینامیک و کیفیت آب است که می‌تواند پیکره‌هایی نظیر رودخانه های عمیق، مخزن سد و دریاچه را مدل کند. برای اولین بار این مدل در سال ۱۹۹۵ توسط واحد مطالعات آبراهه های مهندسین ارتش آمریکا (WES) تهیه شده است (کول و ولز[1]، ۲۰۰۶). این مدل به طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی حرارت برای دوره‌های طولانی، هیدرودینامیک، بدنه‌های آبی چند شاخه و مدل‌هایی که شامل چندین ورودی و خروجی هستند، محاسبات مربوط به پوشش یخ و شرایط مرزی که با زمان تغییر می‌کنند و کیفیت آب در مخازن عمیق و دریاچه‌ها و در مناطق جغرافیایی مختلف به کار رفته است (گاروی[2] و همکاران، ۱۹۹۸) مدل شامل زیربرنامه کیفیت آب و زیربرنامه هیدرودینامیک می‌باشد. محاسبات هیدرودینامیک آن تحت تأثیر چگالی متغیر ناشی از دما و شوری و مواد محلول و معلق می‌باشند. این مدل، عمدتاً برای مخازن ساخته شده است اما می‌توان برای رودخانه‌ها و خورهای رودخانه‌ای کم عرض نیز بکار رود. CE-QUAL-W2 دارای قابلیت‌های زیادی از جمله شبیه‌سازی هیدرودینامیک سازه‌های آبی (لوله، پمپ، سرریز و دریچه) و همچنین شبیه‌سازی مسائل کیفی مختلف (ردیاب‌ها، کلیفورم، COD، BOD، جلبک، اکسیژن محلول، نیترات، نیتریت، فسفر آلی، جامدات معلق معدنی، گازهای محلول، آهن و غیره) می‌باشد (اسکندر[3] و همکاران، ۲۰۱۲).

این مدل براساس روش تفاضل محدود، معادلات متوسط-گیری شده در عرض شامل معادله‌ی سطح آزاد آب رابطه ۱، مومنتم در جهت z (رابطه ۲))، مومنتم در جهت x (رابطه۳))، پیوستگی (رابطه۴))، انتقال-انتشار (رابطه۵)) و معادله حالت (رابطه ۶)) که ارتباط بین دانسیته، دمای آب و غلظت مواد جامد محلول و معلق را برقرار می‌کند، حل نموده و قادر به محاسبه تراز سطح آزاد، فشار، دانسیته، سرعت قائم و افقی و غلظت اجزا می‌باشد (بوچک[4]، ۱۹۹۵).

$$\frac{\partial \mathrm{B}\eta\eta}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}\int_{\eta}^{h} UB\,dz - \int_{\eta}^{h} qB\,dz \qquad (۱)$$

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

$$\frac{\partial UB}{\partial t}+\frac{\partial UUB}{\partial x}+\frac{\partial WUB}{\partial z}= g\,B\,\boldsymbol{sin}\,\alpha +g\,\boldsymbol{cos}\,\alpha\,B\,\frac{\partial \eta}{\partial x} -\frac{g\,\boldsymbol{cos}\,\alpha\,B}{\rho}\int_{\eta}^{z}\frac{\partial \rho}{\partial x}\,dZ +\frac{\mathbf{1}}{\rho}\,\frac{\partial B_{\tau x x}}{\partial x}+\frac{\mathbf{1}}{\rho}\,\frac{\partial B_{\tau x z}}{\partial z} +qBU_x \qquad (۳)$$

$$\frac{\partial \mathrm{UB}}{\partial \mathrm{x}}+\frac{\partial \mathrm{WB}}{\partial \mathrm{z}}=\mathrm{qB} \qquad (۴)$$

$$\frac{\partial B_{\phi}}{\partial t}+\frac{\partial UB_{\phi}}{\partial x}+\frac{\partial WB_{\phi}}{\partial z} -\frac{\partial\left(B\,D_z\,\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)}{\partial x}-\frac{\partial\left(B\,D_z\,\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)}{\partial z} =q_{\phi}B+S_{\phi}B \qquad (۵)$$

$$\rho=f\left(T_w,\phi_{TDS},\phi_{SS}\right) \qquad (۶)$$

در این روابط، x و z مختصات افقی و قائم، B عرض پیکره آبی، U سرعت در راستای x میانگین‌گیری شده در عرض، W سرعت در راستای z میانگین‌گیری شده در عرض، ρ

1 . Cole and Wells
2 . Garvey
3 . Eskandar
4 . Edward M. Buchak

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

چگالی آب، t زمان، P فشار، g شتاب ثقل، q دبی ورودی و خروجی، α شیب کف پیکره آبی، ϕ غلظت اجزا متوسط گیری شده در جهت عرضی، D_x و D_z ضرایب پخش حرارت و اجزا در جهت‌های x و z، τ_{xx} و τ_{xz} تنش برشی آشفته در جهات x و z، q_ϕ غلظت اجزا ورودی و خروجی، S_ϕ جمله مربوط به منبع تولید یا هدر رفت اجزای کیفی، B_ϕ 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 دمای آب T_w، غلظت مواد جامد محلول ϕ_{TDS} و غلظت مواد جامد معلق ϕ_{SS} می‌باشد. اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی شامل اطلاعات هندسی، هواشناسی، شرایط اولیه و شرایط مرزی، اطلاعات ضریب پوشش گیاهی و ضریب اصلاح باد می‌باشند که در ادامه توضیحاتی در خصوص آن‌ها ارائه شده است.

۲-۳- بهینه سازی به روش الگوریتمWCA

بهینه‌سازی به معنی یافتن بهترین جایگزین با بهترین عملکرد یا هزینه مؤثر، تحت شرایط و قیود وضع شده، با بیشینه کردن عوامل مطلوب و کمینه کردن عوامل نامطلوب می‌باشد. روش‌ها و الگوریتم‌های بهینه‌سازی به دو دسته الگوریتم‌های دقیق[1] و الگوریتم‌های تقریبی[2] تقسیم-بندی می‌شوند.

الگوریتم‌های دقیق قادر به یافتن جواب بهینه به صورت دقیق بوده ولی در مسائل بهینه‌سازی سخت، کارایی نداشته و زمان حل آن‌ها در این مسائل به صورت نمایی افزایش می‌یابد. الگوریتم‌های تقریبی به دو دسته الگوریتم‌های ابتکاری و فراابتکاری تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوریتم‌های فراابتکاری برای حل مشکلات الگوریتم‌های ابتکاری ارائه شدند. در واقع الگوریتم‌های فرا ابتکاری، یکی از انواع الگوریتم‌های بهینه‌سازی تقریبی هستند که دارای مکانیزم-های خروج از بهینه‌ی محلی بوده و قابلیت کاربرد در طیف وسیعی از مسائل را دارا هستند. الگوریتم WCA یکی از مفیدترین الگوریتم‌های فراابتکاری در دهه‌های اخیر می‌باشد که در این تحقیق از الگوریتم چرخه‌ی آب به منظور کالیبراسیون دما در روزهای ۱۸۳، ۲۰۶ و ۲۲۷ که توسط مدل CE-QUAL-W2 شبیه‌سازی شده، استفاده گردید.

الگوریتم WCA، با جمعیت اولیه، که قطره‌ی باران نامیده می شود. در ابتدا فرض می‌شود که باران یا بارش‌های دیگر وجود دارند. بهترین قطره‌ی باران به عنوان دریا و تعدادی از قطرات باران خوب به عنوان یک رودخانه انتخاب می شوند و ما بقی قطرات باران به عنوان نهرها در نظر گرفته می شود که به سمت رودخانه و دریا جریان می‌یابند. در یک مسئله‌ی بهینه‌سازی چندبعدی، یک قطره باران آرایه ای به شکل $1\times N_{var}$ است. این آرایه به صورت زیر تعریف می‌شود (محمدی وهمکاران، ۱۳۹۸):

$$\text{Raindrop} = [X_1, X_2, X_3, ..., X_{N\,\text{var}}] \qquad (۷$$

که Raindrop یک قطره‌ی باران، X و N_{var} به ترتیب مقدار و تعداد متغیرهای طراحی می‌باشند. برای شروع الگوریتم، یک جمعیت اولیه از ماتریس قطرات باران به اندازه‌ی N_{pop} به طور تصادفی ایجاد می‌شود (به عنوان مثال جمعیت قطرات باران). از این رو، ماتریس X که به طور تصادفی تولید شده است در ماتریس زیر، سطر و ستون به ترتیب تعداد جمعیت و تعداد متغیرهای طراحی است:

$$Population\ of\ Raindrops = \begin{bmatrix} Raindrop_{\,1} \\ Raindrop_{\,2} \\ \vdots \\ Raindrop_{\,N_{pop}} \end{bmatrix} = \qquad (۸$$

$$\begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \cdots & X_{N_{var}}^1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_1^{N_{pop}} & X_2^{N_{pop}} & \cdots & X_{N_{var}}^{N_{pop}} \end{bmatrix}$$

مقادیر قطرات باران با ارزیابی تابع هزینه (C) داده شده در رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

1. Exact Algorithms

2. Approximate Algorithms

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

$$C_i = \mathrm{Cost}_i = f(X_1^i, X_2^i, X_3^i, ..., X_{N_{\mathrm{var}}}^i) \quad i = 1,2,3,...,N_{pop} \qquad (۹$$

که در آن C_i مقدار تابع هدف هر قطره می باشد و N_{pop} و N_{var} به ترتیب تعداد قطرات باران (جمعیت اولیه) و تعداد متغیرهای طراحی است. در گام اول، به تعداد N_{pop} قطره باران جدید ایجاد، سپس تعداد N_{Sr} از بهترین قطرات (کمترین مقدار)، به عنوان دریا و رودخانه انتخاب می شود. بقیه جمعیت، به عنوان قطرات بارانی که نهرها را تشکیل می دهد، N_{St} که ممکن است به رودخانه‌ها و یا به طور مستقیم به دریا جریان پیدا کنند، با استفاده از رابطه ۱۰) محاسبه می‌شود:

$$N_{Sr} = \mathrm{Number\ of\ River} + 1(\mathrm{Sea}) \qquad (۱۰$$
$$N_{St} = N_{pop} - N_{Sr}$$

به منظور شدت جریان، برای تعیین یا اختصاص قطرات باران به رودخانه‌ها و دریا، رابطه ۱۱) داده شده است:

$$N_{Sn} = \mathrm{round}\left\{\left|\frac{\mathrm{Cost}_n}{\sum_{i=1}^{N_{Sr}} \mathrm{Cost}_i}\right| \times N_{St}\right\} \quad n = 1,2,...,N_{Sr} \qquad (۱۱$$

که در آن N_{Sn} تعدادی نهرهایی است که به رودخانه‌های معین و یا دریا می ریزند.

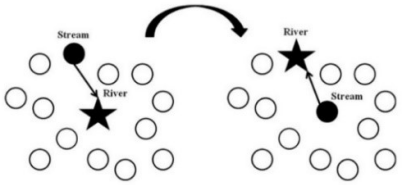
یک نهر جریان تا رسیدن به رودخانه در امتداد خط اتصال بین آن‌ها با استفاده از یک فاصله که به طور تصادفی انتخاب شده، جریان می‌یابد که این فاصله با توجه به رابطه‌ی ۱۲) مشخص می‌شود:

$$X \in (0, C \times d), \quad C > 1 \qquad (۱۲$$

C مقداری بین ۱ و ۲ است. بهترین مقدار برای C را می‌توان ۲ انتخاب کرد (اسکندر[1] و همکاران، ۲۰۱۲). فاصله‌ی فعلی بین نهر و رودخانه با d نشان داده شده است. مقدار X در رابطه ۱۲)، متناظر با یک عدد تصادفی توزیع شده (عددی بین ۰ و (C × d)) است. مقدار C بزرگتر از یک، امکان جریان پیدا کردن نهرها در جهات مختلف به سمت رودخانه را می‌دهد. وضعیت جدید برای نهرها رودخانه‌ها با استفاده از روابط زیر به دست می آید:

$$X_{\mathrm{Stream}}^{i+1} = X_{\mathrm{Stream}}^{i} + \mathrm{rand} \times C \times (X_{\mathrm{River}}^{i} - X_{\mathrm{Stream}}^{i})$$
$$X_{\mathrm{River}}^{i+1} = X_{\mathrm{River}}^{i} + \mathrm{rand} \times C \times (X_{\mathrm{Sea}}^{i} - X_{\mathrm{River}}^{i}) \qquad (۱۳$$

که در آن rand یک عدد تصادفی یکنواخت توزیع شده بین ۰ و ۱ است. اگر راه‌حل ارائه شده توسط یک نهر، بهتر از رودخانه متصل به آن باشد، موقعیت رودخانه و نهر عوض می‌شود (یعنی نهر، رودخانه می‌شود و رودخانه، نهر می‌شود). این تبادل نیز می‌توانند به همین شکل برای رودخانه‌ها و دریا اتفاق افتد. در شکل۱، تبادل نهری که بهترین راه‌حل بین نهرها و رودخانه است، ارائه شده است.



شکل ۱: تبادل موقعیت بهترین نهر و رودخانه
(اسکندر[2] و همکاران، ۲۰۱۲)

$d_{\max}$ عدد کوچکی (نزدیک به صفر) است و عمق جستجوی دریا را کنترل می کند. اگر فاصله بین رودخانه و دریا کمتر از $d_{\max}$ باشد، نشانگر آن است که رودخانه به دریا رسیده است. مقدار بزرگ $d_{\max}$ برای جستجو را کاهش می‌دهد در حالی که یک مقدار کوچک به شدت جستجو در نزدیکی دریا را تقویت می‌کند. مقدار $d_{\max}$ طبق رابطه (۱۴) در هر مرحله کاهش می‌یابد:

$$d_{\max}^{i+1} = d_{\max}^{i} - \frac{d_{\max}^{i}}{\max iteration} \qquad (۱۴$$

پس از برآورده شدن فرآیند تبخیر، فرآیند بارندگی اعمال می شود. در فرآیند بارندگی، قطرات باران جدید، نهرها را

1 . Eskandar

2 . Eskandar

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

در مکان های مختلف تشکیل می دهند. برای تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل گرفته، از رابطه ۱۵) استفاده می-شود:

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}} = \text{LB} + \text{rand} \times (\text{UB} - \text{LB}) \qquad (۱۵$$

که در آن LB و UB، به ترتیب کران پایین و بالای تعریف شده توسط مسئله می‌باشند. به منظور افزایش سرعت همگرایی و عملکرد محاسباتی الگوریتم برای مسائل مقید، برای نهرهایی که به طور مستقیم به سمت دریا جریان دارند، رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$X_{\text{Stream}}^{\text{new}} = X_{\text{Sea}} + \sqrt{\mu} \times \text{randn}(1, N_{\text{var}}) \qquad (۱۶$$

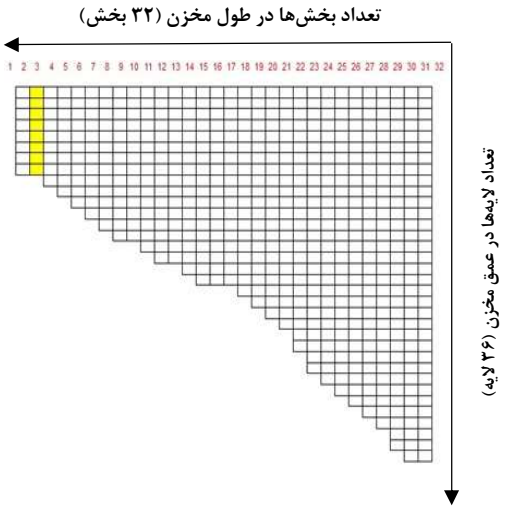
که در آن μ ضریبی است که محدوده‌ی جستجو در نزدیکی دریا را نشان می‌دهد، randn عدد تصادفی توزیع نرمال است. در این تحقیق، مقدار مناسب برای μ، ۰/۱ در نظرگرفته شده است (اسکندر وهمکاران، ۲۰۱۲).

۲-۴- داده‌های هندسی

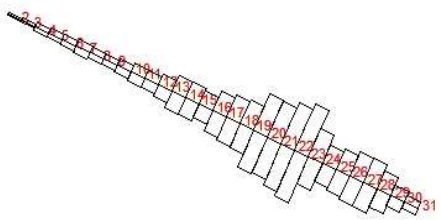
اولین فایل ورودی به مدل، فایل هندسه‌ی مخزن است که در آن بایستی ژئومتری مخزن به مدل معرفی شود. در این مطالعه، سد کرخه به ۳۲ بخش و ۳۶ لایه در جهت قائم تقسیم شد که عمق همه لایه‌ها به میزان ثابت یک متر و طول بخش‌ها ۱۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. جدول ۲، مشخصات لایه‌بندی مخزن سدکرخه در مدلسازی حاضر را نشان می دهد. شکل ۲ و شکل ۳ به ترتیب، هندسه‌ی مخزن در طول و عمق را نشان می دهند. به طور مثال، با توجه به اطلاعات مخزن ارتفاع ۱۴۶۱، لایه ۱۲ و بخش ۱۱ را به عنوان منطقه‌ی مورد نظر را نشان می‌دهد. در تقسیم-بندی لایه‌ها و بخش‌ها شرایط مرزی اعمال شده است (کول و ولز[1]، ۲۰۰۶).

جدول ۲: مشخصات مخزن کرخه در مدلسازی CE-QUAL-W2

تعداد پیکره آبی	تعداد بازه‌ها	تعداد بخشها	تعداد لایه	طول قسمتها	ضخامت لایه
۱	۱	۳۶	۳۲	۱۰۰۰	۲



شکل ۲: نمای جانبی مخزن



شکل ۳: نمای بالای مخزن

۲-۵- اطلاعات جانبی

ضریب سایه‌ی روی مخزن و ضریب پوشش باد برای مقاطع مختلف طولی نیز به مدل به عنوان فایل‌های ورودی معرفی شدند. ضریب سایه‌ی روی مخزن، میزان سایه‌ای را که در اثر عواملی مانند درختان و کوه‌ها بر روی سطح آب ایجاد شده است را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب، بین ۰- ۱ می‌باشد. به عنوان مثال، ضریب سایه برابر با ۰/۸، یعنی به ۸۰ درصد سطح پرتوهای خورشید می‌رسند و یا به عبارتی، ۲۰ درصد سطح سایه بوده و نور به آن نمی‌رسد. از آن‌جایی که در اطراف مخزن سد کرخه، پوشش درختی آن طوری که باعث کاهش ورود اشعه خورشیدی به مخزن سد شود وجود ندارد، بنابراین این ضریب برابر ۱ در نظر گرفته شده است. ضریب پوشش باد، نشان‌دهنده تأثیرگذاری سرعت باد

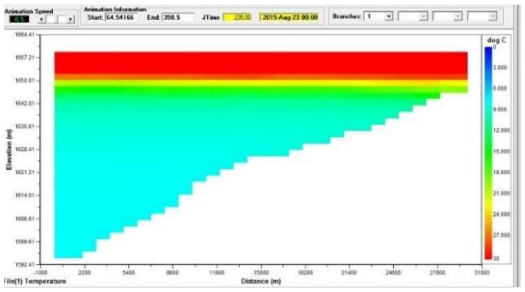
1. Cole and Wells

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

مشخص شده در فایل هواشناسی بر روی سطح دریاچه می‌باشد. این ضریب بین ۰-۱ است که به عنوان ضریب کالیبراسیون در مدل درنظرگرفته شده و مقدار نهایی آن به دست آمده است.

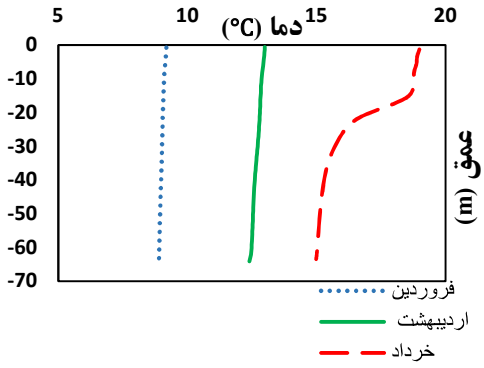
۲-۶- شبیه‌سازی دما با استفاده از مدل CE-QUAL-W2

به منظور مطالعه دقیق لایه‌بندی حرارتی در مخزن در ابتدا باید دمای آب ورودی به مخزن را شبیه‌سازی کرد. در این تحقیق، داده‌های دمای آب ورودی به مخزن سد کرخه در طول دوره‌ی یکساله، از شرکت آب منطقه‌ای استان خوزستان تهیه و براساس داده‌های در دسترس در یک دوره، شبیه‌سازی دما با استفاده از مدل CE-QUAL-W2 انجام شده است. همانطورکه میبینید، در شکل ۴ ، شماتیکی از لایه‌بندی حرارتی در زمان های مختلف، نشان می دهد.

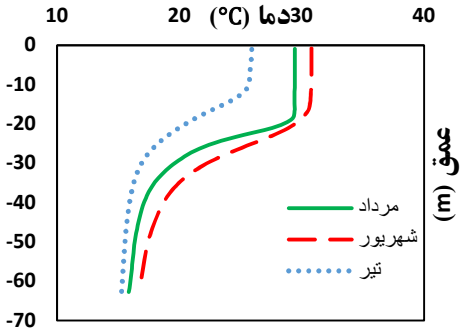


شکل ۴: نمای شماتیکی از لایه‌بندی حرارتی در مخزن کرخه در مدل CE-QUAL-W2

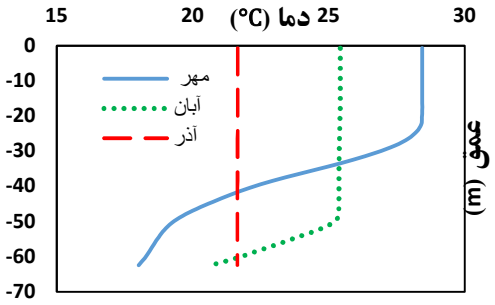
پروفیل‌های عمقی دما در طول ماه‌های مختلف که در شکل ۵ تا شکل ۷ نشان داده شده‌اند، توسط این مدل تهیه شدند.



شکل ۵: تغییرات دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاع آب پشت سد (فروردین، اردیبهشت و خرداد)



شکل ۶: تغییرات دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاع آب پشت سد (تیر، مرداد و شهریور)



شکل ۷: تغییرات دمای آب نسبت به تغییرات ارتفاع آب پشت سد (مهر، آبان و آذر)

باتوجه به مطالب ارائه شده در این تحقیق و نتایج حاصل از مدلسازی کیفیت مخزن سد کرخه با استفاده از نرم افزار CE-QUAL-W2، می توان نتیجه گرفت که با شروع

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

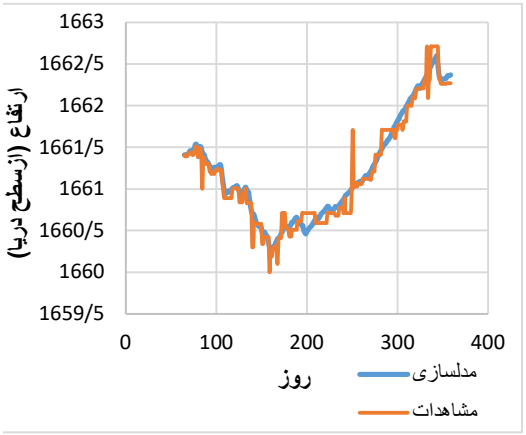
دوره‌ی گرم از اوایل فروردین، مخزن به تدریج وارد لایه-بندی ضعیف شده، از اواسط خرداد ماه با افزایش دمای هوا، لایه‌بندی شدت می‌گیرد. از این زمان به بعد، لایه‌بندی حرارتی تشدید شده و در مرداد و شهریور به اوج خود می‌رسد. در این حالت، ارتفاع لایه بالایی[1] کاهش و ارتفاع لایه میانی[2] افزایش می‌یابد. در اواخر شهریور ماه، با کاهش تدریجی دما، ارتفاع لایه‌ی بالایی افزایش و ارتفاع لایه‌ی میانی کاهش می‌یابد. با ادامه‌ی روند سرد شدن هوا، به تدریج عمق و چگالی لایه‌ی بالایی افزایش یافته، به حدی که در آبان ماه به دلیل سنگین شدن لایه‌های بالایی نسبت به لایه‌های پایینی، پدیده واژگونی[3] رخ می‌دهد. این پدیده وضعیت مخزن را از حالت لایه‌بندی به حالت اختلاط تغییر می‌دهد.

۲-۷- کالیبراسیون مدل

کالیبراسیون مدل، یکی از مهم‌ترین مراحل کار در کل فرآیند مدل‌سازی است. هدف برای اندازه‌گیری تطابق بین داده‌های اندازه‌گیری شده و داده‌های حاصل از مدل عددی برای یک انتخاب خاص از مجموع ضرایب طراحی می باشد. در شبیه سازی دما، کالیبراسیون ارتفاع سطح آب در شکل ۸ نشان داده است. در این مرحله، پس از رسم نمودار حاصل از ارتفاع مدل و ارقام مشاهداتی ملاحظه می شود.

۲-۸- شبیه‌سازی-بهینه‌سازی‌مدل CE-QUAL-W2-WCA

یکی از مهم‌ترین قسمت‌های هر شبیه‌سازی، کالیبراسیون یا یافتن مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل است. کالیبراسیون دما، با توجه به اثر آن روی پارامترهای کیفی انجام شده است و ضرایب اصلاح می‌گردد.



شکل ۸: کالیبراسیون سطح آب مخزن سد

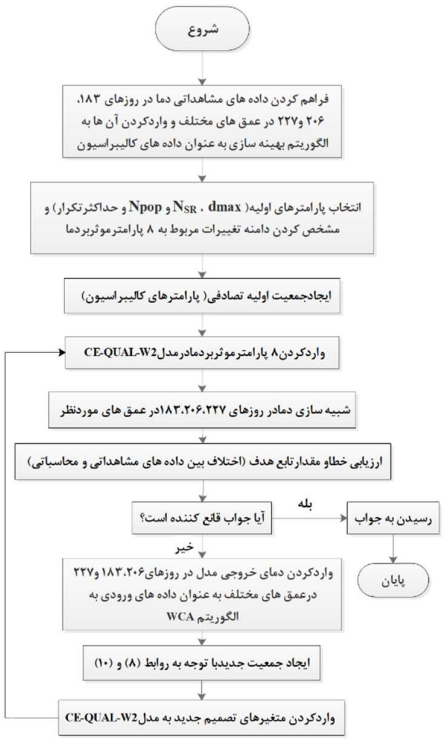
در این تحقیق، کالیبراسیون مدل CE-QUAL-W2 با استفاده از الگوریتم WCA که کد مربوط به آن در MATLAB R2017a نوشته شده است، صورت می‌گیرد. الگوریتم WCA برای کاهش زمان کالیبراسیون استفاده می‌گردد. در این تحقیق، برای کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر دما (روزهای ۱۸۳ و ۲۰۶) و اعتبارسنجی مدل در (روز ۲۲۷)، از داده‌های مشاهداتی دما در (افشار[4] و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده می‌گردد. در واقع، هدف، کاهش اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای دما می‌باشد که با انتخاب مناسب پارامترهای کالیبراسیون می-توان به آن دست یافت.

پارامترهای مؤثر بر دما که در این تحقیق کالیبره شدند، عبارتند از : ضریب پوشش باد[5]، ضریب محو شدن نور در آب[6]، ضریب جذب نور در سطح آب[7]، ضریب پخشیدگی طولی[8]و ضریب ویسکوزیته طولی[9]و ضرایب تجربی تابع سرعت باد AFW، BFW و CFW می‌باشد که ضرایب مؤثر در جدول ۳، نشان داده شده است. در هر تکرار، با استفاده از الگوریتم WCA، این پارامترها تخمین زده شده و با توجه به مقادیر این پارامترها، مدل CE-QUAL-W2 اجرا می‌شود. با استفاده از خروجی‌های دمای شبیه‌سازی شده توسط مدل CE-QUAL-W2 و مقادیر مشاهداتی، تابع

1. Eplimnion
2. Metalimnion
3. Turn Over
4. Afshar et al
5. Wind Sheltering Coefficient (WSC)
6. Light Extinction Coefficient (EXH 20)
7. Light Absorptions (BETA)
8. Light Absorptions (BETA)
9. Eddy Viscosity (AX)

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

هدف محاسبه و با توجه به آن مقدار بهینه پارامترها محاسبه می‌شوند. در شکل ۹، فلوچارت تلفیق مدل CE-QUAL-W2 با الگوریتم WCA نمایش داده شده است.



شکل۹: فلوچارت کالیبراسیون مدل شبیه سازی CE-Qual-W2

جدول ۳: ضرایب مؤثر بر کالیبراسیون دما

ضرایب	مقادیر پیش‌فرض برنامه	دامنه ضرایب استفاده شده در مدل
ضریب ویسکوزیته طولی (AX)	۱ m^2/s	۱-۵۰
ضریب پخشیدگی طولی (DX)	۱ m^2/s	۱-۲۰
ضریب پوشش باد (WSC)	پارامتر کالیبراسیون	۱ -۰/۷
جذب نور در سطح آب (BETA)	۰/۴۵	۰/۵ -۰/۳
ضریب تجربی، رابطه‌ی تبخیر ادینجر (CFW)	۹/۲	۸-۱۰
ضریب تجربی، رابطه‌ی تبخیر ادینجر (BFW)	۰/۴۶	۰/۵۵ -۰/۳
ادینجر (AFW)		

مقادیر پارامترهای بهینه به دست آمده از اجرای مدل CE-QUAL-W2 و الگوریتم WCA در جدول۴، آورده شده است.

جدول ۴: مقادیر پارامترهای مؤثر بر دما در مدل CE-QUAL-W2 بعد از کالیبراسیون توسط الگوریتمWCA

ضرایب	نتایج
AX	۱
DX	۱
WSC	۰/۸۵
BETA	۰/۴
AFW	۱۰
BFW	۰/۳۵
CFW	۲/۹۹

در ابتدا، پارامترهای اولیه الگوریتم WCA طبق جدول (جدول ۵) زیر و پارامترهای مؤثر بر دما به صورت پیش فرض و تمام اطلاعات مورد نیاز مدل شامل دبی ورودی و دبی خروجی و هندسه مدل و غیره و داده‌های مشاهداتی در روزهای ۱۸۳ (جدول۶)، ۲۰۶ (جدول ۷) و ۲۲۷ (جدول ۸) به مدل وارد می‌شود و سپس مدل توسعه داده شده اجرا می‌گردد.

تابع هدف مورد استفاده در این تحقیق، با استفاده از رابطه (۱۷)، کمینه کردن مجموع مطلق خطا بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی می‌باشد.

$$Sum\ Absolute\ Error = \sum_{t=1}^{Mn}\sum_{j=1}^{M}\sum_{i=1}^{N} Abs\left(Obs_{ij}^{t} - Model\ Res_{ij}^{t}\right) \quad (۱۷$$

که در آن Obs_{ij}^{t}دمای مشاهداتی $Model\ Res_{ij}^{t}$

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

دمای شبیه سازی شده می‌باشد. N تعداد داده‌های مشاهداتی در عمق، M تعداد محل‌های کنترل در مخزن و Mn تعداد روزهای کنترل می‌باشد.

در این تحقیق، به منظور کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر دما، الگوریتم WCA با تعداد جمعیت ۴۰ اجرا و بعد از ۵۰ تکرار، تابع هدف به مقدار ثابتی می‌رسد و در نهایت بهینه-سازی متوقف می‌گردد.

جدول ۵: مقادیر پارامترهای اولیه الگوریتم WCA در کالیبراسیون مدل CE-QUAL-W2

تعداد تکرار	۵۰
تعداد قطرات باران	۴۰
تعداد رودخانه‌ها و دریا	۱۰
تعداد متغیرهای تصمیم	۸
C	۲
d_{max}	۱/۵

جدول۶: داده‌های مشاهداتی دما در روز ۱۸۳ سال ۱۳۹۴ در عمق‌های مختلف

عمق	دما
۶	۲۸/۵
۱۲	۲۸/۳
۱۶	۲۲./۲
۲۱	۱۹/۷
۲۶	۱۸/۱
۳۱	۱۶/۱

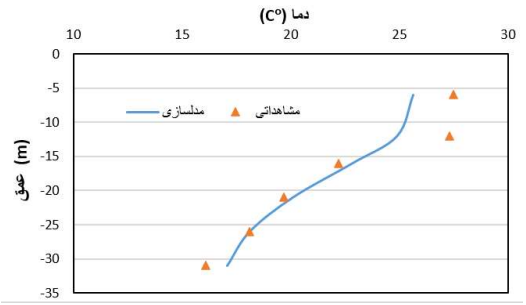
جدول۷: داده‌های مشاهداتی دما در روز ۲۰۶ سال ۱۳۹۴ در عمق‌های مختلف

عمق	دما
۶	۳۰/۸
۱۲	۲۹/۸
۱۶	۲۶
۲۱	۲۲/۱
۲۶	۲۰/۹
۳۱	۱۹/۲

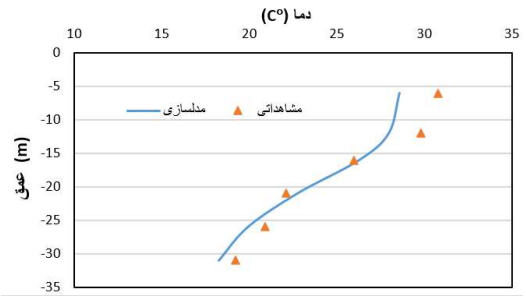
جدول۸: داده‌های مشاهداتی دما در روز ۲۲۷ سال ۱۳۹۴ در عمق‌های مختلف

عمق	دما
۶	۳۱/۵
۱۲	۳۰/۹
۱۶	۲۷
۲۱	۲۱/۴
۲۶	۱۸/۵
۳۱	۱۶

با توجه به پارامترهای بهینه به دست آمده از الگوریتم WCA، مدل CE-QUAL-W2 اجرا شد و نتایج مدلسازی تغییرات دما، نسبت به عمق با داده های مشاهداتی در سه بازه‌ی زمانی ۱۸۳، ۲۰۶ و۲۲۷ روز درشکل ۱۰، شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نشان داده شده است.

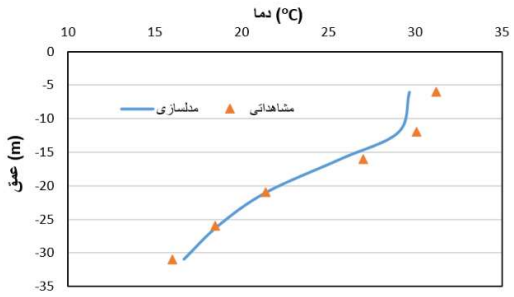


شکل ۱۰: نمودار تغییرات دما نسبت به ارتفاع سد در روز ۱۸۳ سال ۱۳۹۴



شکل ۱۱: نمودار تغییرات دما نسبت به ارتفاع سد در روز ۲۰۶ سال ۱۳۹۴

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]



شکل ۱۲: نمودار تغییرات دما نسبت به ارتفاع سد در روز ۲۲۷ سال ۱۳۹۴

۳- تحلیل نتایج و بحث

جهت بررسی نتایج مدل حاضر از پارامترهای ضریب همبستگی (R^2)، میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) استفاده شده است. از آن‌جایی که مقادیر مثبت MBE، نشان‌دهنده‌ی تمایل مدل برای برآورد کمتر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است و مقادیر منفی MBE ، نشان‌دهنده‌ی بیش برازش مقادیر شبیه‌سازی نسبت به مقادیر مشاهداتی است. در جدول۵، نتایج شاخص های آماری توسط مدل CE-QUAL-W2 پس از کالیبراسیون در روزهای ۱۸۳، ۲۰۶ و ۲۲۷ آورده شده است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_c - \bar{Q}_c)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^{n} (Q_c - \bar{Q}_c)^2}} \right]^2 \quad (۱۸$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Q_c - Q_o)^2} \quad (۱۹$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (Q_o - Q_c) \quad (۲۰$$

درمعادلات فوق، Q_o مقادیر مشاهده شده و Q_c مقادیر پیش‌بینی شده مدل می‌باشد. همچنین $\bar{Q}_o$ میانگین مقادیر مشاهده شده و $\overline{Q_c}$ میانگین مقادیر پیش بینی شده مدل می باشد.

جدول ۹: نتایج شاخص‌های آماری کالیبراسیون مدل CE-QUAL-W2

روز	MBE	RMSE	R^2
۱۸۳	۰/۷	۱/۸۸	۰/۹۵
۲۰۶	۰/۸۴	۱/۳۳	۰/۹۵
۲۲۷	-۰/۶۹	۱/۲۲	۰/۹۹

مقدار مناسب و مطلوب R^2 برابر ۱ است. با توجه به جدول ۹، مقدار R^2 در روزهای ۱۸۳، ۲۰۶ و ۲۲۷ نزدیک به یک است که این نشان‌دهنده‌ی همبستگی و برازش خوب بین مقادیر اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده است. همچنین مقادیر کم RMSE و MBE نشان می‌دهد، مدل در تخمین پارامترهای مؤثر بر دما از دقت خوبی برخوردار است. مقادیر مثبت MBE، نشان‌دهنده‌ی تمایل مدل برای برآورد کم‌تر در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده است.

۴-نتیجه گیری

در این تحقیق، مدلسازی حرارتی در مخزن با توجه به نرم افزار CE-QUAL-W2 انجام شده است، همچنین به منظور کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر دما، الگوریتم WCA استفاده شده است. کالیبراسیون و صحت‌سنجی از جمله مهم‌ترین مراحل در مدل‌سازی می‌باشند. با دقت خوبی کالیبراسیون سطح آب مخزن انجام شده است. با توجه به شبیه سازی دما، توسط مدل CE-QUAL-W2، لایه‌بندی حرارتی در فروردین ماه به صورت ضعیف، شروع شده و اختلاف دما و به تبع آن، اختلاف چگالی در بین لایه‌ها به وجود می‌آید و از اواسط خرداد ماه با افزایش دمای هوا، لایه‌بندی شدت می‌گیرد. از این زمان به بعد لایه‌بندی حرارتی تشدید شده و در مرداد و شهریور به اوج خود می‌رسد. در این حالت، ارتفاع رولایه، کاهش و ارتفاع میان‌لایه، افزایش می‌یابد. در اواخر شهریور ماه، با کاهش تدریجی دما ارتفاع رولایه، افزایش و ارتفاع میان‌لایه، کاهش می‌یابد. با ادامه‌ی روند سرد شدن هوا، به تدریج عمق و چگالی رولایه، افزایش یافته، به حدی که در آبان ماه به دلیل سنگین شدن لایه‌های بالایی نسبت به لایه‌های پایینی پدیده واژگونی[1]

1.Turn Over

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

رخ می‌دهد. این پدیده وضعیت مخزن را از حالت لایه‌بندی به حالت اختلاط تغییر می‌دهد. در این حالت دمای آب مخزن در عمق ثابت خواهد شد.

مقایسه نتایج مدلسازی تغییرات دما نسبت به عمق با داده های مشاهداتی در سه بازه روزهای ۱۸۳، ۲۰۶ و۲۲۷ انجام شده است. عملکرد مدل، در بازه زمانی ۱۴ اسفند تا ۶ دی ماه مورد ارزیابی قرار گرفته است. خروجی های مدل، با داده‌های در دسترس مقایسه شده است. مقادیر R^2، RMSE و MBE در نتایج الگوریتم WCA در روز۱۸۳ به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۱/۸۷ و۰/۶۹، در روز ۲۰۶ به ترتیب برابر با ۰/۹۵، ۱/۳۳ و۰/۸۴، همچنین در روز ۲۲۷ به ترتیب برابر با ۰/۹۹، ۱/۲۱ و۰/۶۸به دست آمده است. به طورکلی می توان نتیجه گرفت که الگوریتم WCA در تخمین پارامترهای مؤثر بر دما از دقت خوبی برخوردارمی باشند.

فهرست علائم و اختصار

B	عرض پیکره آبی
U	سرعت در راستایx میانگین گیری شده در عرض
W	سرعت در راستای z میانگین گیری شده در عرض
ρ	چگالی آب
t	زمان
P	فشار
g	شتاب ثقل
q	دبی ورودی و خروجی
α	شیب کف پیکره آبی
ϕ	غلظت اجزا متوسط گیری شده در جهت عرضی
x	مختصات افقی
z	مختصات قائم
D_x	ضرایب پخش حرارت و اجزا در جهت x
D_z	ضرایب پخش حرارت و اجزا در جهت z
τ_{xx}	تنش برشی آشفته در جهت x
τ_{xz}	تنش برشی آشفته در جهت z
q_ϕ	غلظت اجزا ورودی و خروجی
S_ϕ	جمله مربوط به منبع تولید یا هدررفت اجزای‌کیفی
B_Φ	عرض سطح آب
η	محل سطح آزاد آب
h	عمق
Tw	دمای آب
ϕ_{TDS}	غلظت مواد جامد محلول
ϕ_{SS}	غلظت مواد جامد معلق
Raindrop	آرایه قطره باران طراحی
Ci	تابع هدف هر قطره
Npop	تعداد قطرات باران
Nvar	تعداد متغیرهای طراحی
Nsr	کمترین مقدار به عنوان دریا و رودخانه
Nst	قطره که به دریا جریان می‌یابد.
Nsn	تعداد نهرهایی‌که به رودخانه معین و یا دریا می‌ریزند.
d	فاصله فعلی بین نهر و رودخانه
$X^{\text{new}}_{\text{Stream}}$	تعیین مکان جدید نهرهای تازه شکل‌گرفته
LB	کران پایین تعریف شده در الگوریتم
UB	کران بالا تعریف شده در الگوریتم
μ	نشان دهنده محدوده جستجو درنزدیکی دریا
randn	عدد تصادفی توزیع نرمال

۵- مراجع

1- Afshar, A., Kazemi, H. & Saadatpour, M., (2011), "Particle swarm optimization for automatic calibration of large-scale water quality model (CE-QUAL-W2): Application to Karkheh Reservoir, Iran", Water resources management, 25, 2613-32.

2- Antonopoulos, V. Z. & Gianniou, S. K., (2003), "Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece", Ecological Modelling, 160, 39-53.

3- Azadi, F., Ashofteh, P.-S. & Chu, X., (2021), "Evaluation of the effects of climate change on thermal stratification of reservoirs", Sustainable Cities and Society, 66, 102531.

4- Baghipour, R., Hosseini, S. M. & Boor, Z., (2014), "A water cycle algorithm for optimal allocation of DGs in distribution system considering environmental profit", International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology, 4, 430-54.

5- 5- Buccola, N. L., Risley, J. C. & Rounds, S. A., (2016), "Simulating future water temperatures in the North Santiam River, Oregon", Journal of Hydrology, 535, 318-30.

6- Chen, G., Han, Y., Zhang, Z., Zeng, X. & Li, S., (2021), "Research on Multi-objective Active Power Optimization Simulation of Novel Improved Water Cycle Algorithm", IAENG International Journal of Applied Mathematics, 51, 1-14.

7- Cole, T. M. & Wells, S. A., (2006), "CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.5".
8- Darnault, C., Canbulat, Ş., Canbulat, I., Çetin, S. C., Çimen, F., Karaca, A., Kavdir, Y., Öztürk, H., Parlak, B. & Ok, S. S., (2003), "Fate of Environmental Pollutants", JSTOR.
9- Edward M. Buchak, T. M. C., Wells, S. A, (1995), "CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model", Portland State University.
10- Eskandar, H., Sadollah, A. & Bahreininejad, A., (2013), "Weight optimization of truss structures using water cycle algorithm", Iran University of Science & Technology, 3, 115-29.
11- Eskandar, H., Sadollah, A., Bahreininejad, A. & Hamdi, M., (2012), "Water cycle algorithm–A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems", Computers & Structures, 110, 151-66.
12- Garvey, E., Tobiason, J. E., Hayes, M., Wolfram, E., Reckhow, D. A. & Male, J. W., (1998), "Coliform transport in a pristine reservoir: Modeling and field studies", Water Science and Technology, 37, 137-44.
13- Gholizade, F. & Namin, M. M., (2021), "Simulation of Thermal Stratification and Dissolved Oxygen Concentration Using CE-QUAL-W2 Model (Case Study: Changuleh Dam) ".
14- Haddad, O. B., Moravej, M. & Loáiciga, H. A., (2015), "Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems", Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 141, 04014064.
15- Khodashenas, S. R., Hasibi, A., Davary, K. & Yargholi, B., (2019), "2D Water Quality Modeling of Dam Reservoir (Case Study: Doosti Dam) ", Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources. Springer.
16- Kuo, J.-T., Lung, W.-S., Yang, C.-P., Liu, W.-C., Yang, M.-D. & Tang, T.-S., (2006), "Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan", Environmental Modelling & Software, 21, 829-44.
17- Labadie, J. W., (2004), "Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review", Journal of water resources planning and management, 130, 93-111.
18- Lee, R. M., Biggs, T. W. & Fang, X., (2018), "Thermal and hydrodynamic changes under a warmer climate in a variably stratified hypereutrophic reservoir", Water, 10, 1284.
19- Liu, W.-C., Chen, W.-B. & Kimura, N., (2009), "Impact of phosphorus load reduction on water quality in a stratified reservoir-eutrophication modeling study", Environmental monitoring and assessment, 159, 393-406.
20- Oliveira, B., Bola, J., Quinteiro, P., Nadais, H. & Arroja, L., (2012), "Application of Qual2Kw model as a tool for water quality management: Cértima River as a case study", Environmental monitoring and assessment, 184, 6197-210.
21- 21- Ostfeld, A. & Salomons, S., (2005), "A hybrid genetic instance-based learning algorithm for CE-QUAL-W2 calibration", Journal of Hydrology, 310, 122-42.
22- Reynolds, C., (1992), "Dynamics, selection and composition of phytoplankton in relation to vertical structure in lakes", Ergeb Limnol, 35, 13-31.
23- Sharif, M. & Wardlaw, R., (2000), "Multireservoir systems optimization using genetic algorithms: case study", Journal of computing in civil engineering, 14, 255-63.
24- Shoaei, S. M., Arjmandi, S. A. & Mirbagheri, S. A., (2022), "Enhancing the CE-QUAL-W2 to model dissolved lead transport and transformation in dam reservoirs: a case study of Shahid Rajaei Dam reservoir, north part of Iran", Environmental Science and Pollution Research, 1-13.
25- Wurbs, R. A., (1993), "Reservoir-system simulation and optimization models", Journal of water resources planning and management, 119, 455-72.
26- Zhang, X., Yu, X. & Qin, H., (2016), "Optimal operation of multi-reservoir hydropower systems using enhanced comprehensive learning particle swarm optimization", Journal of Hydro-Environment Research, 10, 50-63.
27- Ziaie, R., Mohammadnezhad, B., Taheriyoun, M., Karimi, A. & Amiri, S., (2019), "Evaluation of Thermal Stratification and Eutrophication in Zayandeh Roud Dam Reservoir Using Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model", Journal of Environmental Engineering, 145, 05019001.

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]

نشریه علمی سد و نیروگاه برق آبی ایران
سال دهم / شماره سی و ششم / زمستان ۱۴۰۲

Journal of Iranian Dam and Hydroelectric Powerplant
10th Year/ No. 36/ March 2024

Analysis of Thermal Stratification of Karkheh Dam using Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model

Saghi Bagherzadeh[1]
Mahnaz Ghaeini-Hessaroeyeh[2]*
Kourosh Qaderi[3]

Abstract

Lakes and reservoirs are important sources of surface water that are used for various purposes such as drink, agriculture, industry and etc. One of the most important factors that affects the water quality of the reservoirs is the thermal stratification. Selecting suitable model appropriate with reservoirs physical conditions, collecting and measuring of required data are the most important steps in modeling and calibration. In this research, a simulation approach based on CE-QUAL-W2 qualitative models and the Water Cycle Algorithm (WCA) method have been used for qualitative modeling of Karkheh dam reservoir. In order to investigate the thermal stratification, CE-QUALW2 qualitative model has been used for simulating temperature during the period of years 2014 to 2015. Then, for calibration of parameters affecting temperature, a computer model based on WCA algorithm was developed. The efficiency of the model was investigated by statistical indicators such as correlation coefficient (R^2), Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Basic Error (MBE). The values of R^2 based on the WCA algorithm on 3 August, 26 August and 16 September (183, 206, and 227) were obtained 0.95, 0.95 and 0.99, respectively. Also, the RMSE and MBE values were equal to 1.87, 1.33 and 1.21 and -0.69, 0.84 and 0.68, respectively. It can be concluded that the WCA algorithm has a great accuracy in estimation of the parameters affecting temperature.

Keywords
CE-QUALW2 model, Calibration, Thermal Stratification, Water Cycle Algorithm

1. PhD Candidate of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.
2*. Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman. (Corresponding Author, E-mail: mghaeini@uk.ac.ir).
3. Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

Received: 2022/03/21 Accepted: 2024/01/15

[Downloaded from journal.hydropower.org.ir on 2026-11-17]