Archive of SID

نشریه دانش آب و خاک / جلد ۲۹ شماره ۱صفحه‌های ۱تا ۱۴ / سال ۱۳۹۸

ارزیابی عملکرد مدل ترکیبی سیستم‌های عصبی– فازی ترکیبی و الگوریتم‌های فراکاوشی در بهره‌برداری بهینه از مخزن سد

محمد حسین ربیعی[1*]، محمد تقی اعلمی[2]، سیامک طلعت اهری[3]

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۹/۲۵

۱–دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۲–استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

۳–دانشیار، گروه مهندسی سازه، دانشکده عمران، دانشگاه تبریز

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mrabiei6118@gmail.com

چکیده

هدف کلی از این تحقیق توسعه مدل‌های بهینه بهره‌برداری از مخزن سد به منظور تأمین نیازهای مختلف پایین دست سد، بر مبنای منطق فازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراکاوشی می‌باشد. در این راستا ابتدا مقادیر بهینه خروجی سد زاینده‌رود واقع در استان اصفهان در طول دوره بهره‌برداری بر اساس تابع هدف و قیودات مختلف، با در نظر گرفتن مقادیر ورودی به سد و نیز نیازهای پایین‌دست، با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی شامل الگوریتم‌های ژنتیک، اجتماع ذرات، تفاضل تکاملی، جستجوی هارمونی، جستجوی ذرات باردار استخراج گردید. در ادامه با توجه به مقادیر خروجی بهینه شده در طی یک دوره بلند مدت، با استفاده از مدل‌های مبتنی بر منطق فازی از جمله مدل‌های عصبی- فازی تطبیقی و یک مدل جدید ترکیبی از مدل عصبی- فازی تطبیقی و الگوریتم‌های فراکاوشی، انواع مدل‌های بهره‌برداری توسعه داده شد و در نهایت عملکرد این مدل‌ها با معیارهای مختلف از جمله اعتمادپذیری، برگشت پذیری، آسیب پذیری و پایداری ارزیابی گردید. نتایج بدست آمده حاکی از عملکرد مناسب سیستم ترکیبی جدید در توسعه مدل بهره‌برداری از مخزن سد می‌باشد. براین اساس مقدار معیار پایداری برای سیستم ترکیبی جدید و سیستم انفیس کلاسیک به ترتیب برابر با ۰/۳۰ و ۰/۱۸ بدست آمد. همچنین این سیستم ترکیبی با تأمین۹۵/۹۹ درصد از نیازهای کل پایین‌دست سد زاینده‌رود عملکرد مناسبی از خود نشان داد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی سری زمانی، توسعه سیاست بهره‌برداری، ساختار انفیس، عدم قطعیت

www.SID.ir

Archive of SID

Performance Evaluation of a Hybrid ANFIS Model and Meta-Heuristic Algorithms in Optimal Operation of Dam Reservoir

M.H.Rabiei*1, M.T.Aalami2, S.Talatahari3

Received: August 23, 2017 Accepted: December 16, 2018
[1] PhD Student, Dept. of Water Engin., Faculty of Civil., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
[2] Professor, Dept. of Water Engin., Faculty of Civil., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
[3]Associate Professor, Dept. of Water Engin., Faculty of Civil., Univ. of Tabriz, Tabriz, Iran
* Corresponding Author, Email: mrabiei6118@gmail.com

Abstract

The main purpose of this paper was to develop optimal models of reservoir operation in order to supply different downstream demands based on fuzzy logic and meta- heuristic algorithms. In this regard, firstly, the optimal values of the released water releases from Zayanderood reservoir during the operation period based on the objective functions and different constraints, were extracted using meta- heuristic algorithms including Genetic Algorithms, Particle Swarm Optimization, Differencial Evolution, Harmony Search and Charged System Search, considering the inflow and the downstream demands during this period. Then, with regard to the optimal values of the released water over a long period, using fuzzy logic based models such as ANFIS and a new combination of ANFIS and meta-heuristic algorithms, various types of operation models were developed. Finally, the performance of these models were evaluated with various performance evaluation criteria such as reliability, reversibility, vulnerability and sustainability. The results showed the proper performance of the new hybrid system in developing the reservoir operation model. According to the results, the sustainability values achieved by the new hybrid and classic systems were 0.30 and 0.18, respectively. Also, this hybrid system showed a good performance by supplying 95.99% of the total demands of Zayanderood reservoir system.

Keywords: ANFIS structure, Operation policy development, Time series prediction, Uncertainty

مقدمه

بهره‌برداری از مخازن سد از فرآیندهای تصمیم-گیری پیچیده‌ای تشکیل شده که در آن با توجه به حجم ذخیرهٔ مخزن، مقدار تقاضاها و پیش بینی جریان ورودی به مخزن، در مورد میزان خروج آب از مخزن تصمیم‌گیری می‌شود. در این بین، عدم قطعیت و عدم دقت موجود در مسائل بهره‌برداری و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی در پیچیده‌تر شدن بهره‌برداری موثراند. مهم‌ترین هدف در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از سامانه مخازن، تعیین سیاست‌های مختلف بهره‌برداری می‌باشد که بتوانند در شرایط عدم قطعیت‌های موجود به طور صحیح عمل کنند. جهت تعیین سیاست‌های مختلف بهره‌برداری از مخازن در ابتدا باید مخازن سد شبیه سازی شده و سپس از مدل‌های بهینه‌سازی استفاده نمود. تاکنون تکنیک‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مختلفی برای استخراج سیاست‌ها و قوانین بهره‌برداری به کار رفته است. امروزه به کارگیری شبکه‌های غیرخطی به عنوان یکی از تکنیک‌های هوشمند در برخورد با عدم قطعیت‌ها و تحلیل و پیش‌بینی داده‌های سری زمانی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. روش-های شبکه عصبی مصنوعی[1] و منطق فازی[1] و همچنین

[1] Artificial Neural Network

www.SID.ir

Archive of SID

سیستم استنتاج فازی بر پایه شبکه عصبی تطبیقی[۲] (انفیس)، از این قبیل سیستم‌ها است.

در طول دهه‌های گذشته بسیاری از محققان در سراسر دنیا روش‌های مختلفی برای استخراج سیاست‌های بهره‌برداری به منظور مدیریت سامانه مخازن ارائه کرده‌اند. تیلمانت و همکاران (۲۰۰۲) سیاست‌های بدست آمده بهره‌برداری مخزن از مدل فازی- برنامه‌ریزی پویای احتمالی (FSDP) را با مدل برنامه‌ریزی پویای احتمالی صریح غیرفازی مقایسه کردند و نتایج نشانگر برتری ابتدایی مدل (FSDP) و توانایی آن در آشکار کردن ابهامات برای مدیران می‌باشد. مهتا و جین (۲۰۰۹) یک مدل توسعهٔ سیاست های بهره‌برداری از مخزن چند هدفه را با روش عصبی–فازی ارائه کردند. که این مدل برای دو فصل پر آبی و کم آبی ایجاد شد. سه مدل بر پایه قوانین فازی برای این دو فصل ساخته شد. از مقادیر رها سازی واقعی برای فرموله کردن قوانین فازی استفاده شده و در نهایت این مدل‌ها با مدل‌های انفیس شبکه‌ای و خوشه‌بندی مقایسه شده و نتایج نشانگر عملکرد بهتر مدل انفیس خوشه‌بندی شده می‌باشد. نورانی و همکاران (۱۳۹۱) ترکیب مدلی از برنامه‌ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) در بهره‌برداری بهینه چند هدفه از سیستم دو مخزنی حوضه آبریز سفیدرود ارائه نمودند. صفوی و همکاران (۲۰۱۳) با دیدگاه تلفیقی آب‌های زیرزمینی و آب سطحی و با محدود کردن افت سطح آب زیرزمینی، با توجه به نیازهای پایین دست سد، سهم واقعی سد در تأمین این نیازها بدست آوردند. آنها با استفاده از مدل برنامه ریزی پویا، مقادیر بهینه خروجی سد را در یک دورهٔ بلند مدت، با در نظر گرفتن آوردهای تاریخی به سد و نیز نیازهای واقعی در طی این مدت، استخراج کردند. در ادامه با توجه به خروجی های بهینه شده، با استفاده از مدل های فازی، رگرسیون فازی و انفیس، سه مدل بهره‌برداری ارائه کردند. نتایج حاکی از برتری مدل بهره‌برداری بر مبنای سیستم انفیس بود. همانگونه که اشاره شد به منظور تدوین قوانین و سیاست‌های بهره‌برداری از مخازن، روشهای مختلفی استفاده می‌شود. همچنین محققین زیادی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های فراکاوشی به حل مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سد پرداخته‌اند. بزرگ حداد و همکاران (۲۰۱٤) با استفاده از الگوریتم چرخه آب (WCA) به بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه کارون ٤ با هدف تولید برقابی و یک سیستم چهارمخزنه پرداختند و نتایج خود را با الگوریتم ژنتیک و روش برنامه‌ریزی غیر خطی (NLP) مقایسه کردند. آن‌ها همچنین توانایی همگرایی سریع و قابلیت اطمینان بالای این الگوریتم اثبات کردند. احترام و همکاران (۲۰۱۷) با معرفی یک الگوریتم ترکیبی از ژنتیک و کریل (GA-Krill) به بهینه‌سازی بهره‌برداری از سامانه‌های تک مخزنه، چهارمخزنه و ده مخزنه پرداختند. آن‌ها نتایج حاصل از الگوریتم ترکیبی را با نتایج الگوریتم‌های استاندارد مقایسه کردند و نشان دادند که الگوریتم ترکیبی علاوه بر بهبود جواب‌های نهایی، دارای سرعت همگرایی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های استاندارد خود دارد. افشار و حاجی‌آبادی (۲۰۱۸) به بررسی بهینه‌سازی مخزن دو منظوره سد دز جهت تأمین نیاز پایین دست و تأمین نیروی برقابی با استفاده از روش جدید اتوماتای سلولی موازی (PCA) برای دوره‌های بهره‌برداری ٦۰، ۱۲۰، ۲٤۰ و ٤۸۰ ماهه پرداختند. ایشان دو روش اتوماتای سلولی موازی را جهت جستجوی بهترین جواب هر یک از توابع هدف در نظر گرفتند. نتایج جبهه پارتوی بدست آمده حاکی از عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی در مقایسه با الگوریتم NSGA-II به خصوص در حل مسائل بزرگ مقیاس بود.

در تحقیق حاضر برای اولین بار یک مدل ترکیبی از سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) و ٥

[۱] Fuzzy Logic

[۲] Adaptive Neuro-Fuzzy Interface System

www.SID.ir

Archive of SID

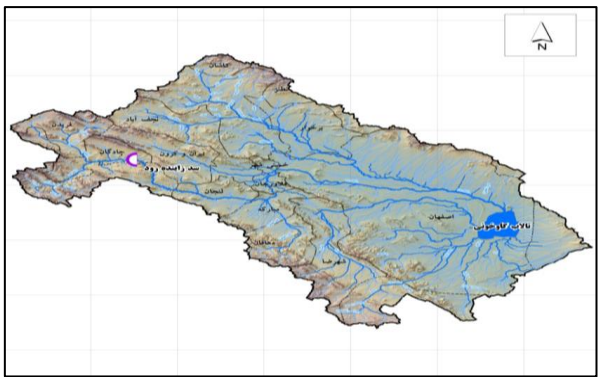
الگوریتم فراکاوشی شناخته شده در مسائل مختلف بهینه‌سازی (GA, PSO, DE, HS and CSS) به منظور تقویت بخش یادگیری (Training) سیستم انفیس، جهت توسعه مدل بهره‌برداری مخزن سد زاینده‌رود مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس در ابتدا بر اساس داده‌های مربوط به سد از قبیل حجم ماهیانه ورودی به سد و حجم تقاضا در طی دوره بلند مدت آماری ۲۰ ساله و نیز حجم مخزن، خروجی بهینه با توجه به قیودات مسئله برای این دوره بلند مدت به منظور تأمین نیازهای پایین‌دست، با استفاده ۵ الگوریتم بهینه‌سازی (در قالب یک مدل بهینه‌ساز) استخراج می‌گردد. در ادامه به منظور توسعه سیاست‌های بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود و با توجه به مقادیر خروجی بهینه شده بدست آمده از مرحله قبل، با استفاده از انفیس و یک مدل ترکیبی جدید انفیس-الگوریتم فراکاوشی، دو نوع مدل بهره‌برداری ساخته می‌شود و در نهایت عملکرد این مدل‌ها با معیارهای مختلف از جمله اعتمادپذیری، برگشت پذیری، آسیب پذیری و انعطاف پذیری مقایسه می‌گردد.

در ادامه این تحقیق ابتدا تابع هدف و قیودات بهینه‌سازی خروجی مخزن سد به منظور کمینه‌سازی کمبود در طول دوره بهره‌برداری معرفی می‌گردد و سپس به معرفی مختصری از شبکه‌های عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) پرداخته شده و مدل جدید ترکیبی این ساختار با الگوریتم‌های فراکاوشی (GA, PSO, DE, HS and CSS) معرفی خواهد شد و در نهایت نتایج حاصل از مدل‌های بهره‌برداری ارائه می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق به منظور توسعه مدل‌های بهره‌برداری، مطالعهٔ موردی بر روی سد زاینده‌رود و داده‌های بهره‌برداری آن در طی ۲۰ سال آماری (سال آبی ۱۳۶۸-۶۹ تا ۸۸-۱۳۸۷)، انجام شده است. سد زاینده رود برروی رودخانه زاینده رود در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان واقع شده است. شکل ۱ موقعیت سد زاینده‌رود را نشان می‌دهد. در جدول ۱ نیز مشخصات سد زاینده‌رود ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت سد در حوضه آبریز زاینده رود.

جدول ۱- مشخصات عمومی سد زاینده‌رود.

مشخصات	سد زاینده‌رود
نوع سد	بتنی دو قوسی
ارتفاع از کف (m)	۸۸
طول تاج (m)	٤٥٢
حجم کل (MCM)	١٤٥٠
حجم مفید (MCM)	١٢٥٠
حجم آب قابل تنظیم سالیانه (MCM)	١٦٨٠
ظرفیت نیروگاه	٥٥ مگا وات
سطح زیر کشت	١٧٥٠٠٠ هکتار

بهینه‌سازی خروجی مخزن سد (مدل بهینه‌ساز)

به منظور مدلسازی مسئله بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بایستی تابع هدف و قیودات مسئله تعریف شوند. معیار سنجش پاسخ‌ها مقایسه آن‌ها با نیاز پایین‌دست و بهترین مقدار برای ذخیره در ماه‌های مختلف سال است. رهاسازی از مخزن در هر دوره به عنوان متغیر تصمیم و حجم ذخیره و ورودی به مخزن در هر دوره متغیر حالت می‌باشند. اطلاعات ورودی به مدل شامل حجم جریان ورودی، ارتفاع تبخیر، ارتفاع بارش و حجم نیازها به‌صورت ماهانه می‌باشد. تابع هدف بهینه‌سازی به صورت کمینه‌سازی کل کمبود (کشاورزی، زیست محیطی، صنعت و...) در

www.SID.ir

Archive of SID

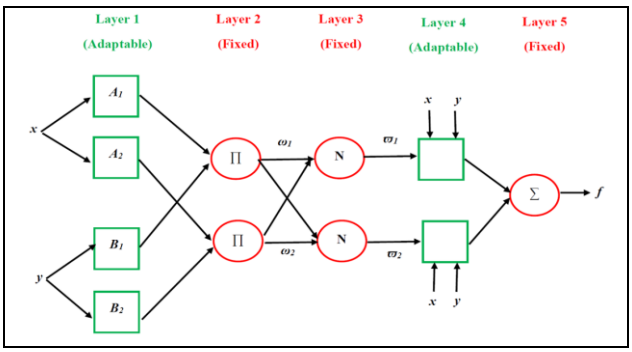
طول دوره آماری تعریف گردید. متغیرهای تصمیم، مقادیر خروجی ماهانه از مخزن سد هستند که باید مقادیر بهینه آن‌ها تأمین گردد. تابع هدف مخزن مورد بررسی به‌صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$\text{Min} \quad \sum_{t=1}^{T}\left(\frac{Re_t - De_t}{De_{max}}\right)^2 : \text{for } t = 1,...,T \qquad [۱]$$

که در آن Re_t حجم رهاسازی از مخزن سد در ماه t، De_t مقدار نیاز پایین‌دست سد در ماه t، De_{max} بیشترین نیاز سد در طول دوره بهره‌برداری، T طول دوره بهره‌برداری و $Penalty_t$ مقدار جریمه‌ای که در صورت ارضا نشدن قید حجم مخزن در سد در ماه t، در تابع هدف اعمال می‌شود. قیودات مسئله بهینه‌سازی مربوط به حجم سرریز، میزان رهاسازی و حجم ذخیره مخزن نیز لحاظ گردیده است (قادری و همکاران، ۲۰۱۷).

مدل‌های عصبی– فازی تطبیقی (انفیس)

این سیستم توسط یانگ (۱۹۹۶) بسط یافته است. ساختار ظاهری مدل‌های عصبی ـ فازی تطبیقی مانند مدل‌های شبکه عصبی می‌باشد یعنی دارای ساختار شبکه‌ای و لایه‌ای است. شکل ۲ شمای کلی این مدل‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، این مدل‌ها دارای پنج لایه کلی می‌باشند که در ادامه به معرفی هریک از این لایه‌ها پرداخته خواهد شد.



شکل ۲– شمای کلی از یک مدل عصبی ـ فازی تطبیقی (جانگ ۱۹۹۳).

لایه اول: این لایه به نام لایه ورودی موسوم است. در این لایه، مقادیر قطعی و غیرفازی مورد نظر که مدل برای آنها ساخته می‌شود، وارد می‌شوند و بر اساس تابع عضویتی که در نظر گرفته می‌شود، به صورت فازی در می‌آیند. در این لایه، ورودی‌های غیرفازی به یک دوتایی مرتب تبدیل می‌شوند. بنابراین می‌توان فازی‌سازی عدد قطعی x را به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \qquad [۲]$$

در این رابطه، $\mu_{A_i}(x)$ تابع عضویت مورد نظر و O_i^1 خروجی لایه اول می‌باشد.

لایه دوم: در این لایه، استنتاج فازی انجام می‌پذیرد. یعنی اپراتورهای "و" و یا اینکه "یا"ی فازی (بسته به قانون تعریف شده در مدل) بر داده‌های فازی شده اعمال می‌گردد و طبق قانون تعریف شده، تصمیم‌گیری انجام می‌شود. به عبارت بهتر می‌توان گفت که ارضای قوانین بررسی می‌شود. از این مرحله تحت عنوان شلیک مقاومت یاد می‌شود. خروجی این مرحله را می‌توان به صورت رابطه زیر نمایش داد:

$$O_i^2 = \omega_i = \mu_{A_i}(x)\,\mu_{B_i}(y) \qquad i = 1,2 \qquad [۳]$$

لایه سوم: در این لایه، عملیات نرمال کردن خروجی‌های لایه دوم انجام می‌پذیرد. هدف اصلی از نرمال کردن خروجی‌های مذکور، تعیین سهم هر قانون نسبت به سایر قانون‌ها در مرحله استنتاج می‌باشد. خروجی این مرحله را می‌توان به شکل رابطه زیر نمایش داد:

$$O_i^3 = \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_i \omega_i} \qquad i = 1,2 \qquad [۴]$$

لایه چهارم: در این لایه، خروجی‌های لایه سوم به عنوان ضرایب وزنی در تابع خروجی رابطه پیشنهادی سوگنو ضرب می‌شود تا سهم هر قانون در قوانین مربوطه نیز اعمال گردد. خروجی این لایه را نیز می‌توان به صورت رابطه زیر نشان داد:

$$O_i^4 = \bar{\omega}_i . f_i = \bar{\omega}_i . (p_i . x + q_i . y + r_i) \qquad [۵]$$

www.SID.ir

Archive of SID

لایه پنجم: این لایه به عنوان مرحله پایانی است و خروجی‌های نهایی از آن خارج می‌شود. در این مرحله با استفاده از رابطه زیر، خروجی‌های فازی از این حالت خارج شده و به شکل قطعی در می‌آیند.

$$O_i^5 = f(x,y) = \sum_i \bar{\omega}_i f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \qquad [٦]$$

معرفی مدل ترکیبی عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) و الگوریتم فراکاوشی

طراحی و آموزش سیستم‌های عصبی- فازی تطبیقی (انفیس) معمولاً با استفاده از رویکردهای کلاسیک، نظیر گرادیان نزولی و پس انتشار انجام می شود. اما در این تحقیق، به عنوان یک رویکرد جدید از الگوریتم‌های فراکاوشی در طراحی بهینه سیستم‌های فازی از نوع تاکاگی-سوگنو-کانگ[۱] استفاده می‌شود. در واقع، ساختار انفیس بر مبنای یک سیستم استنباط فازی است که پارامترهای بخش فرض و نتیجه قوانین اگر- آنگاه فازی توسط یک مدل شبکه عصبی تنظیم می‌شود. از آنجا که الگوریتم یادگیری شبکه عصبی مبتنی بر استفاده از روشهای بهینه‌سازی بر مبنای شیب توابع می‌باشد، امکان محبوس شدن جواب نهایی الگوریتم یادگیری و نتیجتاً پارامترهای تنظیم شده در نقاط بهینه موضعی وجود دارد. بنابراین استفاده از روشهای جستجو یا بهینه‌سازی فراکاوشی نظیر الگوریتم ژنتیک (GA)، مجموعه ذرات (PSO)، تفاضل تکاملی (DE)، جستجوی هارمونی (HS) و جستجوی ذرات باردار (CSS)، برای کاهش مشکل فوق قابل بررسی است. مدل سیستم انفیس-الگوریتم فراکاوشی توسعه یافته در این تحقیق یک سیستم استنباط فازی از نوع سوگنو می‌باشد که پارامترهای شکل توابع عضویت و بخش نتیجه قوانین فازی آن توسط الگوریتم‌های مورد اشاره تنظیم و بهینه سازی می‌شوند. نحوه کار مدل ترکیبی مانند انفیس می‌باشد، با این تفاوت که الگوریتم‌های فراکاوشی یک روش جستجوی تصادفی بوده و امکان محبوس شدن جواب (مقادیر پارامترهای تنظیم) در نقاط بهینه موضعی در آن کمتر می‌باشد. در مدل ترکیبی نیز روند بهینه‌سازی پارامترها بر اساس استفاده از یک مجموعه‌ای از داده‌های ورودی- خروجی است. براساس این داده‌ها پارامترهای توابع عضویت و بخش نتیجه قوانین اگر- آنگاه سیستم فازی استنتاجی در آن به گونه‌ای انتخاب می‌شود که مقدار خطای مدل در برآورد داده‌های متغیر خروجی یا همان متغیر بخش نتیجه قوانین فازی حداقل باشد. بنابراین باید به این نحو تمامی مقادیر بهینه پارامترهای موجود در یک سیستم فازی استنتاجی که در واقع همان پیچ‌های تنظیم سیستم می‌باشد را تعیین کرد. مراحل توسعه یک مدل بهره-برداری از مخزن سد بر مبنای سیستم ترکیبی عصبی فازی تطبیقی (انفیس) و ٥ الگوریتم بهینه‌سازی فراکاوشی به طور خلاصه به شرح زیر می باشد:

۱. دریافت اطلاعات ورودی سامانه مخزن (حجم ورودی به مخزن، حجم ذخیره شده مخزن و نیاز پایین دست) و خروجی‌های بهینه بهره‌برداری بدست آمده از مدل بهینه‌ساز در طی یک دوره بلند مدت بهره‌برداری، به عنوان داده‌های ورودی برای سیستم ترکیبی عصبی فازی تطبیقی (انفیس)

۲. ساخت مجموعه داده‌های مربوط به بخش آموزش[۲] و بخش آزمون [۳] مدل انفیس

۳. ایجاد یک سیستم فازی پایه[٤] با استفاده از روش FCM[٥] با سه متغیر ورودی «حجم ورودی به سد»، «حجم مخزن» و «حجم تقاضا» و یک متغیر خروجی «حجم خروجی از سد»

[۱] Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

[۲] Train

[۳] Test

[٤] Initial FIS

[٥] Fuzzy C-means (FCM) clustering

www.SID.ir

Archive of SID

٤. استخراج کلیه پارامترهای توابع عضویت[۱] مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم فازی پایه
٥. تعیین یک بازه مناسب تغییرات برای پارامترهای توابع عضویت
٦. تعیین تابع هزینه به صورت میانگین مجذور مربعات خطای حاصل از مدل فازی آموزش داده شده با خروجی‌های واقعی
۷. تنظیم پارامترهای سیستم فازی پایه با توجه به تابع هزینه مدلسازی توسط الگوریتم بهینه سازی فراکاوشی
۸. برگرداندن سیستم فازی دارای بهترین مقادیر پارامترهای تنظیم به عنوان نتیجه نهایی یک سیستم عصبی فازی تطبیقی بهینه

در ادامه با استفاده از داده‌های مربوط به سد زاینده‌رود از قبیل حجم ماهیانه ورودی به مخزن سد، حجم تقاضا و حجم مخزن در طی ۲۰ سال آماری، دو نوع مدل بهره‌برداری زیر تهیه شد:

۱. توسعه مدل بهره‌برداری توسط انفیس با استفاده از خروجی‌های سد بدست آمده از مدل بهینه‌ساز
۲. توسعه مدل ترکیبی بهره‌برداری توسط انفیس و الگوریتم فراکاوشی با استفاده از خروجی‌های سد بدست آمده از مدل بهینه‌ساز

در توسعه تمامی مدل‌ها از ۸۰٪ داده‌ها به طور تصادفی برای آموزش و ۲۰٪ باقیمانده برای تست استفاده شده است و نهایتاً عملکرد مدل‌های مختلف ساخته شده با استفاده از معیارهای ارزیابی اعتمادپذیری، برگشت پذیری، آسیب پذیری و پایداری با هم مورد مقایسه قرار خواهد گرفت.

نتایج و بحث

در این بخش به منظور تدوین سیاست‌های بهره-برداری از مخزن سد زاینده رود در سالهای آتی، ابتدا نحوه ساختن ساختار ۲ مدل بهره‌برداری توسط سیستم انفیس و سیستم ترکیبی جدید ارائه شده و در ادامه نتایج مربوط به معیارهای مختلف خطا از جمله مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) در هر دو بخش آموزش و آزمون برای هر دو مدل بهره برداری ارائه می‌گردد و مقادیر خروجی واقعی با خروجی حاصل از مدل مقایسه می‌شود. در پایان با استفاده از معیارهای ارزیابی کارایی شامل معیار اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری به مقایسه عملکرد دو مدل بهره‌برداری پرداخته می‌شود.

توسعه مدل بهره‌برداری توسط انفیس از خروجی‌های سد بدست آمده از مدل بهینه‌ساز (مدل اول)

در اینجا مدل بهره‌برداری بر اساس خروجی‌های بهینه شده مخزن سد زاینده‌رود که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی بدست آمده، استفاده شده است. بر این اساس ابتدا بر اساس تابع هدف کمینه کردن میزان کل کمبود و همچنین قیودات مربوطه مطابق با آنچه که در بخش بهینه‌سازی مخزن سد ذکر گردید، میزان رهاسازی سد در طی ۲۰ سال آماری بدست آمد. سپس حجم رهاسازی بهینه شده به همراه حجم ذخیره مخزن در طی ۲۰ سال آماری به عنوان داده‌های ورودی به سیستم انفیس جهت توسعه مدل بهره‌برداری، در نظر گرفته شد. ساختار سیستم انفیس ساخته شده برای این مدل بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از میزان رهاسازی بهینه سد در طی ۲۰ سال آماری دارای سه ورودی (حجم ورودی به سد، حجم مخزن و حجم تقاضا) و یک خروجی (حجم رهاسازی بهینه از مخزن سد) می‌باشد. در این سیستم، هر یک از ورودی‌ها شامل ٤ تابع عضویت از نوع تابع عضویت زنگوله‌ای می‌باشد. نتایج مربوط به معیارهای مختلف خطا در هر دو بخش آموزش و تست سیستم انفیس ساخته شده در مدل اول، در جدول ۲ آورده شده است. همانگونه که در جدول مشخص است مقدار مجذور میانگین مربعات خطا در مدل اول در دو بخش آموزش و آزمون به ترتیب

[۱] Membership Function parameters

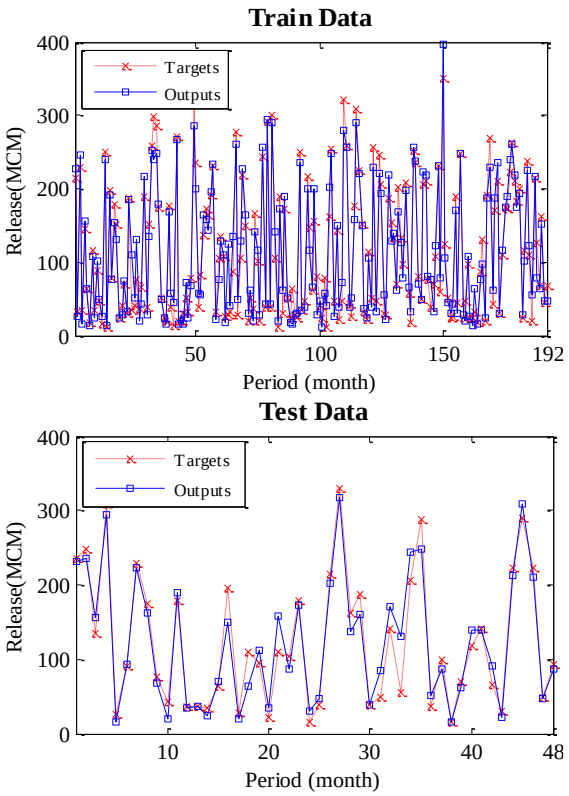
www.SID.ir

Archive of SID

برابر با ۲۱/۱٤ و ۲۲/۳٦ می‌باشد. همچنین در شکل ۳ مقادیر خروجی واقعی (رهاسازی بهینه شده) و خروجی مدل انفیس ساخته شده در بخش آموزش و آزمون در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۲٤۰ ماه) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل‌ها نیز مشخص شده، پیش‌بینی مقادیر رهاسازی در مدل بهره‌برداری ساخته شده نزدیک به مقادیر واقعی می‌باشد لذا می‌توان از این مدل به عنوان یک مدل بهره‌بردار برای بهره‌برداری از سد در سال‌های آتی و تعیین میزان آب رهاسازی با توجه به میزان آورد به مخزن، حجم ذخیره و نیاز پایین‌دست، استفاده کرد.

جدول ۲- معیارهای مربوط به خطای مدل اول.

معیار	مرحله آموزش	مرحله آزمون
میانگین قدرمطلق خطا	۰/۵۰	۰/٤۰
انحراف معیار استاندارد	۲۱/۱۹	۲۲/۵۹
جذر میانگین مربعات خطا (MCM)	۲۱/۱٤	۲۲/۳٦



شکل ۳- مقادیر خروجی واقعی (خروجی مدل بهینه‌ساز) و خروجی مدل اول در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.

توسعه مدل ترکیبی بهره‌برداری توسط انفیس و الگوریتم فراکاوشی از خروجی‌های مدل بهینه‌ساز (مدل دوم)

این مدل همانند مدل اول بر اساس خروجی‌های بهینه شده مخزن سد زاینده‌رود که توسط الگوریتم‌های بهینه‌سازی بدست آمده، ساخته شده است با این تفاوت که بخش آموزش سیستم انفیس، بهبود یافته و به پنج الگوریتم فراکاوشی شناخته شده GA، PSO، DE، HS و CSS سپرده شده است. بر این اساس ابتدا بر اساس تابع هدف کمینه کردن میزان کل کمبود و همچنین قیودات مربوطه مطابق با آنچه که در توسعه مدل بهینه‌ساز ذکر گردید، میزان رهاسازی سد در طی ۲۰ سال آماری بدست آمد. سپس حجم رهاسازی بهینه شده به همراه حجم ذخیره مخزن در طی ۲۰ سال آماری به عنوان داده‌های ورودی به سیستم انفیس ترکیبی جهت توسعه مدل بهره‌برداری، در نظر گرفته شد. در این سیستم ترکیبی، مقادیر بهینه پارامترهای توابع عضویت

www.SID.ir

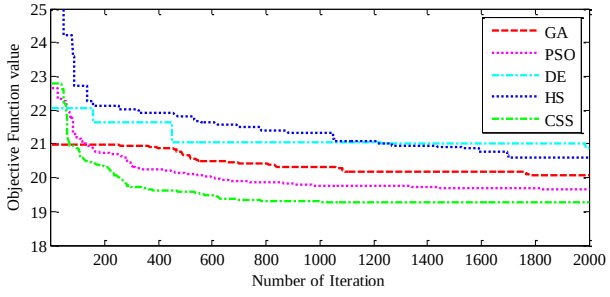
Archive of SID

مربوط به ورودی‌ها و خروجی‌ها توسط الگوریتم‌های فراکاوشی در بخش آموزش استخراج می‌گردد و در نهایت یک مدل بهره‌برداری با استفاده از سیستم ترکیبی انفیس و الگوریتم‌های فراکاوشی و بر اساس داده‌های مرتبط با میزان رهاسازی بهینه شده از سد در طول ۲۰ سال دوره آماری، ساخته می‌شود. همانگونه که قبلاً نیز بیان شد، تابع هدف تعریف شده در ساختار این سیستم برای الگوریتم‌های فراکاوشی، به صورت کمینه کردن مقدار مجذور میانگین مربعات خطای حاصل از مدل فازی آموزش داده شده با خروجی‌های واقعی (مقادیر رهاسازی بهینه شده از سد)، در نظر گرفته شده است. جدول ۳ مقادیر مربوط به معیارهای مختلف خطای مدل دوم بهره‌برداری را با استفاده از پنج الگوریتم فراکاوشی مورد استفاده در ساختار سیستم انفیس، نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص است مقادیر مجذور میانگین مربعات خطای مدل دوم با استفاده از الگوریتم‌های GA، PSO، DE، HS و CSS در بخش آموزش سیستم به ترتیب برابر ۲۰/۰۸، ۱۹/۶۶، ۲۰/۸۷، ۲۰/۵۸ و ۱۹/۲۶ و در بخش آزمون به ترتیب برابر ۲۰/۵۸، ۱۹/۶۹، ۲۱/۰۲، ۲۰/۹۹ و ۲۰/۰۵ می‌باشد که کلیه این مقادیر چه در بخش آموزش و چه در بخش آزمون، از مقادیر متناظر بدست آمده در مدل اول بهره-برداری کمتر است. این امر برتری ساختار بهبود یافته سیستم انفیس با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی را در مقایسه با ساختار انفیس استاندارد نشان می‌دهد. همچنین نتایج بدست آمده از جدول ۳ حاکی از برتری استفاده از الگوریتم CSS در بخش آموزش سیستم انفیس در مقایسه با سایر الگوریتم‌ها دارد به طوریکه خطای مدل بهره‌برداری ساخته شده با استفاده از سیستم ترکیبی انفیس و الگوریتم CSS در هر دو بخش آموزش و آزمون به میزان حدود ۱۰٪ نسبت به مدل بهره‌برداری اول کاهش یافته است.

جدول ۳- معیارهای مربوط به خطای مدل دوم.

الگوریتم	مرحله آموزش			مرحله آزمون		
	میانگین قدرمطلق خطا	انحراف معیار استاندارد	جذر میانگین مربعات خطا	میانگین قدرمطلق خطا	انحراف معیار استاندارد	جذر میانگین مربعات خطا
GA	۰/۶۷	۱۹/۵۵	۲۰/۰۸	۵/۳۹	۲۰/۶۲	۲۰/۵۸
PSO	۰/۲۹	۱۹/۷۱	۱۹/۶۶	۲/۴۵	۱۹/۷۴	۱۹/۶۹
DE	۱/۰۸	۲۰/۳۸	۲۰/۸۷	۵/۳۷	۲۱/۰۴	۲۱/۰۲
HS	۲/۰۳	۲۰/۵۳	۲۰/۵۸	۲/۲۴	۲۱/۱۰	۲۰/۹۹
CSS	۰/۰۷	۱۹/۳۱	۱۹/۲۶	۱/۲۷	۲۰/۲۷	۲۰/۰۵

شکل ۴ روند همگرایی الگوریتم‌های مورد استفاده در مدل ترکیبی بهره‌برداری مرتبط با خروجی-های مدل بهینه‌ساز را نشان می‌دهد. مطابق شکل، الگوریتم‌های CSS و PSO بعد از ۲۰۰۰ تکرار، بهترین عملکرد را در کاهش خطای مدل بهره‌برداری ساخته شده توسط این سیستم ترکیبی از خود نشان داده است.

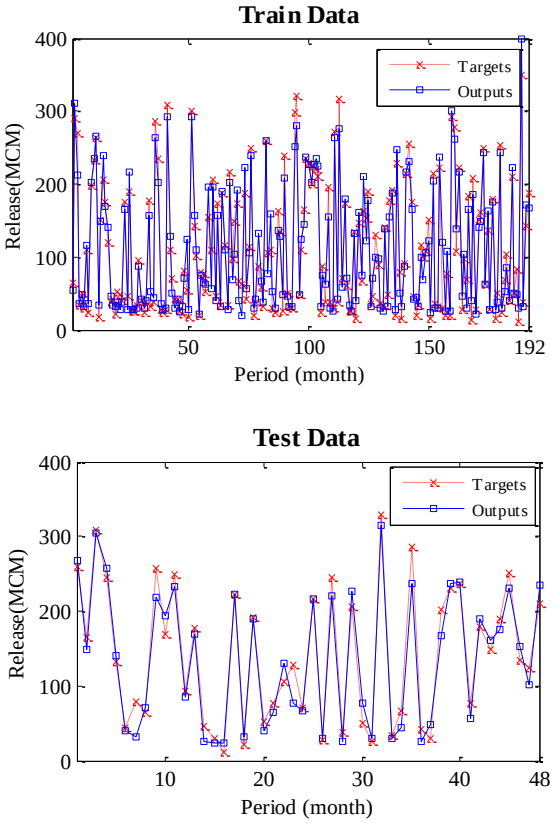


شکل ۴- روند همگرایی الگوریتم‌های مورد بررسی در مدل ترکیبی بهره‌برداری.

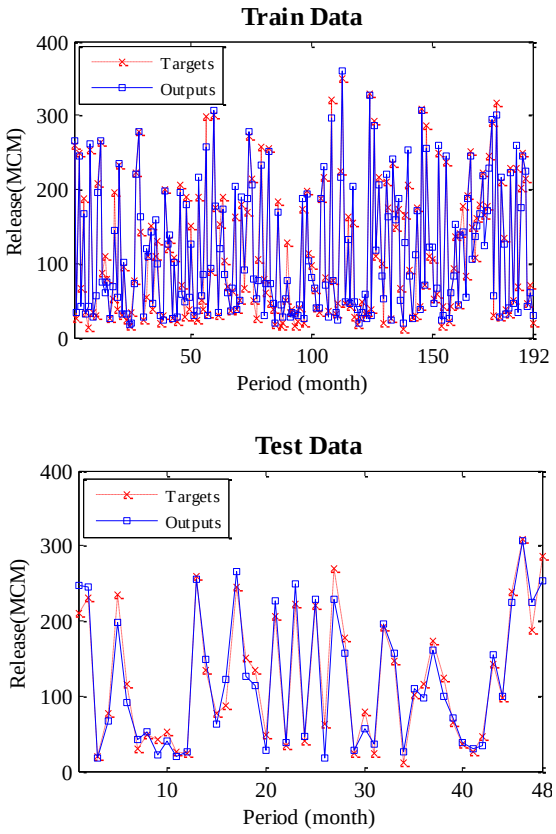
www.SID.ir

Archive of SID

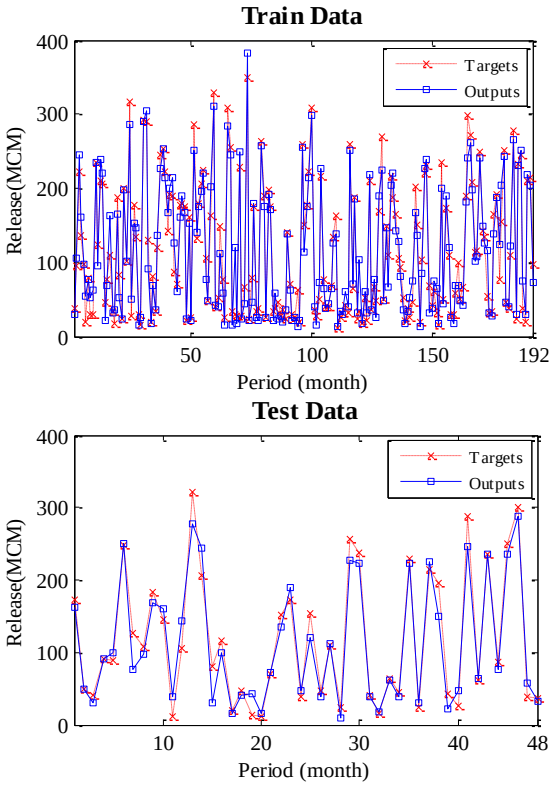
شکلهای ۵ تا ۹ مقادیر خروجی واقعی (مقادیر رهاسازی بهینه شده از سد، خروجی مدل بهینه‌ساز) در برابر خروجی مدل ترکیبی ساخته شده با استفاده از پنج الگوریتم فراکاوشی GA، PSO، DE، HS و CSS در مرحله آموزش و آزمون را در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۲٤۰ ماه) نشان می‌دهند. همانگونه که در شکلها نیز مشخص شده، پیش‌بینی مقادیر رهاسازی در مدل-های بهره‌برداری ساخته شده به ویژه مدل ترکیبی ANFIS-CSS، نزدیک به مقادیر واقعی می‌باشد لذا می-توان از این مدل به عنوان یک مدل بهره‌بردار برای بهره‌برداری از سد در سال‌های آتی و تعیین میزان آب رهاسازی با توجه به میزان آورد به مخزن، حجم ذخیره و نیاز پایین‌دست، با دقت قابل قبولی استفاده کرد.



شکل ۵- مقادیر خروجی واقعی و خروجی مدل ترکیبی (ANFIS-GA) در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.



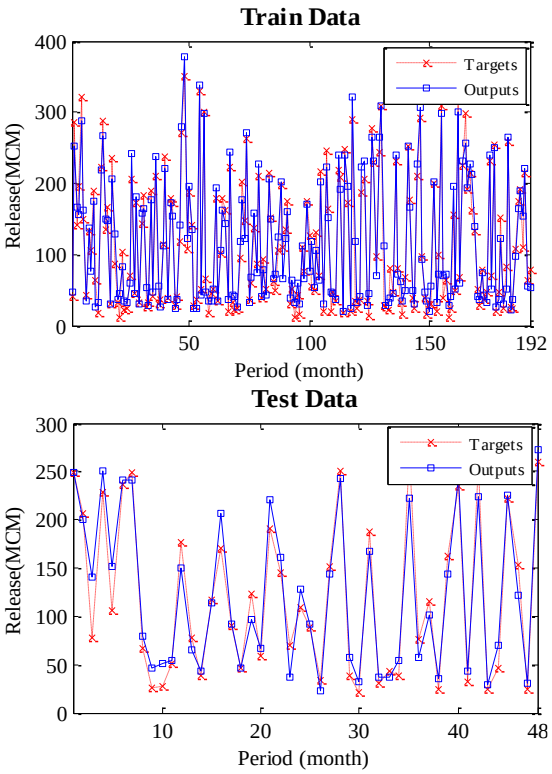
شکل ۶- مقادیر خروجی واقعی و خروجی مدل ترکیبی (ANFIS-PSO) در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.



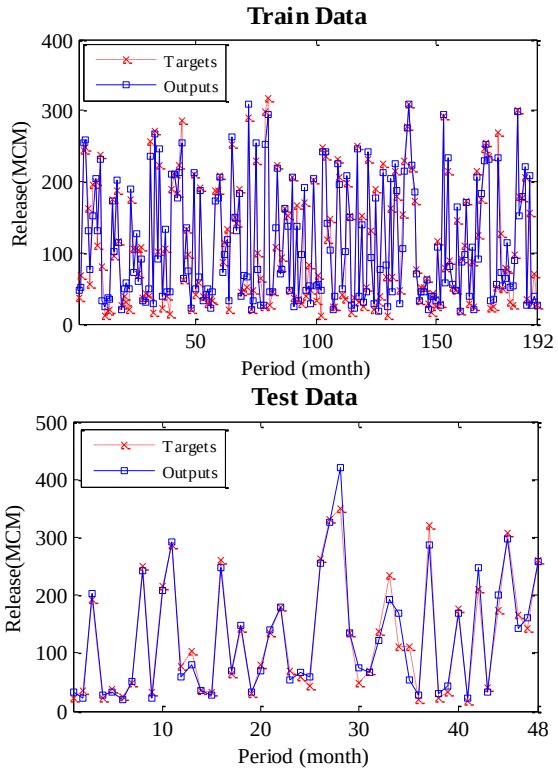
www.SID.ir

Archive of SID

شکل ۷- مقادیر خروجی واقعی و خروجی مدل ترکیبی (ANFIS-DE) در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.



شکل ۸- مقادیر خروجی واقعی و خروجی مدل ترکیبی (ANFIS-HS) در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.



شکل ۹- مقادیر خروجی واقعی و خروجی مدل ترکیبی (ANFIS-CSS) در مرحله الف: آموزش، ب: آزمون.

ارزیابی مدل‌های بهره‌برداری

همان طور که ملاحظه شد در این تحقیق دو مدل بهره‌برداری مختلف برای سد مخزنی زاینده‌رود ارائه شد که نتایج هر یک از مدل‌ها به طور مجزا در قسمت-های قبل ذکر گردید. در این بخش مدل‌های دوگانه و همچنین خروجی‌های تاریخی بهره‌برداری شده مورد تأیید مدیران بهره‌بردار در طی ۲۰ سال دوره شبیه-سازی با معیارهای ارزیابی کارایی مدل با همدیگر مقایسه می‌شوند که در جدول ٤ نشان داده شده است. همچنین در جدول ٤ نتایج حاصل از چهار مدل بهره-برداری از سد زاینده‌رود (فازی، برنامه‌ریزی پویا، فازی- پویا و رگرسیون فازی) که حاصل از تحقیقات صفوی و همکاران (۲۰۱۳) بوده، ارائه شده است. مطابق نتایج حاصل از بخش‌های قبلی، در این جدول برای مدل بهره‌برداری دوم نتایج حاصل از سیستم برتر ترکیبی یعنی ANFIS-CSS ارائه شده است. در اینجا شکست به صورت عدم تحقق تأمین تقاضا به میزان حداقل ۹۰٪ تقاضای هر ماه تعریف شده است. معیارهای ارزیابی کارایی مدل شامل معیار اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری می‌باشد. مطابق نتایج حاصل از معیار اعتمادپذیری در جدول ٤، مدل دوم بهترین عملکرد را از خود نشان داده است. به عبارت دیگر تعداد ماه‌هایی که در این مدل با عدم موفقیت مواجه می‌شوند کمتر از سایر مدلهای بهره‌برداری می‌باشند. بر این اساس درصد اعتمادپذیری حجمی برای سیستم ترکیبی ANFIS-CSS مقدار ۹۵/۹۹ و درصد اعتمادپذیری زمانی ٦۸/۳۳ می‌باشد. علت بیشتر بودن این معیار در مدل دوم نسبت به مدل اول را می‌توان به آموزش خوب سیستم و ایجاد قوانین مناسب در بهره-برداری با توجه به تغییرات در ساختار سیستم انفیس و استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی در بخش آموزش

www.SID.ir

Archive of SID

این سیستم دانست. با توجه به بهبود عملکرد بخش آموزشی سیستم ترکیبی انفیس و الگوریتم‌های فراکاوشی، لذا خروجی این سیستم ترکیبی نسبت به سیستم انفیس کلاسیک، به داده‌های اصلی مورد استفاده در ساخت آن نزدیکتر می‌باشد. مقادیر معیار آسیب‌پذیری در جدول ٤ نشان دهندهٔ کمتر بودن آسیب‌پذیری مدل دوم نسبت به مدل اول بهره‌برداری ساخته شده و همچنین خروجی‌های تاریخی بهره-برداری شده می‌باشد. علت پایین‌تر بودن این معیار در این مدل را می‌توان به دلیل ایجاد قوانین بهتر فازی که به صورت خودکار و بر طبق آموزش سیستم با استفاده از الگوریتم‌های فراکاوشی می‌باشد، دانست. معیار برگشت‌پذیری بالای یک مدل نشان می‌دهد که در آن مدل بهره‌برداری مدت زمان برگشت از حالت شکست به حالت رضایت بخش کمتر از سایر مدل-هاست. در واقع هر چه درصد برگشت‌پذیری بیشتر باشد نشان دهندهٔ مدت زمان کمتر برگشت از حالت شکست به حالت رضایت‌بخش می باشد. بر این اساس سیستم ترکیبی ANFIS-CSS در مدل دوم بهترین عملکرد را در برگشت‌پذیری دارا می باشد. در نهایت مقادیر معیار پایداری در جدول ٤ که ترکیبی از معیارهای فوق می‌باشد نشان دهندهٔ بالاتر بودن پایداری محسوس مدل دوم نسبت به دو مدل دیگر می-باشد. علت پایداری بیشتر مدل دوم به دلیل بالاتر بودن معیار اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و پایین بودن آسیب-پذیری می‌باشد. همانگونه که در جدول ٤ مشاهده می-شود بر اساس مجموع معیارهای ارزیابی، بهترین مدل ارائه شده توسط صفوی و همکاران (۲۰۱۳)، مدل ترکیبی فازی- برنامه ریزی پویا با معیار پایداری ۰/۲٤ می‌باشد که در مقایسه با مدل ترکیبی ANFIS-CSS عملکرد پایین‌تری از خود نشان داده است. در جدول ٥ مقادیر حجم آب تأمین نشده در مقابل حجم آب رهاسازی شده از مخزن در دو مدل بهره‌برداری ساخته شده و همچنین خروجی‌های تاریخی بهره-برداری شده مورد تأیید مدیران بهره‌بردار در طی ۲۰ سال دوره شبیه‌سازی مخزن سد زاینده‌رود آمده است. همان‌طور مشاهده می‌شود حجم رهاسازی آب در مدل-های مختلف در طی ۲۰ سال دورهٔ شبیه‌سازی متفاوت هستند که کمترین آن‌ها مربوط به مدل اول می‌باشد و همچنین بیشترین حجم آب تأمین نشده نیز مربوط به خروجی‌های تاریخی بهره‌برداری شده مورد تأیید مدیران بهره‌بردار می‌باشد. مدل دوم کمترین میزان آب تأمین نشده را در طول ۲۰ سال در بین مدل‌ها را به خود اختصاص داده است که این مزیت در کنار بالاتر بودن معیار پایداری به کارایی مناسب مدل بهره‌برداری با استفاده از سیستم ترکیبی انفیس و الگوریتم‌های فراکاوشی دلالت می‌کند. همانگونه که مشاهده می‌شود با توجه به مقادیر جدول، حجم آب تأمین نشده بر اساس میزان رهاسازی‌های انجام شده در طی سال های ٦۹-۱۳٦۸ تا ۸۸-۱۳۸۷ به مقدار ٥٤۰٥ میلیون متر مکعب است.

جدول ۴- معیارهای ارزیابی مدل‌های بهره‌برداری.

مدل بهره‌برداری	اعتمادپذیری (درصد)		آسیب‌پذیری	برگشت‌پذیری	پایداری
	حجمی	زمانی			
خروجی بهره‌برداری شده	۹۱/۵۲	٤٥/٤۲	۰/٦٦	۰/۱٥	۰/۰۷
مدل اول	۹٥/۷۱	٦۷/۰۸	۰/۳۹	۰/۲۷	۰/۱۸
مدل دوم (ANFIS-CSS)	۹٥/۹۹	٦۸/۳۳	۰/۲۸	۰/٤۳	۰/۳۰
نتایج بدست آمده از تحقیق صفوی و همکاران (۲۰۱۳)					
مدل فازی	-	٦٥/۱۰	۰/۳۹	۰/٤۰	۰/۲۳

www.SID.ir

Archive of SID

مدل برنامه‌ریزی پویا	–	٦٠/٤٠	۰/۵۰	۰/۳۱	۰/۱۸
مدل فازی– پویا	–	٦٤/۰۰	۰/۳۷	۰/٤۰	۰/۲٤
مدل رگرسیون فازی	–	٦۳/۰۰	۰/۳۷	۰/۳٦	۰/۲۲

جدول ۵– مقادیر حجم آب تأمین نشده در مقابل حجم آب رهاسازی شده از مخزن در مدل‌های بهره‌برداری.

مدل بهره‌برداری	حجم آب تأمین نشده طی ۲۰ سال (MCM)	حجم رهاسازی طی ۲۰ سال (MCM)
خروجی بهره‌برداری شده	٥٤۰٥	۲۹۸٦٥
مدل اول	٤۲٥٦	۲۷۹٦۹
مدل دوم (ANFIS-CSS)	۳۲٤۷	۲۸۰٥۷

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق با استفاده از سیستم‌های عصبی– فازی تطبیقی و با توجه به این نکته که بهره‌برداری انجام گرفته در طول سالهای گذشته بهره‌برداری از سد (۲۰ سال دوره آماری شبیه‌سازی شده) مورد تأیید مدیران بهره‌بردار بوده، مدل‌های بهره‌برداری از مخزن سد ایجاد شد. در این راستا ضمن معرفی یک سیستم ترکیبی جدید از انفیس و الگوریتم‌های فراکاوشی به منظور بهبود عملکرد آموزش سیستم، دو نوع مدل بهره‌برداری تهیه شد. در نهایت عملکرد این مدل‌ها با استفاده از معیارهای مختلف از جمله اعتمادپذیری، برگشت پذیری، آسیب پذیری و انعطاف پذیری در مقایسه با خروجی‌های تاریخی بهره‌برداری شده مورد تأیید مدیران بهره‌بردار مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق نتایج بدست آمده، میزان اعتمادپذیری حجمی و پایداری مدل اول بهره‌برداری به ترتیب برابر ۹۵/۷۱٪ و ۰/۱۸ بود. همچنین میزان اعتمادپذیری حجمی مدل دوم بهره‌برداری برای ترکیب‌های انفیس با الگوریتم CSS به عنوان سیستم ترکیبی برتر برابر ۹۵/۹۹٪ بوده و معیار پایداری نیز برابر با ۰/۳۰ می‌باشد. با توجه به این که هر یک از مدل‌ها در کل دورهٔ شبیه‌سازی حجم خروجی متفاوتی دارند، میزان کل کمبود در طی ۲۰ سال برای مدل‌های مختلف محاسبه شد. نتایج حاکی از این بود که مدل دوم کمترین کمبود آب را نسبت به دو مدل دیگر دارا است. همچنین برای این که بتوان ترکیبی از سه معیار اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری داشت و بتوان قضاوت بر روی مدل‌های بهره‌برداری را براساس یک معیار واحد انجام داد، از معیار پایداری نیز در این تحقیق استفاده شده است. که از بین دو مدل تهیه شده و همچنین خروجی‌های تاریخی بهره‌برداری شده مورد تأیید مدیران بهره‌بردار، مدل دوم ساخته شده توسط سیستم ترکیبی انفیس و الگوریتم‌های فراکاوشی با استفاده از داده‌های بهینه شده (خروجی مدل بهینه-ساز) بیشترین پایداری را دارا بود.

منابع مورد استفاده

Afshar MH and Hajiabadi R, 2018. A novel parallel cellular automata algorithm for multi-objective reservoir operation optimization. Water Resources Management 32(2): 785-803.

Banibashar M, Alami MT and Abbasi H, 2011. Optimum exploitation of multi- purpose Alavian Dam reservoir using ant colony algorithm. Water and Soil Science- University of Tabriz 20(4): 1-13. (In Persian)

Bozorg Haddad O, Moravej M and Loáiciga HA, 2014. Application of the water cycle algorithm to the optimal operation of reservoir systems. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 141(5): 0401-4064.

www.SID.ir

Archive of SID

Dinpazhoh Y, Sattari MT, Ebrahimi S and Darbandi S, 2017. Optimum operation of reservoir using the genetic algorithm and particle swarm optimization (case study: Alavian Dam). Water and Soil Science-University of Tabriz 27(2): 17-29. (In Persian)

Ehteram M, Mousavi SF, Karami H, Farzin S, Emami M, Othman FB, Amini Z, Kisi O and El-Shafie A, 2017. Fast convergence optimization model for single and multi-purposes reservoirs using hybrid algorithm. Advanced Engineering Informatics 32: 287-298.

Jang JSR, 1993. ANFIS: Adaptive Network Based Fuzzy Inference System. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetices 23(3): 665-683.

Qaderi K, Akbarifard S, Madadi MR and Bakhtiari B, 2017. Optimal operation of multi-reservoirs by water cycle algorithm. Pp. 1-12. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management Thomas Telford Ltd.

Tilmant A, Vanclooster M, Duckstein L and Persoons E, 2002. Comparison of fuzzy and nonfuzzy optimal reservoir operating policies. Journal of Water Resources Planning and Management 128(6): 390-398.

Mehta R and Jain SK, 2009. Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique. Water Resources Management 23(3): 509-529.

Nourani V, Abolvaset N and Salehi K, 2012. A hybrid goal programming method and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System for optimal operation of a multi-objective two-reservoir system. Journal of Iran-Water Resources Research 8(2): 1-11.

Rouzegari N, Hassanzadeh Y and Sattari MT, 2018. Optimization of reservoir operational policy using simulated annealing algorithm (case study: Mahabad reservoir). Water and Soil Science- University of Tabriz 28(1): 173-185. (In Persian)

Safavi HR, Chakraei I, Kabiri-Samani A and Golmohammadi MH, 2013. Optimal reservoir operation based on conjunctive use of surface water and groundwater using neuro-fuzzy systems. Water Resources Management 27(12): 4259-4275.

www.SID.ir