

کالیبراسیون اتوماتیک مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 در مدل‌سازی دمای آب مخزن سد کرخه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز PSO

مطهره سعادت پور^۲

عباس افشار^۲

حمیده کاظمی الموتی^۱

پذیرش ۹۰/۸/۱۴

آخرین اصلاحات دریافتی ۹۰/۸/۱۱

دریافت ۸۹/۱/۲۲

چکیده

در این مطالعه از الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تجمعی برای کالیبراسیون اتوماتیک پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی دما در مدل CE-QUAL-W2 استفاده شد. الگوریتم PSO به‌عنوان یک بهینه‌ساز تابع هدف فرایند اتوماتیک کالیبراسیون دما را بهینه می‌کند. تابع هدف در این مطالعه مجموع قدرمطلق خطا بین داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل شبیه‌ساز و داده‌های اندازه‌گیری شده از مخزن سد کرخه در نقاط کنترل و در طی روزهای پایش بود. با تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر در کالیبراسیون دما در این مطالعه، ضریب پوشش ابر، ضریب محو شدن نور در آب، ضریب جذب نور در سطح آب و ضرایب تجربی تابع سرعت باد AFW، BFW و CFW به‌عنوان پارامترهای مؤثر در کالیبراسیون دما مطرح هستند. در ادامه با استفاده از داده‌های مشاهداتی فرضی، کارایی مدل کالیبراسیون اتوماتیک CE-QUAL-W2 مورد بررسی قرار گرفت و درستی عملکرد آن تأیید شد. سپس مدل اتوماتیک کالیبراسیون دما به‌منظور کالیبراسیون دما در طی ۹۰ روز در مخزن کرخه با داده‌های میدانی به‌کار گرفته شد. نتایج نشان دهنده همگرایی بسیار مناسب داده‌های مشاهداتی و میدانی در طول دوره شبیه‌سازی بود.

واژه‌های کلیدی: CE-QUAL-W2، بهینه‌سازی ذرات تجمعی، بهینه‌سازی، کالیبراسیون، شبیه‌سازی کیفیت آب

Automatic Thermal Calibration of Two Dimensional CE-QUAL-W2 Model in Karkheh Reservoir Applying Particle Swarm Optimization Algorithm

Hamide Kazemi Alamooti¹

Abbas Afshar²

Motahareh Saadatpour³

(Received Apr. 11, 2010

Revised Nov. 2, 2011

Accepted Nov. 5, 2011)

Abstract

In this study, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has been used to calibrate CE-QUAL-W2 model as a water quality simulation model. PSO algorithm as an optimization technique is applied to optimize the objective function of automatic thermal calibration process. Sum of the absolute difference between simulated results and field data in monitoring stations in Karkheh Reservoir has been considered as an objective function. With sensitivity analyzing, the most significant parameters have the most influence on the temperature profile in Karkheh Reservoir have been identified. These parameters were wind sheltering coefficient (WSC), extinction coefficient for pure water (EXH2O), solar radiation absorbed in surface layer (BETA), and empirical coefficients of wind speed function (AFW, BFW, and BFW). The efficiency of the automatic calibration model (PSO-CE-QUAL-W2) has been evaluated with the hypothetical data in Karkheh reservoir. Then the evaluated model has been applied in vertical temperature calibration in Karkheh Reservoir during 90 days. The vertical temperature profiles of the model results agree closely with the set of field data.

Keywords: CE-QUAL-W2, Particle Swarm Optimization, Calibration, Water Quality Simulation.

1. M.Sc. of Environmental Eng., School of Civil Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran (Corresponding Author) (+98 21) 44008910 hamideh_kazemi@yahoo.com

2. Prof. of Civil Eng., School of Water Eng., Iran University of Science and Tech., Tehran

3. Ph.D. Candidate of Water Quality Management, School of Civil Eng., Iran University of Science and Technology, Tehran

۱- کارشناس ارشد مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران (نویسنده مسئول) ۴۴۰۰۸۹۱۰ (+۹۸ ۲۱) hamideh_kazemi@yahoo.com

۲- استاد دانشکده عمران، گروه مهندسی آب، دانشگاه علم و صنعت، تهران

۳- کاندیدای دکترای مدیریت کیفی منابع آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت، تهران

محاسباتی موجود در سال ۱۳۸۵ و به منظور سادگی، تنها پارامترهای ضریب پوشش ابر^{۱۳} ضریب محو شدن نور در آب^{۱۴} و ضریب جذب نور در سطح آب^{۱۵} به عنوان متغیرهای تصمیم در نظر گرفته شده است. در تحقیق انجام شده توسط کاظمی در سال ۱۳۸۹ مسئله حل شده توسط سعادت پور و افشار با الگوریتم بهینه‌سازی ذرات تجمعی^{۱۶} حل گردید. بر اساس نتایج حاصل، الگوریتم PSO در مقایسه با الگوریتم GA در تعداد تکرار کمتری به جواب بهینه دست یافت [۱۱].

ان‌جی^{۱۷} و پررا^{۱۸} در سال ۲۰۰۳ از الگوریتم GA برای کالیبراسیون مدل‌های کیفی آب استفاده کرده‌اند. الگوریتم GA در مطالعه مذکور برای بهینه‌کردن پارامترهای مدل در مدلسازی کیفیت آب به کار رفته است. با توجه به اینکه انتخاب عملگرهای الگوریتم GA به حساسیت پارامترهای مدل بستگی دارد، اهمیت عملگرهای الگوریتم GA بر بهینه‌سازی پارامترهای مدل در این مطالعه بررسی شده است. آزمایش‌های عددی برای کالیبراسیون پارامترهای حساس و غیرحساس کیفیت آب انجام شده و در نهایت بر مبنای آزمایش‌های عددی، مجموعه عملگرهای الگوریتم GA توانست پارامترهای مدل را به خوبی کالیبره کند [۱۲]. استفاده از الگوریتم GA به عنوان بهینه‌ساز در کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌سازی کیفیت یک بعدی و یکنواخت QUAL2K توسط گوکتاس^{۱۹} و آکسوی^{۲۰} در سال ۲۰۰۷ نیز گزارش شده است [۱۳]. ذاکرمشفق و همکاران در سال ۲۰۰۸ از الگوریتم PSO برای کالیبراسیون اتوماتیک مدل رواناب در حوزه آبریز گرگانرود در شمال ایران استفاده کرده‌اند. نتایج نشان‌دهنده کارایی بالای تکنیک مورد استفاده در کالیبراسیون مدل بوده است [۱۴].

الگوریتم PSO یک الگوریتم فراکاوشی بر پایه جمعیت و هوش جمعی است. مانند دیگر الگوریتم‌های فراکاوشی، هر فرد که در PSO ذره نامیده می‌شود، نشان‌دهنده یک راه‌حل برای مسئله مورد نظر است. از مزایای این روش تطابق‌پذیری، پاسخهای همگرا، نزدیکی، کیفیت و پایداری بالای پاسخها است [۱۵ و ۱۶].

در طی دهه‌های اخیر، عملکرد الگوریتم‌های فراکاوشی PSO و GA در مسائل مختلف مهندسی مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان از عملکرد مناسب این الگوریتم‌ها در بهینه‌سازی مسائل مهندسی دارد. از منظر الگوریتم‌های فراکاوشی، در برخی مسائل مهندسی، الگوریتم PSO در تعداد تکرار

کالیبراسیون مدل یکی از مهم‌ترین مراحل کار در کل فرایند مدلسازی است. کالیبراسیون، فرایندی برای تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای مدل است. در فرایند کالیبراسیون، پارامترهای مدل تغییر داده می‌شود تا سازگاری بهینه بین نتایج مدل و داده‌ها به دست آید. به دلیل عدم قطعیت موجود در بیان ریاضی سیستم، عدم توانایی در کنترل تجربیات محیط زیستی و عدم قطعیت در داده‌های موجود، فرایند کالیبراسیون عملی بسیار پیچیده است. در مدلسازی‌های قدیمی کیفیت آب، درستی مدل با کالیبراسیون به روش سعی و خطا به دست می‌آمد که معایب آن علاوه بر زمان‌بر بودن، ناکارایی، ذهنی بودن و قابلیت اطمینان پایین بود [۱-۵].

در دو دهه گذشته تلاش گسترده‌ای برای جایگزین کردن روش سعی و خطا در کالیبراسیون با روشهای جدید مبتنی بر رویکردهای نوین صورت گرفته است. گسترش و فراگیر شدن روشهای مبتنی بر الگوریتم‌های تکاملی و فراکاوشی، افق تازه‌ای در امر کالیبراسیون بهینه مدل‌ها به وجود آورده است. کوپر و همکاران^۱ در سال ۱۹۹۷ از روش بهینه‌سازی جامع برای شبیه‌سازی رواناب استفاده کردند [۶]. فاینلی و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۸ در زمینه کالیبراسیون با روش بهینه‌سازی مطالعات زیادی داشته‌اند [۷]. مولیگان^۳ و برون^۴ در سال ۱۹۹۸ در کالیبراسیون مدل کیفی سفره آب در منطقه ولفویل^۵ در نوآسکووتیا^۶ در کانادا از الگوریتم ژنتیک^۷ به عنوان بهینه‌ساز در فرایند اتوماتیک کالیبراسیون استفاده نموده‌اند [۸]. در سال ۱۹۹۸ شن^۸ و کوو^۹ با استفاده از مدل معکوس^{۱۰}، مدل تغذیه‌گرایی مصب رودخانه راپاناک^{۱۱} در غرب خلیج چسپیک^{۱۲} را کالیبره کردند. در تحقیق مذکور ۱۳ پارامتر کالیبره شده است. نتایج کالیبراسیون مدل تغذیه‌گرایی و اعتبارسنجی نشان داد که مدل معکوس، کارایی بالایی در کالیبراسیون مدل دارد [۹].

سعادت پور و افشار در سال ۱۳۸۵ با کمک تکنیک فراکاوشی GA، کالیبراسیون دما در مخزن کرخه را برای داده‌های مشاهداتی فرضی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰ روزه انجام داده‌اند [۱۰]. با توجه به زمان اجرای بالای مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2 با ابزارهای

1 Cooper et al.
2 Finley et al.
3 Mulligan
4 Brown
5 Wolfville
6 Nova Scotia
7 Genetic Algorithms (GA)
8 Shen
9 Kuo
10 Inverse Model
11 Rappahannock
12 Chesapeake

13 Wind Sheltering Coefficient (WSC)

14 Light Extinction Coefficient (EXH 20)

15 Light Absorptions (Beta)

16 Particle Swarm Optimization (PSO)

17 Ng.A.W.M

18 Perera

19 Goktas

20 Aksoy

کمتری نسبت به GA به جواب بهینه دست می‌یابد [۱۷-۲۰]. با بررسی‌های عمیق‌تر توسط حسن و همکاران در سال ۲۰۰۴، این نتیجه حاصل گردید که تفاوت تکرارهای محاسباتی میان الگوریتم‌های فراکاشی PSO و GA متأثر از ماهیت مسائل است [۱۷].

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم PSO، نسخه ۳/۲ مدل کیفی بزرگ مقیاس CE-QAUL-W2 که به منظور شبیه‌سازی دما در مخزن سد کرخه در ایران استفاده شده، به صورت اتوماتیک کالیبره شد. با توجه به زمان بر بودن کالیبراسیون دستی به نظر می‌رسد که کالیبراسیون خودکار می‌تواند روش بسیار مفیدی باشد.

۲- روش تحقیق

۱-۲- توسعه مدل

مدل ارائه شده در این تحقیق به کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌ساز با کمک الگوریتم فراکاشی پرداخت. CE-QUAL-W2 به عنوان مدل شبیه‌ساز و الگوریتم PSO به عنوان ابزار بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. به منظور بررسی عملکرد تکنیک پیشنهادی، کالیبراسیون پروفیل دما در سد مخزنی کرخه در ایران با این رویکرد انجام شد.

۱-۱-۲- مدل بهینه‌ساز

الگوریتم PSO یک الگوریتم تکاملی بر پایه جمعیت است. همانند بسیاری از الگوریتم‌های فراکاشی، الگوریتم PSO با ایجاد یک جمعیت تصادفی از افراد شروع می‌شود که در اینجا به عنوان یک Swarm از Particles (ذرات) خوانده می‌شود. مانند آنچه که در همه الگوریتم‌های تکاملی وجود دارد، هر ذره (Particle) در Swarm مجموعه مختلف از پارامترهای نامشخص است که باید مقادیر بهینه آنها تعیین شود و در واقع هر ذره یک نقطه از فضای راه‌حل را ارائه می‌دهد. همانند سایر الگوریتم‌های تکاملی، این پارامترها می‌توانند بسته به شرایط مسئله، به صورت مقادیر حقیقی و یا به صورت باینری تعریف شوند. از مزایای این روش تطابق پذیری، پاسخهای همگرا، نزدیکی، کیفیت و پایداری بالای پاسخها است [۱۶].

اساس الگوریتم، جستجوی فضای راه‌حلها به یک روش مناسب است که توسط حرکت گله‌ای ذرات به سوی بهترین موقعیتی که در گذشته با آن روبرو شده‌اند با این امید که در این فرایند به یک موقعیت بهتری برسند. صورت می‌گیرد و سرانجام همه ذرات در نقطه بهینه همگرا می‌شوند.

در الگوریتم PSO، هر عضو از جمعیت دارای یک سرعت انطباقی (تغییر مکان) است که مطابق با آن در فضای جستجو

حرکت می‌کند. علاوه بر آن هر کدام از آنها دارای حافظه نیز هستند، یعنی بهترین موقعیتی که در فضای جستجو به آن می‌رسند را به خاطر می‌سپارند. بنابراین حرکت هر عضو در دو جهت صورت می‌گیرد: ۱- به سوی بهترین موقعیتی که ملاقات کرده‌اند و ۲- به سوی بهترین موقعیتی که بهترین عضو در همسایگی آنها ملاقات کرده است.

اولین مرحله در بهینه‌سازی به کمک الگوریتم PSO، تولید تصادفی ذرات است. این ذرات هر کدام دارای بردار موقعیت و سرعت هستند. برای ارزیابی کارایی هر ذره، مقدار برازندگی آن باید تعیین شود. این برازندگی به کمک تابع هدف مشخص می‌شود [۱۶]. تابع هدفی که در این تحقیق به کار گرفته شد، مجموع قدرمطلق خطاها در نقاط پایش در مخزن بود. در مرحله بعد با توجه به بهترین موقعیتی که هر ذره تاکنون به دست آورده است و همچنین بهترین موقعیتی که توسط کل جمعیت تعیین شده است، سرعت ذرات به روز می‌شوند (رابطه ۱).

$$V_i(t) = w \cdot V_i(t-1) + c_1 \times r_1(t) \times (pbest_i - x_i(t)) + c_2 \times r_2(t) \times (gbest - x_i(t)) \quad (1)$$

که در این رابطه

V سرعت ذره، x موقعیت هر ذره، c_1 و c_2 ضرایب ثابت شتاب هستند و با کمک آنالیز حساسیت به دست می‌آیند [۲۱]. در این تحقیق مقدار این ضرایب ۰/۵ انتخاب شد. r_1 و r_2 مقادیر تصادفی، $pbest$ بهترین موقعیتی که هر ذره تاکنون به دست آورده است، $gbest$ بهترین موقعیتی که توسط کل جمعیت تعیین شده است و w وزن اینرسی^۱ است که از رابطه ۳ به دست می‌آید

$$x_i(t) = x_i(t-1) + V_i(t) \quad (2)$$

Inertiaweight

$$w = (w_1 - w_2) \frac{\max \text{iter} - \text{iter}}{\max \text{iter}} + w_2 \quad (3)$$

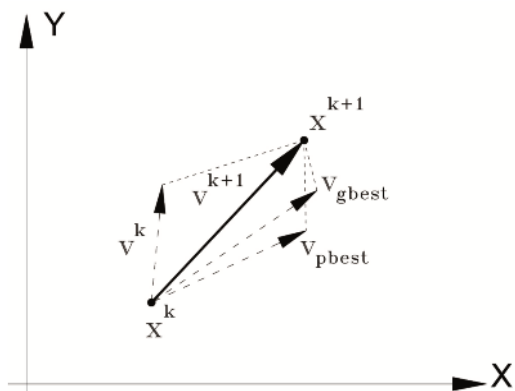
که در این روابط

w_1 ، w_2 مقادیر حداقل و حداکثر اینرسی وزنی هستند که با تحلیل حساسیت مقادیر آنها به دست می‌آید که در این تحقیق مقادیر آنها به ترتیب ۰/۴ و ۰/۹ انتخاب شد.

وقتی که در فرایند جستجو، $gbest$ جدیدی پیدا می‌شود، اگر از گونه الگوریتم PSO با همسایگی فراگیر استفاده شود، همه ذرات شروع به حرکت به سوی $gbest$ جدید می‌کنند و فضای جستجو با پیدا شدن $pbest$ های جدید در آن، شروع به کاهش یافتن می‌کند. زمانی که همه ذرات موجود در Swarm، به $gbest$ همگرا شدند، جواب بهینه‌ای که توسط الگوریتم یافته شده، موقعیت $gbest$ است.

¹ Inertia weight

تغییر موقعیت یک ذره در دو بعد، به طور نمایشی در شکل ۱ نشان داده شده است [۲۱].



X^k موقعیت کنونی ذره، X^{k+1} موقعیت اصلاح شده ذره در مرحله بعد، V^k سرعت کنونی ذره، V^{k+1} سرعت اصلاح شده ذره در مرحله بعد، V_{pbest} سرعت ذره ناشی از $pbest$ ، V_{gbest} سرعت ذره ناشی از $gbest$

شکل ۱- تغییر موقعیت ذرات

۲-۱-۲- مدل شبیه‌ساز CE-QAUL-W2

در این مطالعه از مدل شبیه‌ساز CE-QAUL-W2 (Ver3.2) برای شبیه‌سازی مخزن سد کرخه استفاده شد. مدل شبیه‌سازی CE-QAUL-W2 یک مدل دوبعدی (طولی - عرضی) است که برای شبیه‌سازی هیدرودینامیک و کیفیت آب استفاده می‌شود. استفاده از این مدل به دانش هیدرودینامیکی، روشهای عددی، شیمی و بیولوژی حوزه، کامپیوتر و فرترن و آمار نیاز دارد. از توانایی‌های مدل می‌توان به مدلسازی هیدرودینامیکی، کیفیت آب، شبیه‌سازی برای دوره‌های طولانی، بدنه‌های آبی چندشاخه، مدل‌هایی که شامل چندین ورودی و خروجی هستند، محاسبات مربوط به پوشش یخ و شرایط مرزی که با زمان تغییر می‌کنند اشاره کرد. مدل اولیه CE-QAUL-W2 در سال ۱۹۷۵ به نام LARM در مخزنی بدون شاخه به کار رفت. از آن سال تا به امروز مدل CE-QAUL-W2 به صورت مرتب به روز شده و در موارد بسیاری از جمله رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن، مصب‌ها و ترکیبی از این پیکره‌های آبی به کار رفته است [۲۲].

۳-۱-۲- تابع هدف

تابع هدف مورد استفاده در این مطالعه کمینه کردن مجموع مطلق خطا^۱ بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی بود (رابطه ۴).

$$\text{SumAbsError} = \sum_{i=1}^{Mn} \sum_{j=1}^M \sum_{l=1}^N \text{Abs}(\text{Obs}^t_{ij} - \text{ModelRes}^t_{ij}) \quad (4)$$

^۱ Sum Absolute Error (SAE)

که در این رابطه

Obs^t_{ij} و ModelRes^t_{ij} دمای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در نقطه پایش j و لایه i در زمان t هستند. N تعداد داده‌های مشاهداتی در عمق و در نقطه کنترل (محل پایش)، M تعداد محل‌های پایش در مخزن و Mn تعداد روزهای پایش است که از قبل تعیین شده‌اند. در واقع هدف، کاهش اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است که با انتخاب مناسب پارامترهای کالیبراسیون می‌توان به آن دست یافت.

۲-۱-۴- متغیرهای تصمیم

متغیرهای زیادی بر مدلسازی پارامتر دما تأثیر دارند که از جمله ضریب ویسکوزیته طولی^۲، ضریب دیفیوژن طولی^۳، ضریب مانینگ یا سزی^۴، ضریب محو شدن نور در آب، ضریب جذب نور در سطح آب و ضریب پوشش باد را می‌توان نام برد. همچنین تبخیر از عوامل مؤثر در معادلات تبادل گرمایی در مدل CE-QAUL-W2 است [۲۲]. در محاسبه تبخیر، این امکان به کاربر داده می‌شود که رابطه محاسبه تبخیر را انتخاب نماید. در صورت انتخاب رابطه ادینجر و همکاران^۵ (رابطه ۵) در محاسبه تبخیر، ضرایب تجربی تابع سرعت باد AFW ، CFW و BFW نیز در مدلسازی پروفیل دما در مخزن مؤثر هستند (جدول ۱). رابطه رایان هارلمن^۶ نیز در محاسبه تبخیر در معادلات مدل CE-QAUL-W2 گنجانده شده است. در این تحقیق از رابطه ادینجر و همکاران استفاده شد [۲۲]

$$f(W) = a + b W^c \quad (5)$$

که در این رابطه

a (AFW)، b (BFW)، c (CFW)، ضرایب تجربی تابع سرعت باد و W سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین است. به منظور در نظر گرفتن قید بازه متغیرهای تصمیم، تولید این متغیرها توسط الگوریتم PSO بر اساس دامنه تعریف شده در جدول ۱ صورت می‌گیرد. در مطالعات انجام شده به دلیل عدم مدلسازی پارامترهای کیفی، تأثیر کدورت ناشی از فعالیتهای زیستی در نظر گرفته نشد. اما باید به این نکته توجه داشت که در این مطالعه تأثیر کدورت ناشی از فعالیتهای زیستی در مقایسه با سایر پارامترها مانند دمای آب ورودی و خروجی، پارامترهای هواشناسی نظیر سرعت باد، دمای هوا و غیره کمتر بود و مدلسازی پارامترهای کیفی در این مطالعه، تأثیر قابل توجهی بر پروفیل دمای مخزن نداشت.

^۲ Longitudinal Eddy Viscosity (AX)
^۳ Longitudinal Eddy Diffusivity (DX)
^۴ CHEZY (FRICT)
^۵ Edinger et al.
^۶ Ryan Harleman

جدول ۱- ضرایب مؤثر در کالیبراسیون دما [۲۲]

ضرایب	پیش فرض برنامه	دامنه ضرایب استفاده شده در مطالعه	میزان تغییرات (بیشینه / کمینه) به ازای تغییر ۱۵٪ نسبت به مقادیر کالیبره شده
ویسکوزیته طولی (AX)	$1 \text{ m}^2/\text{s}$	-	-۰/۰۲ - ۰/۰۳
دیفیوژن طولی (DX)	$1 \text{ m}^2/\text{s}$	-	-۰/۰۷ - ۰/۰۶
مانینگ یا سزی (FRICT)	$70 \text{ m}^2/\text{s}$	-	-۰/۱۵ - ۰/۱۲*
ضریب پوشش باد (WSC)	پارامتر کالیبراسیون	۰/۷ - ۱	-۰/۳۵ - ۰/۱
جذب نور در سطح آب (BETA)	۰/۴۵	۰/۳ - ۰/۵	-۰/۰۸ - ۰/۱
محو شدن نور در آب (EXH2O)	۰/۴۵ 1/m	۰/۲ - ۰/۵	-۰/۰۵ - ۰/۱۲
ضریب محو شدن نور در آب در اثر مواد غیر آلی (EXINOR)	۰/۰۱ 1/m	-	-۰/۲ - ۰/۱۵**
ضریب محو شدن نور در آب در اثر مواد آلی (EXORG)	۰/۲ 1/m	-	-۰/۰۱ - ۰/۰۵**
ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (AFW)	۹/۲	۸ - ۱۰	-۰/۳۴ - ۰/۶
ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (BFW)	۰/۴۶	۰/۳۵ - ۰/۵۵	-۰/۴۲ - ۰/۵۳
ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (CFW)	۲	۱ - ۳	-۲/۵ - ۴/۶

* به دلیل تأثیر بر کالیبراسیون تراز سطح آب مخزن، این فاکتور ثابت در نظر گرفته شد و در فرایند کالیبراسیون اتوماتیک دما منظور نشد.
** در صورت فعال شدن گزینه شبیه سازی کیفی، این پارامترها در محاسبات وارد می شوند.

شبیه سازی نمود. در مرحله بعد با مقایسه نتایج به دست آمده از مدل شبیه سازی دما در مخزن و بررسی توابع هدف، الگوریتم PSO متغیرهای تصمیم جدیدی را بر اساس روابط ۱ تا ۳ تولید کرد. این مقادیر به عنوان داده های ورودی به CE-QAUL-W2 وارد می شوند. این روند همچنان ادامه می یابد تا جواب به مقدار بهینه همگرا شود (شکل ۲).

۳- نتایج و بحث

۳-۱- کاربرد مدل بهینه ساز - شبیه ساز در مخزن سد کرخه

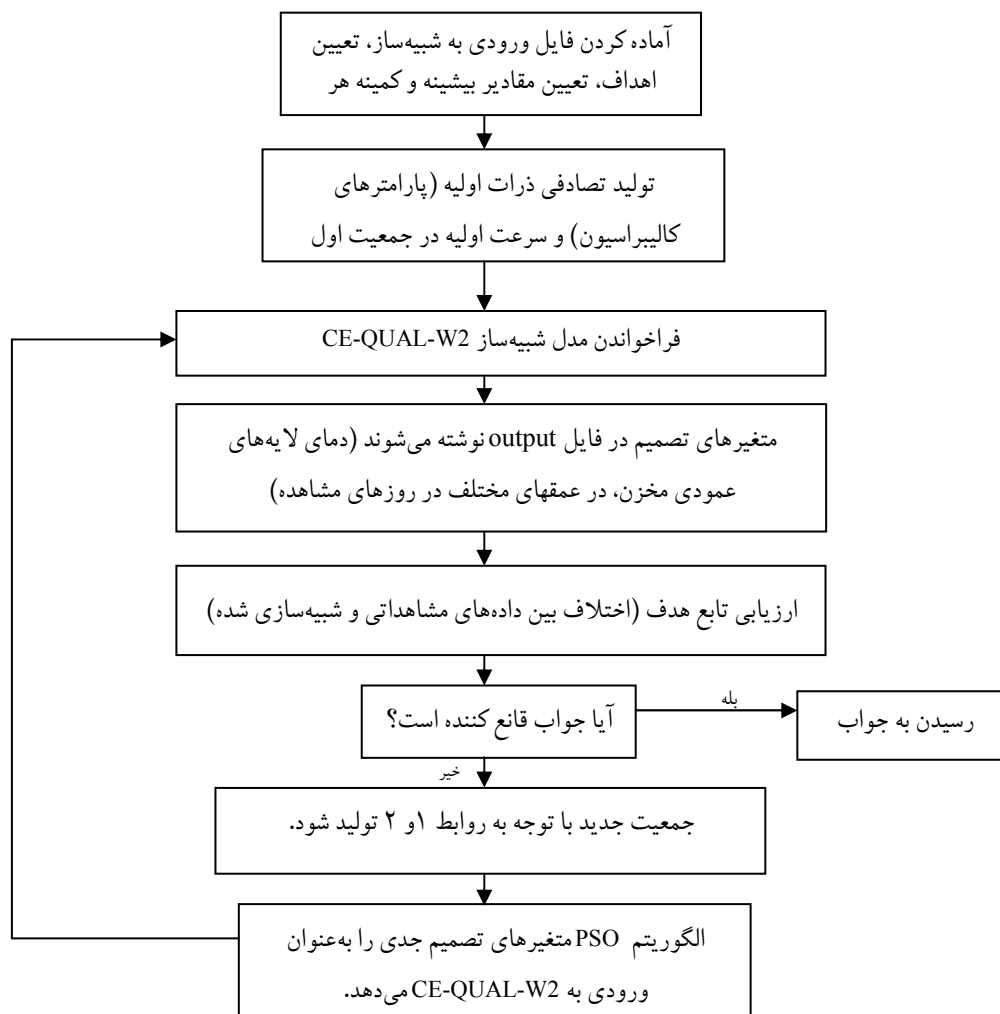
مخزن مورد نظر در این تحقیق، مخزن سد کرخه بود. کالیبراسیون مدل CE-QAUL-W2 در سه مرحله انجام شد. مرحله اول، کالیبراسیون سطح آب و هندسه مخزن بود. مرحله دوم، کالیبراسیون هیدرودینامیکی و دمای مخزن و مرحله سوم کالیبراسیون کیفیت آب بود.

مخزن کرخه به طول ۶۴ کیلومتر و حجم حدود ۵ میلیارد متر مکعب در تراز نرمال ۲۲۰ متر از سطح دریا در موقعیت عرض و طول جغرافیایی $32^{\circ} 45'$ و $48^{\circ} 15'$ قرار گرفته است. به منظور شبیه سازی مخزن کرخه در نرم افزار CE-QAUL-W2، شبکه هندسی از کیلومتر صفر تا کیلومتر ۶۶ تعریف شد. مشخصات این شبکه هندسی در جدول ۲ ارائه شده است.

بر اساس تحلیل حساسیت های انجام شده، پارامترهای ضریب محو شدن نور در آب، ضریب جذب نور در سطح آب و ضریب پوشش باد و ضرایب تجربی تابع سرعت باد (در صورت انتخاب رابطه ادینجر و همکاران)، AFW، BFW و CFW تأثیر بالاتری در پروفیل دما در مخزن دارند. اگرچه ضریب سایش کف (ضریب سزی) از جمله پارامترهای مؤثر در کالیبراسیون پروفیل دمای مخزن است اما به دلیل متأثر ساختن کالیبراسیون تراز سطح آب مخزن (کالیبراسیون هندسه و تراز سطح آب مخزن در گام اول تحقیق انجام گردید)، از آن صرف نظر گردیده و به عنوان متغیر تصمیم در کالیبراسیون اتوماتیک پروفیل دمای مخزن منظور نگردید [۱]. در روش پیشنهادی برای کالیبراسیون اتوماتیک پروفیل دما در مخزن کرخه، پارامترهای برشمرده اخیر به عنوان متغیرهای تصمیم انتخاب شدند.

۲-۱-۵- مدل شبیه سازی - بهینه سازی

مدل شبیه ساز CE-QAUL-W2 مدل پیچیده ای است و کالیبراسیون آن عملی زمان بر است. در این تحقیق از الگوریتم بهینه سازی PSO برای کاهش زمان کالیبراسیون استفاده شد. مدل شبیه سازی دما در مخزن، در مرحله اول با متغیرهای تصمیمی که PSO به صورت تصادفی تولید کرده است، دمای آب در مخزن مورد نظر را



شکل ۲- فلوچارت کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2

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

عرض بخشها	ضخامت لایه	طول قسمتها	تعداد لایه‌ها	تعداد بخشها	تعداد بازه‌ها	تعداد پیکره آبی
۲۶-۲۶۷۳ متر	۲-۳ متر	۱۰۰۰	۵۵	۶۶	۱	۱

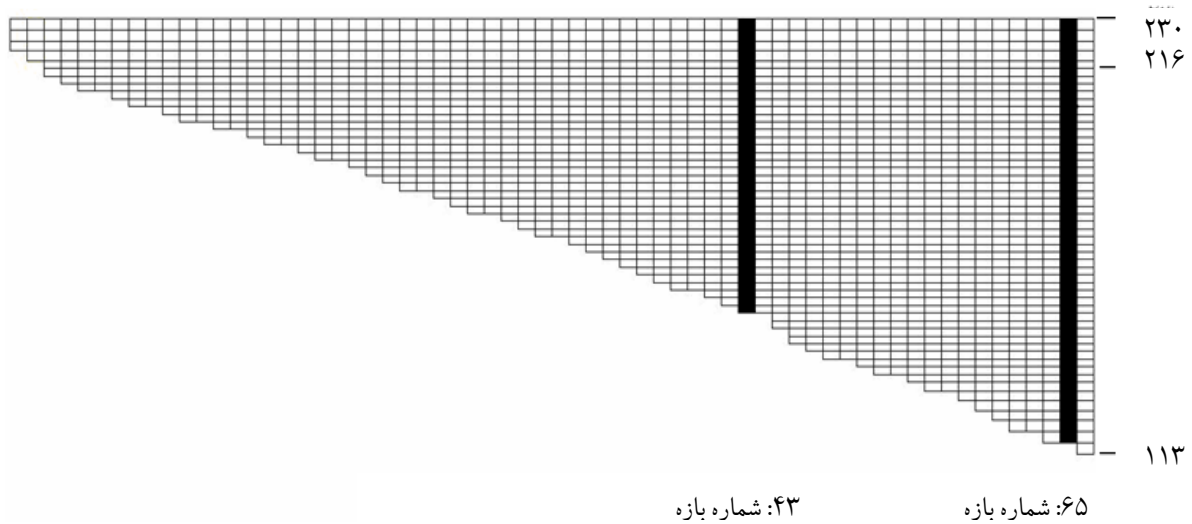
شده است. مقایسه دما در لایه‌های این بخشها به فواصل ۱ متری صورت گرفت.

در این مطالعه از نتایج کالیبراسیون سطح آب و هندسه مخزن مطالعه صورت گرفته توسط افشار و سعادت‌پور در سال ۱۳۸۸ استفاده شد که نتایج آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود و تنها کالیبراسیون پروفیل عمودی دما در مخزن کرخه به صورت اتوماتیک انجام گرفت [۱]. به منظور ارزیابی تکنیک پیشنهادی، در گام اول داده‌های مشاهداتی فرضی بر اساس اجرای یک بار مدل

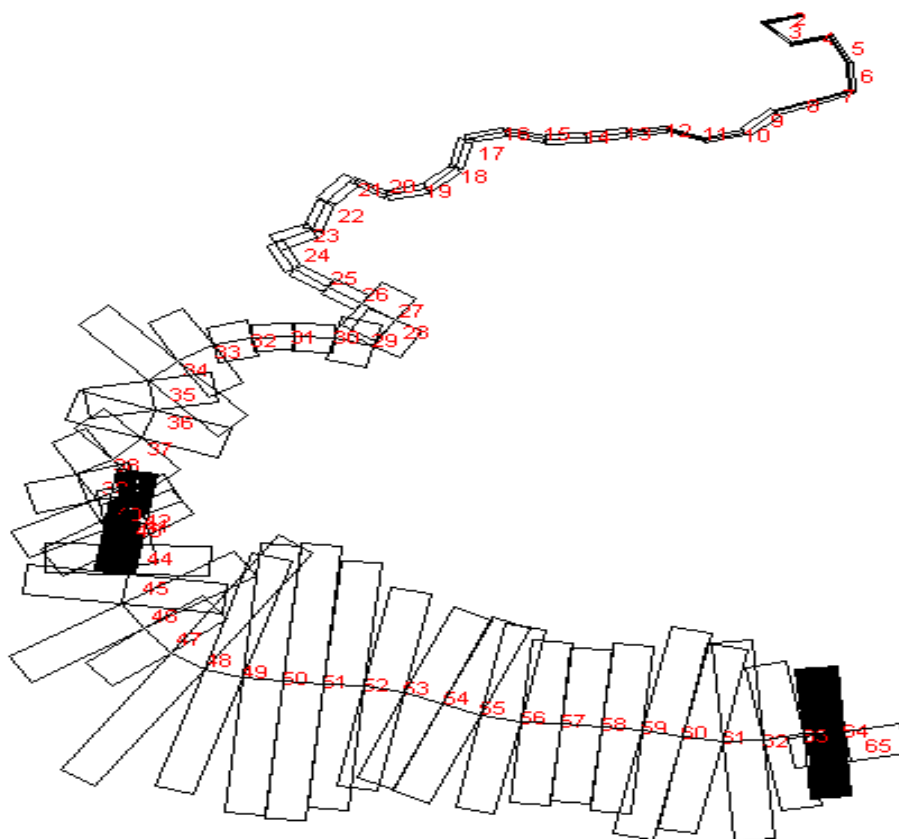
جزئیات بیشتر در خصوص نحوه آماده کردن مدل، داده‌های مورد استفاده در مدلسازی، شرایط اولیه و مرزی در تحقیق انجام شده توسط افشار و سعادت‌پور ۱۳۸۸ ارائه شده است [۱]. در گام اول، ارزیابی مدل اتوماتیک کالیبراسیون دما در مخزن کرخه با یک سری داده‌های فرضی انجام گرفت. در این مرحله، کالیبراسیون پروفیل دما در مخزن کرخه به صورت اتوماتیک بر اساس داده‌های واقع در بخش ۶۵ یعنی نقطه انتهایی مخزن و ۴۳ صورت گرفت. دو نمای مختلف از مخزن سد کرخه در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده

شد. نتایج به دست آمده نشان دهنده تطابق رضایت بخش نتایج حاصل از کالیبراسیون اتوماتیک دما با داده های مشاهداتی فرضی بود. استفاده از داده های مشاهداتی فرضی در مسئله مورد نظر، تنها به منظور کنترل رویکرد پیشنهادی در کالیبراسیون

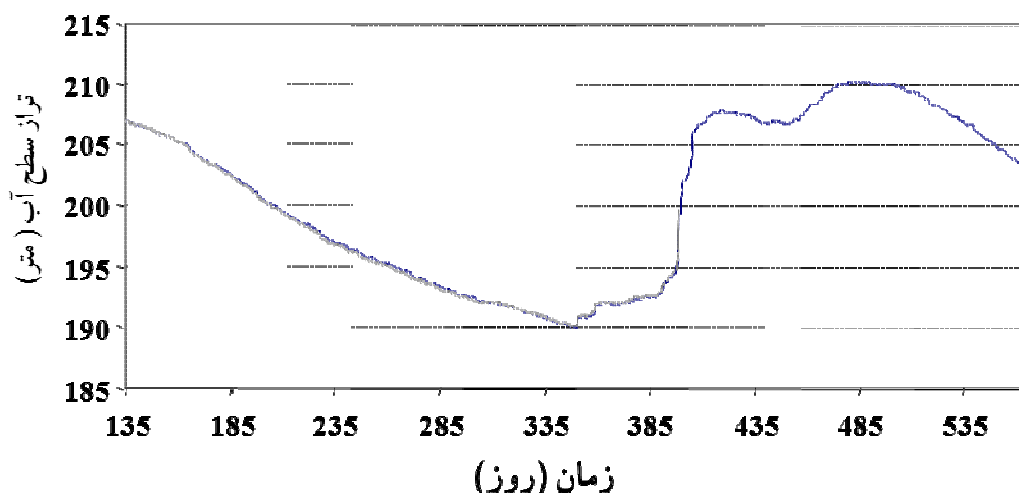
شبیه سازی دو بعدی CE-QUAL-W2 با استفاده از مقادیر پیش فرض مدل یعنی پارامترهای مؤثر بر شبیه سازی دما در مخزن، ایجاد گردید. سپس از تکنیک پیشنهادی به منظور کالیبراسیون مدل شبیه سازی دما در مخزن کرخه با داده های مشاهداتی فرضی استفاده



شکل ۳- نمای عمودی از مخزن سد کرخه (مقاطع ۴۳ و ۶۵ به ترتیب از چپ به راست، تراز لایه ها متر از سطح دریا)



شکل ۴- موقیت بخش ۴۳ و ۶۵ در پروفیل طولی مخزن سد کرخه



شکل ۵- مقایسه داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تراز سطح آب در مخزن سد کرخه [۱]

همانند سایر الگوریتم‌های فراکاوشی، برخی از پارامترهای الگوریتم PSO نیز باید تعیین گردد. پارامترهایی چون کمینه و بیشینه ایترسی وزنی، ضرایب شتاب، تعداد ذرات و تعداد تکرار از جمله این پارامترها هستند. در این مطالعه، تعیین این پارامترها با بررسی و ارزیابی ترکیبهای مختلفی از این ضرایب و همچنین رجوع به مطالعات گذشته صورت گرفت.

تابع هدف در این تحقیق کمینه نمودن مجموع قدرمطلق خطاها در نقاط پایش و در لایه‌های مختلف و در روزهای پایش بود. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد، تکنیک پیشنهادی در این پژوهش در کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌سازی دما برای مخزن کرخه در طی سه ماه برای داده‌های میدانی واقعی مورد امتحان قرار گرفت. داده‌های میدانی مورد استفاده در این تحقیق، از مطالعات و برنامه پایش کیفی مخزن کرخه توسط شرکت آب و توسعه منابع آب ایران تهیه شد. داده‌های میدانی پروفیل دما در دو نقطه از مخزن کرخه یعنی بازه میانی مخزن و بازه آبگیر مخزن، در لایه‌های مختلف در عمق مخزن مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این ارزیابی در جدول ۳ و شکل‌های ۶ تا ۸ ارائه شده است.

جدول ۳- پارامترهای کالیبره شده، نتایج حاصل از کالیبراسیون اتوماتیک

نتایج	ضرایب
۰/۸۶	ضریب پوشش باد در اولین روز شبیه‌سازی
۰/۹۴	ضریب پوشش باد در روز آخر شبیه‌سازی
۰/۵	ضریب جذب اشعه خورشید در سطح آب
۰/۴	ضریب محو نور در آب
۹/۲۸	ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (AFW)
۰/۵۹	ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (BFW)
۲/۲۷	ضریب تجربی، رابطه تبخیر ادینجر (CFW)

مدل CE-QUAL-W2 بود. لذا در گام بعد، کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌سازی دما برای داده‌های میدانی در طول سه ماه انجام شد. نتایج حاصل در این بخش نیز از مطلوبیت نسبی برخوردار بود. کامپیوتر مورد استفاده در این تحقیق دارای مشخصات Pentium4، حافظه جانبی 3GB و دو هسته‌ای بود. زمان مورد نیاز برای هر اجرای مدل شبیه‌سازی - بهینه‌سازی حدود ۴ ثانیه بود.

۳-۲- نتایج اجرای کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌سازی دما در مخزن کرخه

پارامترهای مؤثر در فرایند دما در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. ضریب ویسکوزیته و ثابت شزی و ضریب پوشش ابر به‌طور مستقیم بر هیدرودینامیک تأثیر دارند که هیدرودینامیک نیز به‌صورت مستقیم بر دما و انتقال حرارت اثر می‌گذارد. دیگر ضرایب نیز به‌طور مستقیم بر دما و هیدرودینامیک مخزن اثر دارند. با تحلیل حساسیت‌های انجام شده در مطالعات پیشین مخزن کرخه، مشخص شده است که ضرایب WSC، EXH2O، BETA، AFW، BFW و CFW بیشترین تأثیر را در کالیبراسیون دما دارا هستند [۱]. بنابراین در این مطالعه نیز بر این پارامترها تأکید شد.

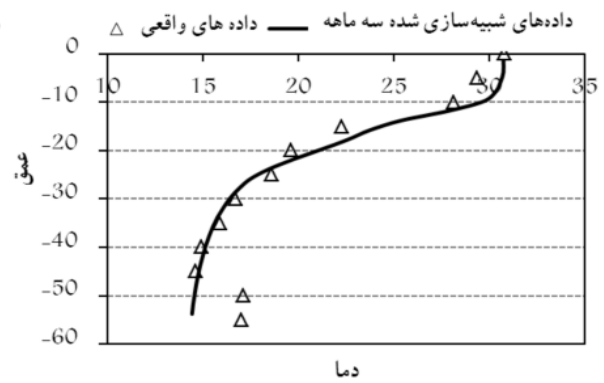
در طی هر فراخوان CE-QUAL-W2 توسط PSO، مدل بهینه‌ساز مجموعه‌ای از پارامترها (متغیرهای تصمیم) را در اختیار مدل شبیه‌ساز قرار می‌دهد. CE-QUAL-W2 نتایج شبیه‌سازی را در فایل خروجی نوشته و سپس تابع هدف محاسبه می‌شود. اگر معیار توقف فراهم گردد، اجرای فرایند پایان می‌یابد، در غیر این صورت بهینه‌ساز بار دیگر مجموعه‌ای از پارامترها را در اختیار شبیه‌ساز قرار می‌دهد و این فرایند بارها تکرار می‌گردد. فرایند کالیبراسیون اتوماتیک مدل شبیه‌ساز دما در مخزن کرخه با استفاده از الگوریتم فراکاوشی PSO با ۳۰ ذره در ۴۰ تکرار انجام گردید.

در جدول ۴ میانگین خطای مطلق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به دست آمده توسط دو کالیبراسیون اتوماتیک و مبتنی بر سعی و خطا نشان داده شده است [۱].
 نتایج ارائه شده در جدول ۴ نشان‌دهنده کارایی مناسب روش مبتنی بر کالیبراسیون اتوماتیک نسبت به روش دستی است [۱]. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج کالیبراسیون اتوماتیک در اکثر موارد بسیار بهتر از کالیبراسیون دستی بود و نتایج در زمان

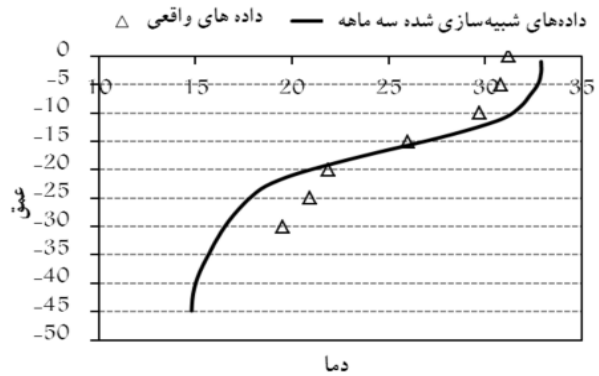
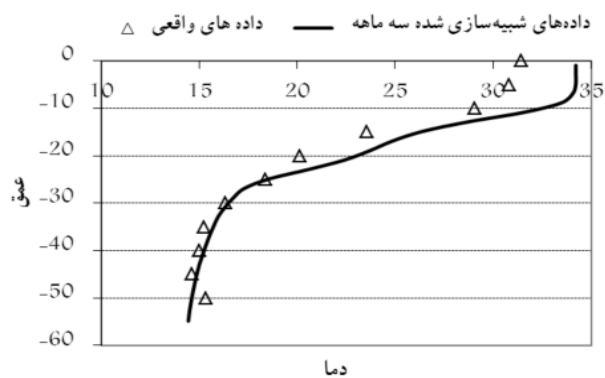
کوتاه‌تری حاصل گردید.
 در این مطالعه کالیبراسیون دما در ماه‌های گرم سال انجام شد. دوره شبیه‌سازی از ماه خرداد شروع شده و تا اواخر مرداد ادامه داشت. همان‌طور که در شکل‌های ۶ تا ۸ مشاهده می‌شود، پدیده لایه‌بندی حرارتی در مخزن سد کرخه به شدت وجود دارد. همچنین این پدیده در فصل‌های گرم سال در مخزن کرخه رخ داده و باعث نامناسب شدن کیفیت آب می‌گردد.

جدول ۴- میانگین خطای مطلق داده‌های مشاهداتی و نتایج شبیه‌سازی

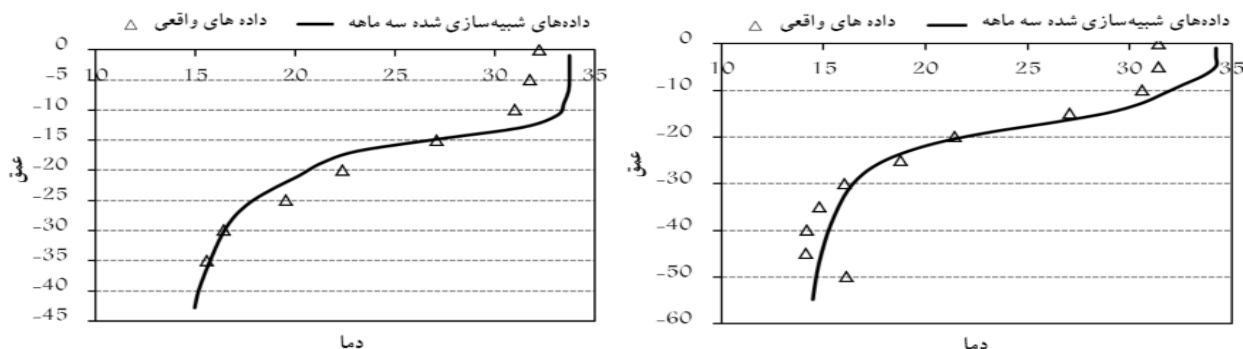
خطای مطلق میانگین در بخش ۶۵		خطای مطلق میانگین در بخش ۴۳		روزهای پایش (روز میلادی)
کالیبراسیون دستی	کالیبراسیون اتوماتیک	کالیبراسیون دستی	کالیبراسیون اتوماتیک	
۱/۲۳	۱/۰۷	۱/۰۴	۱/۱۹	۱۸۳
۲/۴۴	۱/۶	۲/۶۷	۱/۹	۲۰۶
۱/۱۵	۱/۲	۱/۷۵	۱/۴۶	۲۲۷



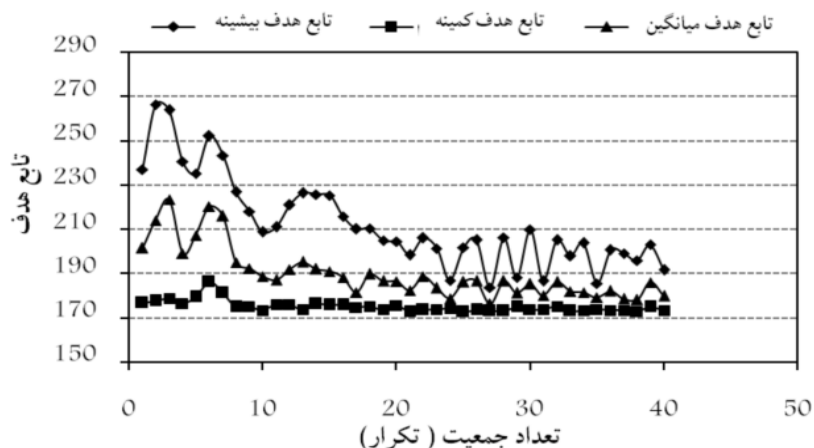
شکل ۶- کالیبراسیون دما با استفاده از داده‌های واقعی مخزن کرخه در روز ۱۸۳ از چپ به راست در مقاطع ۴۳ و ۶۵



شکل ۷- کالیبراسیون دما با استفاده از داده‌های واقعی مخزن کرخه در روز ۲۰۶ از چپ به راست در مقاطع ۴۳ و ۶۵



شکل ۸- کالیبراسیون دما با استفاده از داده‌های واقعی مخزن کرخه در روز ۲۲۷ از چپ به راست در مقاطع ۴۳ و ۶۵



شکل ۹- بیشینه، متوسط و کمینه تابع هدف در کالیبراسیون اتوماتیک پروفیل دما با داده‌های واقعی در مخزن کرخه

گرفته شد. در این مطالعه فرایند کالیبراسیون که شامل انتخاب پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی رفتار سیستم است به صورت اتوماتیک انجام گردید. به منظور کالیبراسیون اتوماتیک پارامترهای مدل شبیه‌سازی دو بعدی CE-QUAL-W2 از الگوریتم بهینه‌سازی مخزن PSO استفاده گردید. پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی دما در مخزن با استفاده از آنالیز حساسیت مشخص شده‌اند که شامل پارامترهای ضریب محو شدن نور در آب، ضریب جذب نور در سطح آب، ضریب پوشش باد و ضرایب تجربی مؤثر در رابطه تخریب آلاینده‌ها (AFW، BFW و CFW) در طی دوران شبیه‌سازی هستند. فرایند کالیبراسیون اتوماتیک ابتدا برای یک سری داده‌های فرضی با استفاده از مجموعه‌ای از پارامترهای انتخابی ورودی مدل، به عنوان داده‌های واقعی انجام شد تا کارایی مدل، مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسب داده‌های فرضی مشاهده‌ای و نتایج حاصل از شبیه‌سازی بود. سپس مدل اتوماتیک کالیبراسیون برای یک مسئله واقعی در مخزن سد کرخه مورد استفاده قرار گرفت. همچنین پارامترهای مؤثر در الگوریتم بهینه‌سازی شامل c_1 و c_2 ضرایب شتاب و w_1 و w_2 مقادیر حداقل و حداکثر اینرسی وزنی نیز با آنالیز حساسیت انتخاب گردیدند. نتایج نشان‌دهنده همگرایی

مقادیر بیشینه، متوسط و کمینه تابع هدف در طی چندین اجرای مدل اتوماتیک کالیبراسیون CE-QUAL-W2 در شکل ۹ ارائه شده است. مدل ترکیبی بهینه‌ساز- شبیه‌ساز امکان استفاده از فواید هر دو رویکرد را فراهم نمود و باعث افزایش دقت محاسبات و همچنین افزایش سرعت عملیات شد. بر اساس نتایج، همگرایی بسیار مطلوبی بین داده‌های مشاهده‌ای فرضی با نتایج مدل و همچنین داده‌های مشاهده‌ای میدانی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی حاصل گردید. در فرایند اتوماتیک کالیبراسیون، انتخاب پارامترها به گونه‌ای هوشمندانه بر اساس مقدار تابع هدف صورت می‌گیرد. مقدار تابع هدف در هر دو مسئله در نقاط پایش و در طی روزهای پایش (۱۸۳، ۲۰۶ و ۲۲۷) مورد محاسبه قرار گرفت.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور کالیبراسیون مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 از الگوریتم فراکاوشی PSO استفاده شد. مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 (مدل دو بعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب) به منظور شبیه‌سازی پروفیل دما در مخزن کرخه به کار

بسیار مناسب نتایج مدل به داده‌های واقعی و عملکرد مطلوب
 رویکرد اتوماتیک کالیبراسیون بود. در این تحقیق، کالیبراسیون
 پروفیل دما در مخزن کرخه با رویکرد پیشنهادی به انجام رسید.
۵- پیشنهاد
 در ادامه کار، کالیبراسیون اتوماتیک شبیه‌ساز دو بعدی
 هیدرودینامیک و کیفیت آب CE-QUAL-W2 در مدل‌سازی شوری و
 یا تغذیه‌گرایی مخازن پیشنهاد می‌گردد. همچنین به منظور در نظر گرفتن
 تأثیر همزمان برخی پارامترها بر تراز سطح آب مخزن و پروفیل دما و یا
 هیدرودینامیک، دما و شرایط کیفی، تعریف الگوریتم‌های بهینه‌سازی
 چندهدفه پیشنهاد می‌گردد.

۶- مراجع

- 1- Afshar, A., and Saadatpour, M. (2009). "Eutrophication in dam reservoirs: 2D modeling of the Karkheh reservoir." *J. of Water and Wastewater*, 71, 80-93 (In Persian)
- 2- Mohamadi, H. (2002), "Two dimensional reservoir eutrophication modeling." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Science and Technology, Tehran, Iran. (In Persian)
- 3- Samaee, M.R., Afshar, A., and Gharavi, M. (2007). "System dynamic modeling of phytoplankton and zooplankton in resevoir." *J. of Water and Wastewater*, 52, 47-55. (In Persian)
- 4- Jaffe, P.R., and Paniconi, C. (1988). "Model calibration based on random environmental fluctuations." *J. of Environ. Eng.*, 114(5), 1136-1145.
- 5- McCutcheon, S.C. (1989). *Water quality modeling, Volume I - transport and surface exchange in rivers*, CRC press, Boca Raton, Fla.
- 6- Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., and Nicell, J.A. (1997). "Evaluation of global optimization methods for conceptual rainfall-runoff model calibration." *J. of Water Sci. Tech.*, 36(5), 53-60.
- 7- Finley, J.R., Pintér, J.D., and Satish, M.G. (1998). "Automatic model calibration applying global optimization techniques." *J. of Environ. Model. and Assess.*, 3, 117-126.
- 8- Mulligan, A.E., and Brown, L.C. (1998). "Genetic algorithms for calibrating water quality models." *J. of Environ. Eng.*, 124(3), 202-211.
- 9- Shen, J., and Kuo, A.Y. (1998). "Application of inverse method to calibrate estuarine eutrophication model." *J. of Environmental Engineering*, 124(5), 409-418.
- 10- Saadatpour, M., and Afshar, A. (2007). "Thermal calibration of water in reservoir applying genetic algorithm." *2nd National Conf. of Water Resource Management*, Isfahan University of Tech., Isfahan, Iran. (In Persian)
- 11- Kazemi, H. (2010). "Calibration of large scale water quality model (CE-QUAL-W2) by hybrid algorithm." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran. (In Persian)
- 12- Ng, A.W.M., and Perera, B.J.C. (2003). "Selection of genetic algorithm operators for river water quality model calibration." *J. of Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 16, 529-541.
- 13- Goktas, R.K., and Aksoy, A. (2007). "Calibration and verification of QUAL2E using genetic algorithm optimization." *J. of Water Resource Plan. and Manag.*, 133 (2), 126-136.
- 14- Zakermshfegh, M., Neyshabouri, S.A., and Lucas, C. (2008). "Automatic calibration of lumped conceptual rainfall-runoff model using particle swarm optimization." *J. of Applied Sciences*, 8(20), 3703-3708.
- 15- Chau, K.W. (2007). "Application of a PSO-Based neural network in analysis of outcomes of construction claims." *J. of Automation in Construction*, 16, 642-646.
- 16- Shi, Y., and Eberhart, R. (2008). *Monitoring of particle swarm optimization*, Higher Education Press and Springer-Verlag, New York.
- 17- Hassan, R., Cohanin, B., and deWeck, O. (2004). *Comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm*, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- 18- Panda, S., and Padhy, N.P. (2007). "Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for TCSC-based controller design." *Int. J. of Electrical and Electronics Engineering*, 1(1), 41-49
- 19- Ababneh, J.I., and Bataineh, M.H. (2008). "Linear phase FIR filter design using particle swarm optimization and genetic algorithms." *J. of Digital Signal Processing*, 18, 657-668.
- 20- Yang, F., Zhang, C., and Sun, T. (2008). "Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for HMM training." *19th Conf. of IEEE*, Boston, USA, 1-4.
- 21- Meraji, S.H. (2004). "Optimum design of flood control systems by particle swarm optimization algorithm." M.Sc. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran. (In Persian)
- 22- Cole, T.M., and Wells, S.A. (2003). "CE-QUAL-W2: A Two-Dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.2 user manual." <<http://www.ce.pdx.edu/w2/w2v3.php3>>. (Oct., 2009)