

استفاده از الگوریتم SUFI-2 در واسنجی اتوماتیک و تعیین عدم قطعیت مدل دوبعدی CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی دمای مخزن

محمد تقی اعلمی^۱، حبیبه عباسی^{۲*}، محمد حسین نیک‌سخن^۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۶/۲۰

چکیده

هدف این مطالعه، واسنجی اتوماتیک مدل کیفیت آب در شبیه‌سازی دمای مخزن می‌باشد. در این مطالعه، از مدل CE-QUAL-W2 جهت شبیه‌سازی دمای آب مخزن سد علویان واقع در استان آذربایجان شرقی استفاده شد. تحلیل عدم قطعیت در بعضی مدل‌ها مانند CE-QUAL-W2 به دلیل پیچیدگی و هزینه محاسباتی بالا بسیار مشکل بوده و بسیار نادر است. در این تحقیق، جهت واسنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل CE-QUAL-W2 از نسخه دوم الگوریتم برازش متوالی عدم قطعیت یا همان SUFI-2 استفاده گردید. نتایج حاصل با استفاده از معیار میانگین خطای مطلق به‌عنوان تابع هدف و دو فاکتور اندازه‌گیری عدم قطعیت p -factor و r -factor مورد ارزیابی قرار گرفتند. واسنجی مدل در دوره آبان‌ماه سال ۱۳۸۶ تا شهریور سال ۱۳۸۷ و اعتبارسنجی آن در طی مهرماه سال ۱۳۸۷ تا شهریور ماه سال ۱۳۸۸ انجام گرفت. میانگین خطای مطلق دما در دوره واسنجی و تایید مدل به ترتیب ۱/۲۷ و ۱/۷۶ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی گردید. مقدار فاکتور عدم قطعیت (p -factor) در دوره واسنجی و تایید مدل به ترتیب ۰/۵۳ و ۰/۴ بدست آمد. نتایج نشان دهنده همگرایی مناسب داده‌های مشاهداتی و اندازه‌گیری شده در طول دوره شبیه‌سازی بود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم SUFI-2، شبیه‌سازی دمای آب، عدم قطعیت، مدل CE-QUAL-W2، واسنجی

مقدمه

دینامیک و فرآیندهای مدل بستگی دارد. تحلیل عدم قطعیت در مدل‌هایی مانند WASP5، MIKE11، CE-QUAL-W2 و ISIS به دلیل پیچیدگی و هزینه محاسباتی بالا بسیار مشکل بوده و بسیار نادر است (McIntyre., 2004).

روش‌های واسنجی خودکار را می‌توان در دو دسته روش‌های مبتنی بر بهینه‌سازی و روش‌های مبتنی بر عدم قطعیت دسته‌بندی نمود. در دسته اول هدف رسیدن به یک مقدار بهینه برای پارامترها می‌باشد به عبارت دیگر مقدار پارامترها را قطعی فرض می‌نماید. در دسته دیگر، الگوریتم‌های مبتنی بر عدم قطعیت قرار دارند که در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این روش، بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی، تخمین بازه‌ای از مقدار پارامترها فراهم می‌شود.

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای جایگزینی روش سعی و خطا با روش‌های مبتنی بر رویکردهای جدید در واسنجی مدل‌ها انجام شده است. کوپر و همکاران برای شبیه‌سازی رواناب از روش بهینه‌سازی جامع استفاده کردند (Cooper et al., 1997). مولیگان و همکاران در فرآیند اتوماتیک واسنجی مدل کیفی سفره آب، از الگوریتم ژنتیک به عنوان بهینه‌ساز استفاده نمودند (Mulligan and Brown 1998). سعادت‌پور و افشار (۱۳۸۵) جهت واسنجی دما در

مدل‌های شبیه‌ساز کیفیت آب جهت بررسی اهداف کیفی آب و ارزیابی اثرات اقلیم و کاربری اراضی بر کمیت و کیفیت منابع آب به طور فرآیندهای توسعه داده شده‌اند. واسنجی این مدل‌ها گام اساسی در توسعه مدل قبل از به‌کارگیری آن‌ها در تحقیقات می‌باشد. در طول دو دهه اخیر، ترکیب برنامه پایش و مدل‌سازی کیفی آب به‌عنوان یک ابزار مناسب در مدیریت کیفی آب مخازن مطرح شده است. بیش‌تر مدل‌های کیفی دارای روابط پیچیده و تعداد زیاد پارامتر جهت مدل‌سازی سیستم‌های واقعی می‌باشند. در فرآیند واسنجی، پارامترهای مدل جهت ایجاد سازگاری بین مدل و داده‌های اندازه‌گیری شده تغییر داده می‌شوند. واسنجی با روش سعی و خطا یک فرآیند زمان‌بر بوده و به مهارت، تجربه و دانش مدل‌کننده از

۱ - استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- دانشجوی دکتری عمران - آب، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳- دانشیار، دانشکده تحصیلات تکمیلی محیط زیست، دانشگاه تهران - تهران، ایران
(* - نویسنده مسئول: (Email: h.abbasi@tabrizu.ac.ir)

بودن جانبی، برای پیکره‌های آبی طویل و باریک مناسب است. توسعه و تکامل این مدل از سه دهه پیش آغاز شده و برای مخازن، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و خورها در سراسر جهان استفاده شده است. این مدل بر اساس حل غیردایمی دوبعدی هیدرودینامیک و پخش انتقال کار می‌کند. این مدل توانایی شبیه‌سازی ارتفاع سطح آب، چگالی، سرعت‌های طولی و قائم، دما و پارامترهای کیفی را دارد. مدل علاوه بر توانایی شبیه‌سازی بیش از ۳۰ پارامتر کیفی دارای قابلیت‌های مهم مانند شبیه‌سازی برای دوره‌های طولانی مدت، مدل‌سازی شاخه‌های متعدد در پیکره‌های آبی متعدد متصل، فاصله‌های متغیر طولی و ارتفاعی در شبکه‌بندی مدل و محاسبات مربوط به پوشش یخ نیز می‌باشد. این مدل برای مخازن توسعه یافته است ولی می‌تواند برای رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مصب‌ها و یا ترکیبی از آن‌ها نیز مورد استفاده قرار گیرد (Cole et al., 2015).

روش SUFI-2

SUFI-2 الگوریتم بهینه‌سازی است، که مبتنی بر اصول رگرسیون غیرخطی ابداع شده است. سنجش میزان عدم قطعیت در مدل‌سازی، در روش SUFI-2، شامل عدم قطعیت در ورودی‌ها، مدل مفهومی و پارامترها می‌باشد و توسط معیار p -factor ارزیابی می‌گردد که بیانگر درصد داده‌های اندازه‌گیری شده که درون باند ۹۵ درصد عدم قطعیت تخمین (95ppu) قرار گرفته‌اند می‌باشد. مراحل انجام کار به صورت زیر می‌باشد (Abbaspour et al., 2004):

در مرحله اول تابع هدف $g(\theta)$ و بازه پارامترها $[\theta_{abs\ min} \cdot \theta_{abs\ max}]$ تعریف می‌شوند.

از روش نمونه‌برداری هایپرکوبیک در بازه تعریف شده در مرحله قبل، جهت تولید مجموعه پارامترها و مقدار تابع هدف به ازای هر مجموعه از پارامترها استفاده می‌شود. مقادیر تابع هدف با استفاده از ماتریس ژاکوبین J و ماتریس کواریانس پارامترها C مطابق رابطه ۱ و ۲ ارزیابی شد.

$$J_{ij} = \frac{\Delta g_i}{\Delta \theta_j}, i = 1, \dots, C_2^m, j = 1, \dots, n \quad (1)$$

$$C = S_g^2 (J^T J)^{-1} \quad (2)$$

که در آن S_g^2 واریانس مقادیر تابع هدف از m بار اجرای مدل و n تعداد پارامترها است.

۹۵ درصد از بازه اطمینان^۳ هر کدام از پارامترها از رابطه ۳ و ۴ محاسبه شد.

$$\theta_{j.lower} = \theta_j^* - t_{v,0.025} \sqrt{C_{jj}} \quad (3)$$

مخزن کرخه از داده‌های مشاهداتی فرضی برای دوره شبیه‌سازی ۲۰ روزه از روش GA استفاده نمودند. کاظمی (۱۳۹۰) مساله حل شده توسط سعادت‌پور و افشار در سال ۱۳۸۵ را با الگوریتم بهینه‌سازی PSO حل نمود. شجاعی دما و کیفیت مخزن سد کرخه را با استفاده از الگوریتم چندهدفه PSO واسنجی نمود (Shojaei et al., 2010).

پوررضا بیلوندی و همکاران سه روش بررسی عدم قطعیت 1 PSO، DREAM^۲ و SUFI-2 را در پیش‌بینی رواناب حوضه قزل‌اوزن بررسی کردند (Bilondi et al., 2013). بررسی آن‌ها نشان داد که تفاوت زیادی بین عوامل آماری وجود ندارد و تفاوت بارز آن‌ها در تعداد اجرا می‌باشد؛ به طوری که روش SUFI-2 با تعداد اجرای کمتر الگوریتم موثرتری جهت واسنجی و تعیین عدم قطعیت دارد.

بسال‌پور و همکاران (۱۳۹۳) کارایی ۳ الگوریتم واسنجی شامل الگوریتم‌های PSO، SUFI-2 و GLUE برای مدل SWAT، به منظور شبیه‌سازی رواناب روزانه را در حوزه آبخیز کوهستانی بازفت بررسی کردند. وو و همکاران از سه الگوریتم ParaSol، SUFI-2 و GLUE جهت واسنجی و بررسی عدم قطعیت مدل SWAT در برآورد رواناب حوضه رودخانه ونجینگ استفاده کردند (Wu et al., 2015). بررسی نتایج حاصل نشان داد که روش SUFI-2 نسبت به دو روش دیگر نتایج بهتری دارد.

کشاوری و علیزاده (۱۳۹۴)، عملکرد روش SUFI-2 و الگوریتم چندهدفه هوش تجمعی ذرات را در واسنجی یک مدل ساده نیمه-تجربی شوری آب رودخانه حوضه آبریز حله به کار بردند. مطالعه آن‌ها نشان داد که جبهه پارتو تشکیل شده توسط الگوریتم چندهدفه هوش تجمعی ذرات به صورت پیوسته بدست آمده و در مراحل ابتدایی که الگوریتم SUFI-2 قادر به پیدا کردن جواب نیست مقادیر به دست آمده توسط الگوریتم چندهدفه هوش تجمعی ذرات مشخص است. با نزدیک شدن به انتهای روند الگوریتم SUFI-2، مقادیر هر دو شاخص آن به صفر نزدیک و مشاهده می‌گردد که بر جبهه پارتو منطبق می‌شود.

هدف از این مطالعه، کاربرد الگوریتم SUFI-2 جهت واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل دوبعدی کیفیت و هیدرودینامیک CE-QUAL-W2 در شبیه‌سازی دمای مخزن سد علویان می‌باشد.

مواد و روش‌ها

مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2

در این مطالعه از مدل CE-QUAL-W2 برای شبیه‌سازی مخزن سد علویان استفاده شد. این نرم‌افزار یک مدل دوبعدی (طولی و عمقی) هیدرودینامیک و کیفیت آب است که به دلیل فرض همگن

1- Particle Swarm Optimization

2- Differential Evolution Adaptive Metropolis

3- 95% confidence interval

یکنواخت در یک دامنه با عدم قطعیت معین توزیع شده است. عدم قطعیت خروجی مدل به وسیله عدم قطعیت تخمین ۹۵ درصد در سطح ۲/۵ و ۹۷/۵ درصد تابع توزیع متغیر خروجی که با یک روش نمونه برداری لاتین هایپرکیوب از دامنه مذکور نمونه برداری می شود، محاسبه گردید.

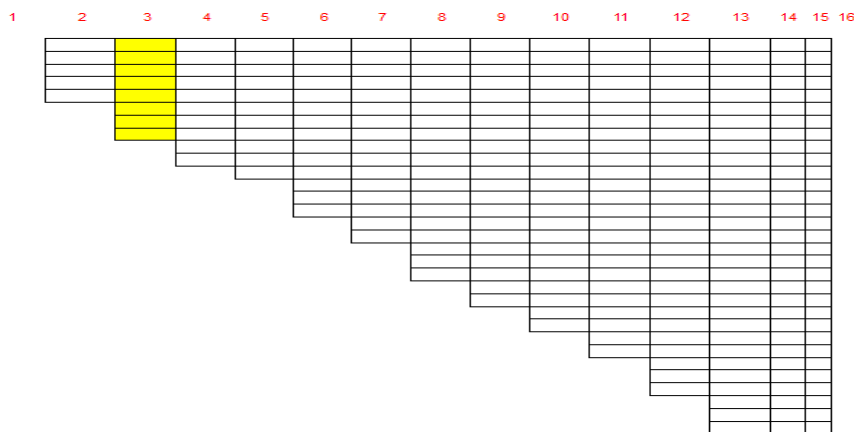
تابع هدف در این تحقیق کمینه نمودن متوسط خطای مطلق در نقاط پایش در لایه های مختلف و در روزهای پایش می باشد.

مطالعه موردی

سد خاکی علویان در ۳/۵ کیلومتری شمال شهرستان مراغه در استان آذربایجان شرقی به منظور تامین آب شرب مراغه و همچنین تامین آب زراعی ۱۰/۰۰۰ هکتار از اراضی پایاب، روی رودخانه صوفی چای احداث شده است. حجم مخزن این سد ۶۰ میلیون مترمکعب شامل ۵۷ میلیون مترمکعب حجم مفید و ۳ میلیون مترمکعب حجم مرده می باشد. ارتفاع این سد از بستر رودخانه ۷۰ متر و از پی سد ۸۰ متر می باشد.

کاربرد مدل

به منظور مدل سازی دریاچه سد علویان توسط مدل CE-QUAL-W2 نیاز به فایل بسیمتری (عمق سنجی) مخزن سد می باشد. با استفاده از نقشه هیدروگرافی مخزن سد علویان، پس از ساده سازی به یک شاخه اصلی با ۱۶ المان طولی (بازه) با فاصله ۱۱۰ تا ۲۵۰ متر و ۳۳ لایه با عمق ۲ متر تقسیم گردید (شکل ۱).



شکل ۱- نمای عمودی و بلان شبیه سازی شده مخزن سد علویان

تازه کند علویان و ایستگاه سینوپتیک مراغه استخراج شد. اطلاعات دمای آب ورودی از متوسط دمای هوا در هر روز با استفاده از رابطه

$$\theta_{j,upper} = \theta_j^* + t_{v,0.025}\sqrt{C_{jj}} \quad (4)$$

که در آن θ_j^* مقدار پارامتر θ_j در تابع هدف بهینه می باشد v درجه آزادی یا $m - n$ می باشد.

بازه 95ppu برای تمام خروجی ها (متغیرها) در تابع هدف محاسبه شده و در ادامه شاخص $p - factor$ (درصد داده های مشاهداتی که در بازه 95ppu قرار می گیرند) محاسبه شده و شاخص $r - factor$ از رابطه ۵ محاسبه می شود:

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (Y_{T_j,97-5\%}^M - Y_{T_j,2-5\%}^M)}{\sigma_{obs}} \quad (5)$$

که در آن $Y_{T_j,97-5\%}^M$ و $Y_{T_j,2-5\%}^M$ معرف مرز بالا و پایین عدم قطعیت 95ppu و σ_{obs} انحراف از معیار داده های مشاهداتی می باشد.

بهترین نتیجه زمانی خواهد بود که ۱۰۰ درصد داده های اندازه گیری با 95ppu پوشانده شود یا به عبارت دیگر میزان $p - factor$ برابر ۱ شود و $r - factor$ کم تر و به صفر نزدیک باشد. در صورتی که مقادیر دو شاخص مذکور رضایت بخش باشد، بازه تعریف شده پارامترها به عنوان توزیع احتمال پسین خواهد بود. در غیر این صورت بازه جدید پارامترها بر اساس رابطه ۶ و ۷ محاسبه شده و تمام مراحل ۱ تا ۴ تکرار خواهد شد.

$$\theta_{j,min,new} = \theta_{j,lower} - \max\left(\frac{\theta_{j,lower} - \theta_{j,min}}{2}, \frac{\theta_{j,max} - \theta_{j,upper}}{2}\right) \quad (6)$$

$$\theta_{j,max,new} = \theta_{j,upper} + \max\left(\frac{\theta_{j,lower} - \theta_{j,min}}{2}, \frac{\theta_{j,max} - \theta_{j,upper}}{2}\right) \quad (7)$$

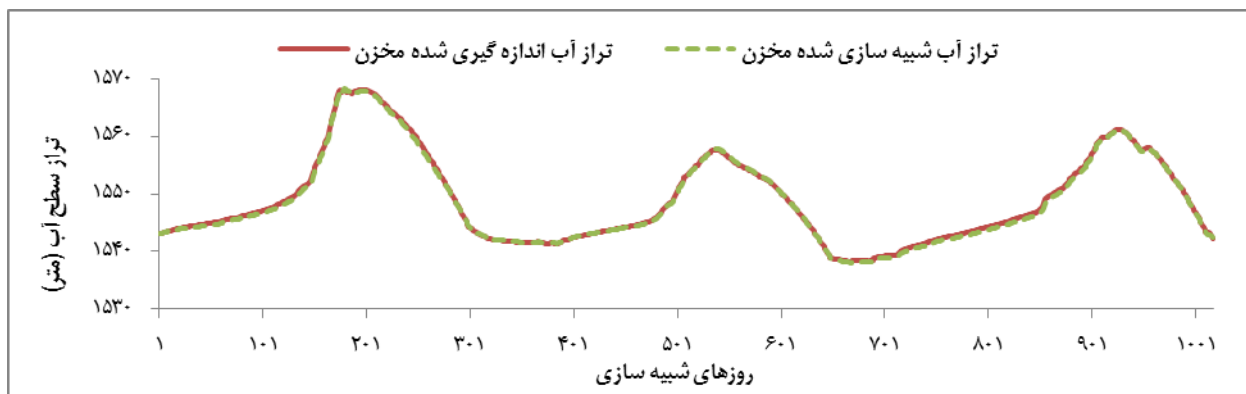
در روش SUFI-2 فرض می شود که هر پارامتر ناشناخته به طور

اطلاعات کمی مورد نیاز مدل شامل دبی ورودی به مخزن و فایل هواشناسی می باشد که به ترتیب از اطلاعات ایستگاه هیدرومتری

شهریورماه سال ۱۳۸۸ در ۶ روز مختلف در دو مقطع ابتدا و انتهای مخزن در دو عمق اندازه‌گیری شد. از این داده‌ها جهت واسنجی و صحت‌سنجی مدل استفاده شد. مقادیر پارامترهای اندازه‌گیری شده در اولین روز اندازه‌گیری‌ها به‌عنوان شرایط اولیه وارد مدل گردید. بر این اساس شبیه‌سازی از روز ۲۲ آبان ماه سال ۱۳۸۵ تا روز ۳۱ مرداد ماه سال ۱۳۸۸ انجام گردید.

پس از بررسی و تصحیح هندسه مخزن، تراز سطح آب شبیه‌سازی شده مدل با تراز سطح آب مشاهداتی مقایسه گردید. متوسط خطای مطلق و جذر میانگین مربعات خطای سطح آب در طول دوره شبیه‌سازی به‌ترتیب برابر ۰/۲۸ و ۰/۳۶ متر محاسبه گردید. شکل ۲ تراز آب واسنجی شده و مشاهداتی را در طول دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد.

ارایه شده در مدل SWAT استخراج گردید (Neitsch et al., 2011). داده‌های جریان ورودی و دمای آب به صورت شرط مرزی جریان ورودی وارد مدل شد. اطلاعات ایستگاه سینوپتیک مراغه که شامل دمای متوسط، دمای نقطه شبنم، سرعت و جهت وزش باد و میزان ابری بودن هوا می‌باشد به‌عنوان شرط مرزی سطحی وارد مدل گردید. داده‌های جریان آب خروجی از مخزن سد علویان از فایل بیلان سد که شامل ارتفاع آب، میزان مصارف و خروجی از مخزن سد به‌صورت روزانه می‌باشد برای طول مدت شبیه‌سازی استخراج شد. جریان آب خروجی از مخزن به‌عنوان شرط مرزی جریان خروجی وارد مدل شد. دمای داخل مخزن در فاصله زمانی آبان‌ماه سال ۱۳۸۶ تا شهریور سال ۱۳۸۷ در ۱۲ روز متفاوت و در سه مقطع ابتدا، وسط و انتهای مخزن در سه عمق مختلف اندازه‌گیری شد و از مهرماه سال ۱۳۸۷ تا



شکل ۲- نمودار واسنجی تراز آب مخزن سد علویان

با تعداد ۶۰ شبیه‌سازی در ۳ تکرار انجام شد.

نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که مدل قادر است دما را در دوره واسنجی با میانگین خطای مطلق ۱/۲۷ درجه سانتی‌گراد و در دوره صحت‌سنجی با میانگین خطای مطلق ۱/۷۶ درجه سانتی‌گراد شبیه‌سازی نماید. با توجه به نتایج شبیه‌سازی شده و اندازه‌گیری شده دما، لایه‌بندی به مرور زمان طی ماه‌های گرم سال معمولاً در خردادماه تشکیل می‌شود. با توجه به نمودارهای گرادیان عمودی دمای آب، مکان لایه ترموکلاین (میان لایه) در عمق تقریبی ۱۰ متری از سطح آب به ضخامت تقریبی ۷ متر قرار دارد. با آغاز ماه‌های سرد سال، دما در لایه‌های سطحی کاهش یافته و از شدت لایه‌بندی کاسته شده و تقریباً در آبان‌ماه مخزن در حالت اختلاط کامل قرار داشته و فاقد لایه‌بندی حرارتی است. نتایج معیار ارزیابی موفقیت مدل و پارامترهای عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما در جدول ۲ آورده شده است. اگر چه نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی دارای انطباق مطلق نسبت به یکدیگر نمی‌باشند، اما روند نتایج مدل‌سازی در دوره‌های زمانی مختلف، تقریباً روندی منطقی را ارایه می‌نماید.

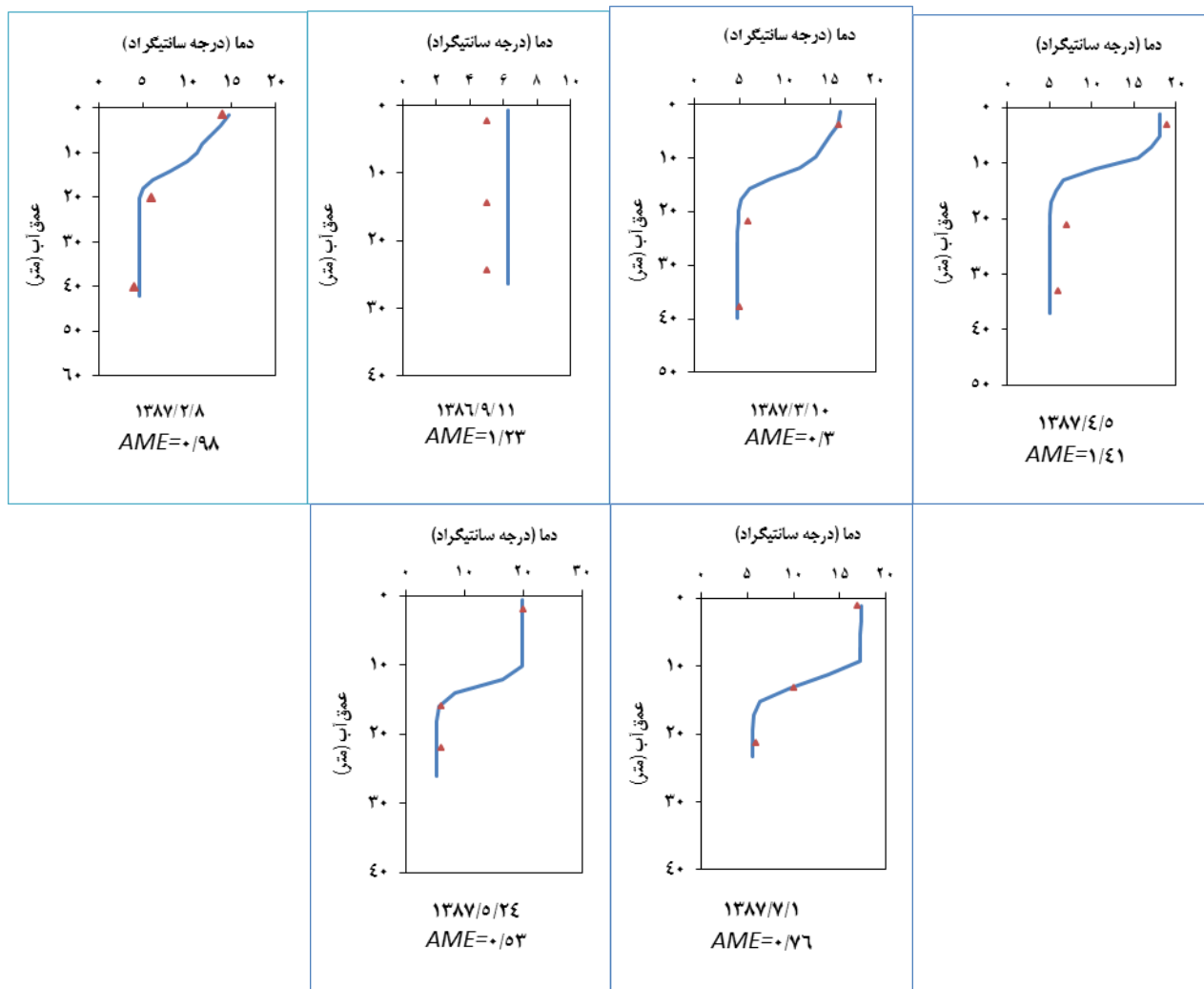
نتایج و بحث

لازم به ذکر است که در این مطالعه قبل از واسنجی اتوماتیک پروفیل عمودی دما در مخزن سد علویان، واسنجی سطح آب و هندسه مخزن به صورت دستی انجام شده است.

در فرآیند واسنجی، پارامترهای موثر در پیش‌بینی رفتار سیستم، مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس انتخاب شدند. انتخاب بازه ضرایب واسنجی نیز بر اساس ضرایب به کار رفته در موارد مشابه در مراجع و استفاده از موارد پیش فرض مدل صورت گرفت. پارامترهای تأثیرگذار بر دمای مخزن به همراه مقادیر پیش فرض آن‌ها در مدل و مقادیر واسنجی شده با استفاده از الگوریتم SUFI-2 در جدول ۱ آورده شده است. از پارامترهای موثر در واسنجی مدل، ضریب پوشش باد می‌باشد که به دلیل تفاوت تراز محاسبات سرعت باد در مخزن با ایستگاه هواشناسی مربوطه و همچنین افت تراز آب مخزن در ماه‌های مختلف و متعاقب آن مغایرت سرعت باد واقعی در مخزن با آمار موجود می‌باشد. مقدار آن برای مناطق کوهستانی و تپه ماهور بین ۰/۵ تا ۰/۹ متغیر است و برای زمین باز و مسطح ۱ می‌باشد. واسنجی مدل

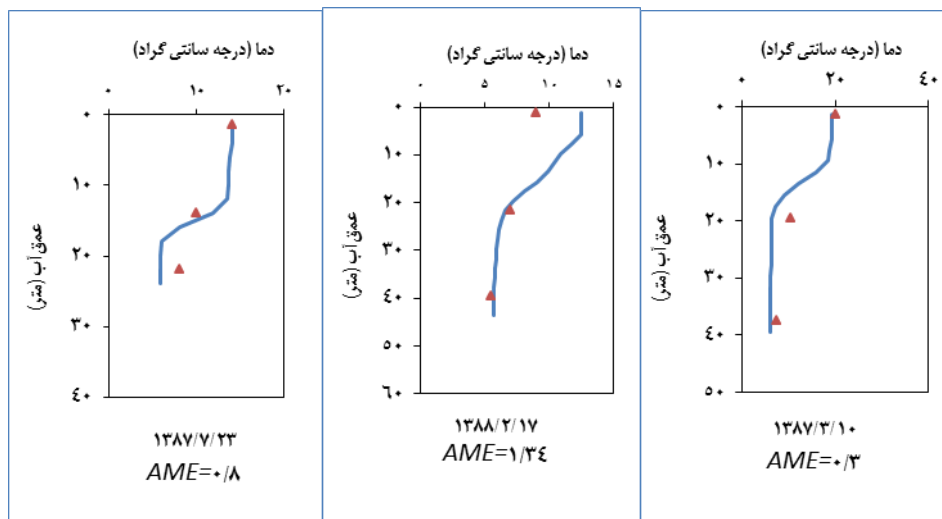
جدول ۱- ضرایب موثر در واسنجی مدل

پارامتر	علامت اختصاری	دامنه تغییرات	مقدار پیش فرض	مقدار واسنجی شده
ویسکوزیته طولی (m^2/s)	AX	۰/۰۱-۱	۱	۱
پخش طولی (m^2/s)	DX	۰/۰۱-۱	۱	۱
بیشینه لزجت قائم آشفته (m^2/s)	AZmax	۰/۰۰۰۱-۱	۱	۱
ضریب پوشش باد	Wsc	۰/۵-۱	ضریب واسنجی	۰/۹۹
ضریب سایه‌اندازی	SHD	۰/۵-۱		۰/۷۱
ضریب تبادل حرارت در کف	CBHE	۰/۳-۰/۵	۰/۳	۰/۴۱
دمای رسوب	TSED	۱۰-۱۴	۱۰	۱۳/۷
جذب نور در سطح آب	BETA	۰/۳-۰/۵	۰/۴۵	۰/۳۹
ضریب کاهش نور در آب ($1/m$)	EXH2O	۰/۲-۰/۵	۰/۴۵	۰/۲۸
رابطه تبخیر رایان هارلمن	RHEVAP	ON-OFF	OFF	ON
الگوریتم پوشش یخ	ICEC	ON-OFF	OFF	ON

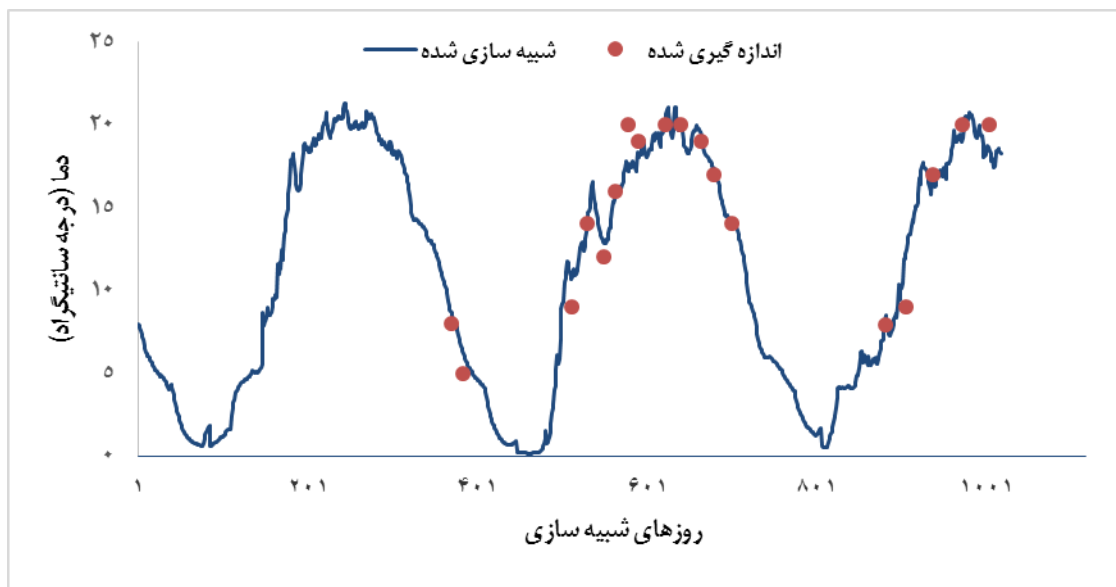


جدول ۲ - نتایج معیارهای ارزیابی موفقیت مدل و پارامترهای عدم قطعیت مدل

پارامترهای عدم قطعیت مدل				متوسط خطای مطلق (AME)		پارامتر دما (°C)
مرحله اعتبارسنجی (P- Factor)	مرحله واسنجی (P- Factor)	مرحله اعتبارسنجی (P- Factor)	مرحله واسنجی (P- Factor)	مرحله اعتبارسنجی	مرحله واسنجی	
۰/۳۱	۰/۴	۰/۲۹	۰/۵۳	۱/۷۶	۱/۲۷	



شکل ۴ - مقایسه گرادیان عمودی دمای شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده در بازه ۱۲ در مرحله صحت‌سنجی در بعضی از روزهای پایش



شکل ۵ - دمای آب در عمق دو متری از سطح آب در طی دوره شبیه‌سازی

۰/۵۳ و ۰/۴ برآورد شده است که با توجه به خطاهای ذکر شده در مدل سازی قابل قبول می‌باشد. مقدار پارامتر (r - factor) نیز ۰/۲۹ و ۰/۳۱ به ترتیب در دوره واسنجی و صحت‌سنجی می‌باشد که اعدادی نزدیک به صفر بوده و مطلوب می‌باشند. اشکال ۳ و ۴ گرادیان عمودی دمای آب شبیه‌سازی شده با اندازه‌گیری شده را به ترتیب در مراحل واسنجی و صحت‌سنجی مدل

عدم انطباق نتایج مدل‌سازی و داده‌های مشاهداتی می‌تواند ناشی از خطا در ساختار مدل شامل فرایندها و ارتباط ریاضی بین فرایندها، خطای مدل‌سازی شامل انتخاب ضرایب واکنش، وارد نمودن داده‌ها و یا ناشی از خطای اندازه‌گیری متغیرهای ورودی سیستم یعنی دبی، دما باشد (افشار و همکاران، ۱۳۸۸). مقدار پارامتر عدم قطعیت مدل (p - factor) در دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل به ترتیب

اتوماتیک مدل دو بعدی CE-QUAL-W2 در مدلسازی دمای آب مخزن سد کرخه با استفاده از الگوریتم بهینه‌ساز PSO. مجله آب و فاضلاب، ۳۳(۴)، صفحات ۲ تا ۱۲.

کشاوری، ک.، علیزاده، ح.، ۱۳۹۴. بررسی عملکرد الگوریتم کالیبراسیون مبتنی بر عدم قطعیت SUFI-2 در مدل‌سازی کیفیت آب. دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری.

Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., Van Genuchten, M.Th. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure, *Vadose Zone Journal*. 3: 1340-1352.

Bilondi, M.P., Abbaspour, K.C and Ghahraman, B. 2013. Application of Three Different Calibration-Uncertainty Analysis Methods in a Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model Application, *Middle-East Journal of Scientific Research*. 15.9: 1255-1263.

Cole, T.M., Wells, S.A. 2015. CE-QUAL-W2: A Two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.72 users manual. Washington, DC: US Army Corps of Engineers.

Cooper, V.A., Nguyen, V.T.V., Nicell, J.A. 1997. Evaluation of global optimization methods for conceptual rainfall-runoff model calibration. *Journal of Water Science and Technology*. 36.5: 53-60.

McIntyre, N.R. 2004. Analysis of Uncertainty in River Water Quality Modelling, PhD dissertation. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London.

Mulligan, A.E., Brown, L.C. 1998. Genetic algorithms for calibrating water quality models. *Journal of Environmental Engineering*. 124.3: 202-211.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2011. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation: Version 2009, U.S. Department of Agriculture Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, TX and Blackland Research and Extension Center, Texas AgriLife Research, Temple, TX. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. 2011. Available: <http://swatmodel.tamu.edu/documentation/>. Accessed on [2015-06-27].

Shojaei, N. 2014. Automatic Calibration of Water Quality and Hydrodynamic Model (CE-QUAL-W2), M.Sc. Thesis, Portland State University.

Wu, H., Chen, B. 2015. Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2 and ParaSol methods. *Ecological Engineering*. 76: 110-121.

در تعدادی از زمان‌های اندازه‌گیری دما نشان می‌دهند. همان‌گونه که در اشکال مشخص است در ماه‌های گرم، لایه‌بندی حرارتی قابل توجهی در مخزن شکل می‌گیرد و با سرد شدن هوا (کم شدن دما)، عمق رولایه افزایش و عمق میان لایه کاهش می‌یابد. شکل ۵ دمای آب را در نزدیکی آبگیر سد در عمق ۲ متری آب در دوره شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مدل دمای آب را با دقت قابل قبولی شبیه‌سازی نموده است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور واسنجی و تعیین عدم قطعیت مدل شبیه‌ساز CE-QUAL-W2 از الگوریتم SUFI-2 استفاده شد. مدل شبیه‌سازی CE-QUAL-W2 مدل دوبعدی هیدرودینامیک و کیفیت آب به منظور شبیه‌سازی پروفیل دما در مخزن سد علویان استفاده گردید. استفاده از مدل ترکیبی (SUFI-2)-(CE-QUAL-W2) باعث افزایش دقت محاسبات و افزایش سرعت عملیات گردید. قبل از واسنجی اتوماتیک، پارامترهای موثر در شبیه‌سازی دما در مخزن با استفاده از آنالیز حساسیت مشخص شد. تغییرات زمانی و مکانی دما، تطابق نسبتاً مناسبی با داده‌های مشاهداتی دارند. نتایج حاصل از مدل‌سازی گویای رخداد واژگونی دما در مخزن سد علویان در آبان‌ماه می‌باشد. نتایج حاصل از واسنجی اتوماتیک دما در مخزن سد علویان با استفاده از الگوریتم SUFI-2 نشان دهنده تطابق نسبتاً مناسب نتایج حاصل از مدل شبیه‌ساز با داده‌های مشاهداتی و عملکرد خوب رویکرد واسنجی اتوماتیک مدل CE-QUAL-W2 با استفاده از الگوریتم SUFI-2 می‌باشد.

منابع

افشار، ع.، سعادت‌پور، م. ۱۳۸۸. تغذیه‌گرایی مخازن سدها: مدل‌سازی دوبعدی مخزن کرخه، مجله علمی-پژوهشی آب و فاضلاب. ۲۰: ۳-۸۰-۹۳.

بسالت‌پور، ع.ا.، حاج‌عباسی، م.، ایوبی، ش. و جلالیان، ا. ۱۳۹۳. تعیین الگوریتم مناسب برای واسنجی مدل SWAT جهت شبیه‌سازی رواناب روزانه، مطالعه موردی: حوزه آبخیز بازفت، جنوب غربی ایران. منابع آب و توسعه. ۲. ۴: ۷. ۱۳-۲۶.

سعادت‌پور، م.، افشار، ع.، ۱۳۸۵. کالیبراسیون مدل کیفی دما در سیستم مخزن با استفاده از الگوریتم ژنتیک، دومین کنفرانس مدیریت منابع آب، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران.

کاظمی‌الموتی، ح.، افشار، ع.، سعادت‌پور، م.، ۱۳۹۴. کالیبراسیون

Using SUFI-2 Algorithm in Automatic Thermal Calibration and Uncertainty Analysis of Two-Dimensional CE-QUAL-W2 Model

M. T. Alami¹, H. Abbasi^{2*}, M. H. Niksokhan³

Received: Augu.27, 2017

Accepted: Sep.11, 2017

Abstract

The purpose of this study is automatic calibration of water quality model to simulate water temperature. In this study, CE-QUAL-W2 was applied to simulate water temperature in the Alavian dam reservoir located in East-Azərbayjan province. Uncertainty analysis in some models such as CE-QUAL-W2 is difficult and very rare, because of their complexity and high computational cost among other models. Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) was used to calibrate and analyze the uncertainty of CE-QUAL-W2 model. The performance of SUFI-2 was evaluated using the Absolute Mean Error (AME) as an objective function. Uncertainty statistics used were the *p-factor* and *r-factor*. Model calibration was accomplished during November 2007 to September 2008 and later validated during the period from August 2008 to September 2009. After simulating the water level, the temperature was simulated with an Absolute Mean Error 1.27 and 1.76 °C during the calibration and validation periods, respectively. The *p-factor* have been calculated as 0.53 and 0.4 during the calibration and validation periods, respectively. The results showed vertical temperature profiles of the calibrated model agree closely with the measured data.

Keywords: Calibration, CE-QUAL-W2 Model, SUFI-2 Algorithm, Uncertainty, Water Temperature Simulation

1- Prof., Department. of Civil Engineering., University of Tabriz, Tabriz

2- Ph.D Candidate, Department. of Civil Engineering., University of Tabriz, Tabriz

3- Assoc. Prof., Department. of Environmental Engineering., University of Tehran, Tehran

(*- Corresponding Author Email: h.abbasi@tabrizu.ac.ir)