

EXTENDED ABSTRACT

Forecasting Reservoir Inflow and Employing the Combined Genetics-Particle Swarming Optimization Approach for Alavian Reservoir Operation

Hessam Najafi ^{a,*}, Bagher Nikofar ^b, Vahid Nourani ^b, Nazanin Behfar ^b

^a College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, China

^b Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Received: 19 January 2024; **Reviewed:** 03 September 2024; **Accepted:** 05 October 2024

Keywords:

Dam operation curve, Inflow prediction, System dynamics, Optimization, Simulation, Alavian dam.

1. Introduction

Recognizing the pivotal role of water in human life, the accurate estimation of water resource potential and its optimal utilization stands as a crucial and significant concern within the water industry. Furthermore, effective planning and management of reservoirs in dams require a comprehensive understanding of river flow in the upcoming months. Hence, this study involves the prediction of inflow to the dam reservoir, followed by the extraction of the optimal control curve under various scenarios utilizing both simulation and optimization methods. The comparative results between the simulation and optimization approaches in this study hold significance in addressing the comprehensive requirements for drinking, agriculture, environment, and industry. To provide a thorough assessment of both current and future conditions, multiple scenarios, including drought, extreme drought, and normal conditions, have been considered and their outcomes have been juxtaposed.

2. Methodology

2.1. Study area and data

The dataset utilized in this study spans 25 years (from 1997 to 2022), comprising information on the inflow to the Alavian dam reservoir and additional parameters such as precipitation, flow in hydrometric stations, temperature, evaporation, and snow cover within the dam's catchment area. To incorporate the impact of drought in the model, the Standardized Precipitation Index a drought parameter has been computed based on the previous months' rainfall and integrated into the model's input matrix.

2.2. Methodology

This study, in its initial phase, aims to predict the incoming water flow for the next year into the Alavian dam reservoir using an artificial intelligence model, specifically the artificial neural network (Antar et al., 2006). Simultaneously, efficient utilization of dam reservoirs is identified as a paramount factor in operational management. In the second phase, titled 'Dynamic Systems Modeling,' the Vensim model is employed to

simulate the system's behavior based on predicted runoff and actual consumption. Moving to the third phase, titled 'Optimization,' a combination of optimization algorithms, namely the Genetic Algorithm and Particle Swarm Algorithm, is employed for enhanced operational efficiency.

3. Results and discussion

In the initial phase, the artificial neural network model was employed to determine the runoff entering the reservoir. Subsequently, in the second and third phases, the release volume for various months was computed through dynamic systems modeling and optimization algorithms. The results for the next 12 months, obtained through the Vensim model and the combined optimization algorithm, are presented in Table 1. Additionally, Figures 1 and 2 depict the monthly storage volume and release volume for Alavian dam, respectively, based on the forecast command curve.

Table 1. Results of equation assessment (MCM)

Method	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Sum
Vensim	2.0	1.7	1.8	1.8	1.8	1.9	2.4	10.6	15.7	15.0	7.1	0.6	62.3
Genetic- Particle Swarming	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	2.3	8.5	13.5	13	8	5	60.8

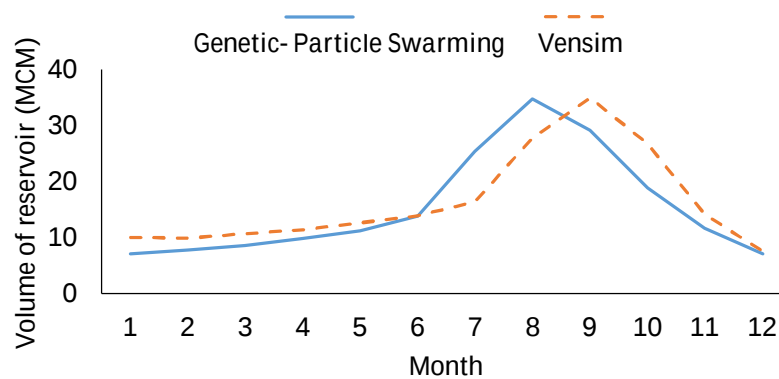


Fig. 1. Monthly storage volume

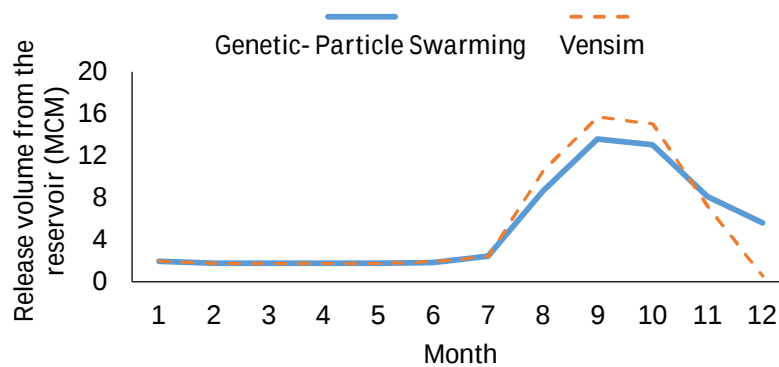


Fig. 2. Monthly release volume

4. Conclusions

This research encompasses three primary phases: forecasting river flow in the upcoming water years, dynamic systems modeling, and optimization of the command curve. In the prediction phase, modeling was conducted employing artificial neural network model to forecast dam inflow. The results indicate that the artificial neural network model exhibits strong performance in forecasting, particularly in the time steps of one to three months. For dynamic systems modeling using Vensim software, a cause-and-effect model was designed and employed to explore various scenarios of Alavian Dam exploitation. In the optimization phase, a combined algorithm of genetic algorithms and particle swarm was investigated as meta-heuristic method. The outcomes reveal that the combined algorithm demonstrates the effective performance in optimizing the operation of Alavian Dam.

پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن و استفاده از ترکیب بهینه‌سازی ازدحام ذرات ژنتیک در بهره‌برداری از سد علویان

حسام نجفی^{1*}، باقر نیکوفر²، وحید نورانی³، نازنین بهفر⁴

¹ پژوهشگر پسادکتری دانشکده مهندسی و علوم محیط زیست، دانشگاه نانکای، چین

² دانشجوی دکتری مهندسی عمران- مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز

³ استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

⁴ فارغ‌التحصیل دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

دریافت: 1402/10/29، بازنگری: 1403/6/13، پذیرش: 1403/7/14، نشر آنلاین: 1403/7/14

چکیده

برای مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن سدها، برآورد دقیق آبدی رودخانه در ماه‌های آینده با استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی و الگوریتم‌های فراابتکاری ضروری است. هدف این مطالعه در فاز اول، پیش‌بینی جریان ورودی سال آینده به مخزن سد علویان با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی بوده است. باتوجه به این‌که بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مدیریتی در دوران بهره‌برداری محسوب می‌شود، در فاز دوم این پژوهش تحت عنوان مدل‌سازی سیستم‌های پویا، از مدل ونسیم (Vensim) برای شبیه‌سازی رفتار سیستم با استفاده از رواناب پیش‌بینی شده و مصارف واقعی استفاده شده است. در فاز سوم، برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان، از ترکیب الگوریتم‌های بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ازدحام ذرات) بهره گرفته شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که فاز پیش‌بینی دقت مناسبی داشته‌است. جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های مورد بررسی در بهره‌برداری بهینه از مخزن، از شاخص‌های عملکرد مخزن استفاده شده است. در تحلیل‌های کوتاه‌مدت، شاخص قابلیت اعتماد حجمی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی، 72 درصد برای سناریوی 100 درصدی تأمین نیاز کشاورزی و 94 درصد برای سناریوی 80 درصدی تأمین نیاز کشاورزی بوده، درحالی‌که شاخص قابلیت اعتماد حجمی مدل ونسیم 75 درصد برای سناریوی 100 درصدی و 83 درصد برای سناریوی 80 درصدی تأمین نیاز کشاورزی به‌دست آمده است. بنابراین، با استفاده از الگوریتم ترکیبی، منحنی‌های فرمان رهاسازی و حجم مخزن برای 12 ماه بعد بر اساس ورودی‌های پیش‌بینی شده تهیه و ارائه گردیده است.

کلیدواژه‌ها: منحنی فرمان سد، پیش‌بینی رواناب ورودی، پویایی سیستم، بهینه‌سازی، شبیه‌سازی، سد علویان.

1- مقدمه

کشاورزی، صنعت و محیط زیست دارد. در همین راستا، مدیران جهت برنامه‌ریزی منابع آب به خصوص مخازن سدها، نیاز به اتخاذ سیاست‌های بهینه بهره‌برداری دارند. سیاست بهره‌برداری با منحنی فرمان تعریف می‌گردد. لذا باتوجه به تغییرات نیاز آبی پایین‌دست سدها در گذر زمان، تغییرات دبی رودخانه‌ها و میزان بارش در سطح حوضه در اثر تغییر اقلیم و همچنین تغییر در حجم مخازن سدها در اثر رسوب‌گذاری در طول زمان نیاز است که منحنی‌های فرمان بهره‌برداری سدهای کشور به‌روزرسانی شود. برای بهره‌برداری بهینه از یک مخزن ابتدا باید جریان ورودی به

محدودیت منابع آبی در طبیعت، توزیع زمانی و مکانی غیریکنواخت آن‌ها، افزایش آلودگی‌ها، تخریب منابع طبیعی توسط بشر و همچنین افزایش جمعیت و تغییر نحوه زندگی بشر که خود منجر به رشد فزاینده نیازهای آبی شده است، ضرورت برنامه‌ریزی و مدیریت صحیح منابع آب و ذخیره‌سازی آن را تا حد امکان آشکار می‌سازد. منابع آب سطحی در ایران سهم عمده‌ای در تأمین نیاز آبی بخش‌های مختلف شرب،



مخزن پیش‌بینی شده و سپس مقدار تابع هدف و متغیرهای مورد نظر، جهت تأمین نیازهای طرح، بهینه گردند. پیش‌بینی و مدل‌سازی صحیح و دقیق سری‌های زمانی هیدرولوژیکی مانند رواناب رودخانه‌ها، لازمه مدیریت صحیح منابع آب می‌باشد.

مدل‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، مانند مدل شبکه عصبی مصنوعی¹، ابزاری کارآمد برای کارکردن بر روی تعداد وسیعی از داده‌های دینامیکی و غیرخطی می‌باشند، به‌خصوص اگر روابط بین عوامل فیزیکی دخیل در پدیده به‌صورت کامل مشخص نباشد. با توجه به کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در منابع آب، اولین مطالعات منتشر شده در 1990 انجام گرفت و کاربرد شبکه عصبی مصنوعی توسط ASCE برای حل مشکلات منابع آب بیان شد. مدل‌های ANN از جمله روش‌های هوش مصنوعی می‌باشند که حالت خودهمبسته دارند و به‌صورت غیرخطی توانایی کنترل جزء خودهمبسته سری زمانی را دارند. یکی از قابلیت‌های شبکه عصبی مصنوعی ظرفیت و توانایی آن در پیش‌بینی چندین گام بعد می‌باشد. ظرفیت و توانایی بالای شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی چندگامه در بسیاری از زمینه‌ها اثبات شده است و مقالات متعددی از کاربرد موفق ANN در مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی ارائه شده است (به‌عنوان مثال Kim و Valdés, 2003; Antar و همکاران, 2006; Xie و همکاران, 2006; Abrahart و همکاران, 2012; Wei و همکاران, 2012; Yang و همکاران, 2013; Nourani و همکاران, 2014; Chang و Tsai, 2016; Dinu و همکاران, 2017; Mohammadi و همکاران, 2020; Sharghi و همکاران, 2019; Nourani و همکاران, 2021).

در این پژوهش نیز با توجه به اهمیت موضوع مدیریت و بهره‌برداری بهینه از منابع آب‌های سطحی، در فاز مدل‌سازی پژوهش از طریق سری‌های زمانی به مدل‌سازی و پیش‌بینی رواناب ورودی به سد با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی در منطقه مورد مطالعه پرداخته شده است. در مدیریت جامع منابع آب در سطح حوضه، یکپارچه دیدن سیستم و در نظر گرفتن اندرکنش میان اجزای مختلف آن ضروری است. روش پویایی سیستم، یک ابزار مدیریتی بر اساس این نگرش است که علاوه بر تشریح سیستم‌های پیچیده منابع آب براساس واقعیت، امکان دخالت کاربر در توسعه مدل را نیز فراهم می‌آورد. روش پویایی سیستم یکی از روش‌های بسیار مؤثر برای بررسی وضعیت سیستم‌ها می‌باشد که یکی از روش‌های قدرتمند و بصری شبیه‌سازی است. مدل‌هایی که با این روش ایجاد می‌شوند با بینش فرآیندهای بازخورد، کاربران سیستم را به فهم بهتری از رفتار دینامیکی سیستم‌ها در طول زمان نایل می‌سازند.

ونسیم یک ابزار مدل‌سازی بصری است که این امکان را می‌دهد تا بتوان مدل‌های سیستم‌های پویا را مفهوم سازی، شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل و بهینه‌سازی کرد. مدل پویایی سیستم، مدل‌های ریاضی علت و معلولی هستند که فرض اساسی آن‌ها شبیه‌سازی و در نتیجه قابل پیش‌بینی بودن رفتار یک سیستم در صورت ارائه دقیق ساختار آن می‌باشد. با توجه به موارد فوق و ضرورت شرایطی که بتوان به‌سمت مدیریت جامع و یکپارچه از سیستم‌های تک‌مخزنی دست یافت، ارائه سیاست‌هایی که بتواند بهره‌برداری را جهت اخذ تصمیم مناسب جهت رهاسازی بهینه آب از سیستم‌های تک‌مخزن هدایت نماید، ضروری می‌باشد. مدل‌سازی سیستم‌های پویا در برخی از مطالعات به‌کار گرفته شده و نتایج مناسبی حاصل شده است (به‌عنوان مثال Hassanzadeh و همکاران, 2014; Ghashghaie و همکاران, 2014; Zarghami و Rahmani, 2015; Yang و همکاران, 2015).

بنابراین در پژوهش حاضر در فاز دوم، به‌منظور بهره‌برداری مناسب و مدیریت صحیح آب پشت مخزن جهت تأمین نیازهای کشاورزی، شرب، صنعت و محیط زیست، از روش پویایی سیستم و محاسبه منحنی فرمان آن در نرم‌افزار ونسیم استفاده شده است. بدین منظور در این پژوهش مدل سیستم منابع آب سد علویان با در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر بر معادله بیلان آبی سد جهت برآورد مقادیر خروجی از سد (سرریز از سد و نیازهای آب شهری و صنعتی، کشاورزی و همچنین نیاز زیست‌محیطی دریاچه ارومیه) در محیط مدل ونسیم شبیه‌سازی شده است.

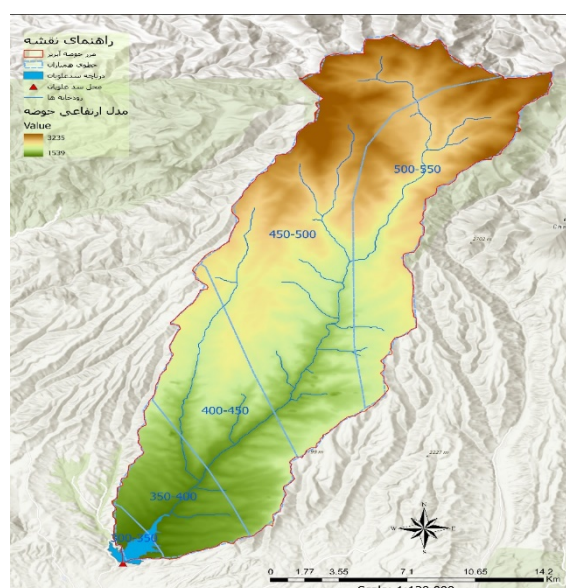
به‌منظور تعیین مقادیر بهینه پارامترهای منحنی‌های فرمان از قبیل حجم رهاسازی و حجم مخزن، به‌کارگیری روش‌های بهینه‌سازی لازم و ضروری است. روش‌های بهینه‌سازی یا به‌طور مستقیم جهت بهره‌برداری بلندمدت به‌کار گرفته می‌شوند و یا می‌توان از آن‌ها جهت تعیین پارامترهای بهره‌برداری به‌هنگام برای یک سال آبی جاری که در این تحقیق هدف ترسیم منحنی‌های فرمان بهره‌برداری برای تصمیم‌گیری مدیر سد علویان می‌باشد، استفاده نمود. در میان انواع روش‌های بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک² به‌دلیل قابلیت کارکرد در فضاهای جستجوی گسترده و توانایی اکتشاف مناطق جدید در فضای جستجو، از جمله فرصت‌های بزرگی برای بهینه‌سازی محسوب می‌شود. از سوی دیگر، الگوریتم ازدحام ذرات³ به‌دلیل سرعت و کارایی در همگرایی سریع به نقاط بهینه، به‌عنوان یک الگوریتم پراکنده با عملکرد خوب در مسائل بهینه‌سازی معروف است. ترکیب این دو الگوریتم نیز می‌تواند ترکیبی از قابلیت‌های اکتشافی و توانایی همگرایی سریع را در بهینه‌سازی مسائل پیچیده ارائه دهد، که این امر می‌تواند به بهبود عملکرد و کارایی بهینه‌سازی کمک کند. با توجه

خشکسالی، خشکسالی شدید و نرمال در نظر گرفته شده و نتایج از نظر معیارهای رایج ارزیابی مانند قابلیت اطمینان و آسیب پذیری با یکدیگر مقایسه شده است.

2- مواد و روش‌ها

2-1- منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبریز سد علویان واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت 275 کیلومترمربع در محدوده‌ای به عرض جغرافیایی 37 درجه و 11 دقیقه تا 38 درجه و 28 دقیقه شمالی و طول جغرافیایی 46 درجه تا 46 درجه و 25 دقیقه شرقی قرار دارد (شکل 1).



شکل 1- حوضه آبریز سد علویان

رودخانه صوفی چای با طول 120 کیلومتر از دامنه‌های جنوب غربی کوه سهند واقع در استان آذربایجان شرقی سرچشمه می‌گیرد و جریان‌های سطحی این رودخانه از مجموع چشمه‌سارهایی که در دامنه سهند ظاهر می‌شوند و همچنین ذوب ذخیره و پوشش برفی این منطقه تأمین می‌شود. جهت رودخانه تقریباً به طرف جنوب بوده و در دره باریک و کم عرض جریان دارد (Mahab Consulting Engineers, 1995).

شاخه فرعی اسپیران چای به طول 13/5 کیلومتر در پایین دست، در محلی به نام کهلک دره‌سی (اسپیران) از طرف راست وارد رودخانه می‌شود. رودخانه صوفی چای بعد از طی مسافتی در حدود 4 کیلومتر از محل اتصال اسپیران، به تازه‌کند قاسم خان می‌رسد. در این محل، ایستگاه هیدرومتری تازه‌کند قرار دارد. شاخه اسفستانج یکی دیگر از شاخه‌های فرعی رودخانه صوفی چای است که در فاصله 2/5 کیلومتری پایین دست تازه‌کند

به موارد فوق و لزوم شرایطی که بتوان در جهت مدیریت بهره برداری بهینه مخازن سدها به روش‌ها و تکنیک‌های نوین دست یافت و ارائه سیاست‌هایی که بتواند بهره‌بردار را در اتخاذ تصمیم مناسب جهت رهاسازی بهینه آب از سیستم مخزن سد در طول یک سال آبی هدایت نماید، ضروری می‌باشد. از این رو، در ادامه نیز و در فاز سوم پژوهش با استفاده از ترکیب الگوریتم‌های بهینه سازی ازدحام ذرات و ژنتیک، پارامترهای بهینه منحنی فرمان از قبیل حجم رهاسازی و حجم مخزن تحت سناریوهای مختلف تعیین شده و بهترین مدل انتخاب گردیده است.

لازم به ذکر است که پیش‌بینی و بهره‌برداری از مخزن سد علویان در برخی از مطالعات بررسی شده است. به عنوان نمونه Ghorbani و همکاران (2015) عملکرد مخزن سد علویان را تحت شرایط اقلیمی دو دوره 2011-2030 و 2046-2065 به وسیله معیار قابلیت اطمینان کمی سازی کردند و نشان دادند که مخزن توانایی لازم برای تأمین نیاز پر اهمیت شرب را بر اساس مبانی طراحی مخزن در برخی از ماه‌ها نخواهد داشت.

در مطالعه‌ای دیگر توسط Misaghi (2016) پیش‌بینی جریان ورودی به سد علویان با استفاده از سیستم تطبیقی فازی- عصبی بهینه شده بررسی شده است. Feizi و همکاران (2023) نیز عملکرد الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش در مقایسه با الگوریتم‌های جستجوی هارمونی اصلاح شده و مجموعه ذرات به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان را بررسی کردند که نتایج به دست آمده حاکی از قابلیت بالای الگوریتم مبتنی بر یادگیری و آموزش در محاسبه مقادیر بهینه آب رهاسازی از مخزن سد علویان با لحاظ حق آبه زیست محیطی بود.

Soudi و همکاران (2019) منحنی فرمان چند سد مخزنی حوضه دریاچه ارومیه از جمله سد علویان را تحت سه سیاست متفاوت بهره‌برداری (30%، 50% و 80% از میانگین جریان سالانه به عنوان حجم آب قابل رهاسازی) محاسبه کردند و نشان دادند که به کار بردن 80% از میانگین جریان سالانه، سناریوی مؤثری بر احیای دریاچه می‌تواند باشد.

از این رو لازم به ذکر است که رویکرد این پژوهش در ترکیب قابلیت‌های شبکه عصبی مصنوعی و سیستم‌های پویا در تدوین منحنی‌های فرمان بهره‌برداری سدها و همچنین ترکیب قابلیت‌های شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم ترکیبی ازدحام ذرات و ژنتیک جهت تعیین پارامترهای بهینه بهره‌برداری مخزن سد علویان برای تدوین منحنی فرمان سد از نوآوری‌های این مطالعه می‌باشند.

بنابراین نتایج مقایسه دو روش شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در این مطالعه می‌تواند در تأمین نیازهای شرب کشاورزی، محیط زیست و صنعت به صورت جامع مفید واقع گردد. برای ارزیابی بهتر شرایط حال و آینده چندین سناریو شامل حالت‌های ترسالی،

2-2- شبکه‌های عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی دسته‌ای از سیستم‌های دینامیکی هستند که با پردازش روی داده‌های تجربی دانش یا قانون نهفته در ورای داده‌ها را به ساختار شبکه منتقل می‌کند، به همین خاطر به این سیستم‌ها هوشمند گویند. ساختار سه‌لایه شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم انتشار برگشتی (Feed Forward Neural Network – FFNN) در اکثر مدل‌سازی‌های سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک الگوی کلی برای نگاشت غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی است (Najafi و همکاران، 2022).

در این تحقیق از سری داده‌های 25 ساله حوضه آبریز سد علویان به صورت ماهانه شامل دبی ورودی به مخزن سد، بارش، دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست مخزن سد، دما، تبخیر و پوشش برف و شاخص‌های خشکسالی در مدل‌سازی پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد استفاده شده است. برای انتخاب داده‌های مؤثر برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سدها، در محیط اکسل بین انواع داده‌های ورودی و داده هدف (جریان ورودی به مخزن سد)، ضریب همبستگی به کمک معیار Correlation محاسبه و انواع حالت‌های مختلف تست و پس از سعی و خطا و مقایسه لازم بین انواع داده‌ها، بهترین داده‌ها که نتایج مناسبی را می‌دادند، انتخاب شدند.

2-3- مدل‌سازی سیستم‌های پویا توسط مدل شبیه‌ساز -

بهینه‌ساز ونسیم

اولین گام در هر پروژه مدل‌سازی سیستم‌های پویا تعیین ساختار سیستم شامل نوع رابطه بین متغیرها، حلقه‌های بازگشتی، ساختارهای تیپ سیستم و تأخیرها است. به این ترتیب مشاهده رفتار یک سیستم بر اساس یک طرح از پیش برنامه‌ریزی شده امکان‌پذیر می‌گردد. به علاوه، رفتار آینده سیستم از روی مدل طراحی شده قابل پیش‌بینی و تعیین می‌باشد. از نظر علمی مدل‌های ریاضی یک ارائه آگاهانه‌تر از مسائلی هستند که با آن‌ها مواجه هستیم. اما شبیه‌سازی پویا به ما امکان می‌دهد که رفتار یک سیستم مدل‌سازی شده و پاسخ آن به هر نوع تغییر در طی زمان را مشاهده کنیم. مدل‌های شبیه‌سازی پویا شامل معادلاتی هستند که تغییرات پویا را شبیه‌سازی می‌کنند (Alami و همکاران، 2014). نرم‌افزار ونسیم یک نرم‌افزار شبیه‌سازی و یک محیط مدل‌سازی گرافیکی شیء‌گرا می‌باشد. در این نرم‌افزار نمودارها با یک سری از زوج معادلات دیفرانسیلی مرتبه اول ساخته می‌شود. در این پژوهش سیستم منابع آب سد علویان با در نظر گرفتن رویکرد پویایی سیستم‌ها و با استفاده از محیط برنامه‌نویسی ونسیم شبیه‌سازی شده است.

قاسم خان وارد آن می‌شود. کمی پایین‌تر از این محل نیز، سد علویان قرار دارد که رودخانه نهایتاً در پایین‌دست سد علویان به دریاچه ارومیه ختم می‌شود (Mahab Consulting Engineers, 1995).

سد علویان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، بر روی رودخانه صوفی چای در 3/5 کیلومتری شمال غربی شهر مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث شده است. سد علویان در سال 1374 به بهره‌برداری رسیده است و نوع سد خاکی با هسته رسی دارای حجم کل اولیه مخزن 60 میلیون مترمکعب شامل 57 میلیون مترمکعب حجم مفید و سه میلیون مترمکعب حجم مرده می‌باشد. در حال حاضر حجم کل مخزن سد علویان در اثر رسوب‌گذاری دوران بهره‌برداری به میزان 3 میلیون مترمکعب کاهش یافته و به 57 میلیون مترمکعب رسیده است و بایستی در برنامه‌ریزی و مدیریت مخزن سد لحاظ گردد. ارتفاع آن از پی 76 متر و طول تاج 935 متر می‌باشد. از اهداف اصلی احداث سد تأمین آب مورد نیاز کشاورزی در محدوده شهرستان‌های مراغه و بناب با وسعتی برابر با 12200 هکتار به عنوان مبنای طراحی و در حال حاضر 6500 هکتار از اراضی منطقه بهبود، تأمین بخشی از آب شرب شهرستان مراغه، تأمین آب مورد نیاز صنایع منطقه و همچنین مهار سیلاب رودخانه صوفی چای و محیط زیست می‌باشد.

بر اساس آمار و اطلاعات، متوسط بارندگی سالانه 350 میلی-متر می‌باشد که حدود 34 درصد بارندگی در زمستان، 35 درصد آن در بهار، 28 درصد در پاییز و در حدود 3 درصد در تابستان می‌باشد. ارتفاع حوضه آبریز، در بالادست سد علویان، از 1547 تا 3440 متر متغیر بوده و ارتفاع متوسط حوضه (ارتفاع مربوط به 50 درصد مساحت حوضه)، 2270 متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. با توجه به اختلاف شدید ارتفاعی درون حوضه، در حدود 89 درصد از بارش‌های این منطقه در بازه زمانی اوایل آبان تا اواخر اردیبهشت که مصادف با ورود جریان‌های مدیترانه‌ای به کشور است، اتفاق می‌افتد (Mahab Consulting Engineers, 1995).

داده‌های مورد استفاده در این بررسی شامل یک سری داده‌های 25 ساله (1376-1401) ماهانه حوضه آبریز سد علویان شامل دبی ورودی به مخزن سد، بارش، دبی جریان در ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست مخزن سد، دما، تبخیر و پوشش برف حوضه آبریز سد می‌باشد. برای این‌که اثر خشکسالی در مدل اعمال گردد، پارامتر خشکسالی تحت عنوان Standardized Precipitation Index-SPI از طریق بارش ماه‌های قبل محاسبه و در ماتریس ورودی‌های مدل لحاظ گردیده است.

2-4- الگوریتم ترکیبی ژنتیک - ازدحام ذرات

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های بهینه‌سازی الهام گرفته از طبیعت است که بر پایه رقابت موجودات زنده برای تصاحب منابع طبیعی محدود استوار است. برتری موجودات پیروز مدیون ویژگی‌های فردی آنان است که تا حد زیادی تحت تأثیر ژن‌های آن‌ها قرار دارد. تولیدمثل چنین موجوداتی سبب تکثیر این ژن‌ها و در نتیجه تولید فرزندانی شایسته خواهد شد. با انجام متوالی انتخاب بهترین اعضا و تولیدمثل آن‌ها، کل جمعیت به سوی سازش بیشتر با محیط یعنی دستیابی به منابع بهتر و بیشتر سوق خواهد یافت. الگوریتم ژنتیک با مدل‌سازی ریاضی چرخه طبیعی فوق، بهینه‌توابع مقید ریاضی را محاسبه می‌نماید. از سوی دیگر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یک الگوریتم بهینه‌سازی دیگری است که برای حل مسائل بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم، یک گروه از ذرات در فضای جستجو حرکت می‌کنند و با توجه به موقعیت و سرعت خود، به دنبال بهبود موقعیت خود در فضای جستجو هستند. هر ذره در هر لحظه، با توجه به موقعیت خود و موقعیت بهترین ذره در گروه، سرعت خود را تغییر می‌دهد و به سمت بهترین موقعیت حرکت می‌کند. این الگوریتم با تکرار این فرآیند، به بهبود موقعیت و پیدا کردن حل بهینه برای مسئله کمک می‌کند (Zarei و Lalehzari, 2023).

در این پژوهش هدف اصلی ترکیب الگوریتم‌های ازدحام ذرات و ژنتیک است و اساس کلی این روش بدین صورت است که مزایای الگوریتم ازدحام ذرات به همراه عملگرهای بسیار سودمند الگوریتم ژنتیک (جهش و تقاطع) ترکیب و الگوریتم ترکیبی به وجود می‌آید. یکی از مزایای الگوریتم ازدحام ذرات نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده بودن و کم بودن پارامترهای آن نسبت به الگوریتم ژنتیک است. تفاوت واضح دیگر توانایی در کنترل همگرایی به جواب بهینه می‌باشد. نرخ عملگرهای جهش و تقاطع می‌تواند به شیوه بسیار مناسبی کمک به همگرایی الگوریتم ژنتیک کند. اما این عملگرها با عملگر استهلاک وزن سرعت الگوریتم ازدحام ذرات متفاوت است و در واقع با کاهش اثر این وزن طی تکرارهای متوالی، باعث افزایش همگرایی الگوریتم می‌شود. یکی از مشکلات اساسی الگوریتم ازدحام ذرات همگرایی زودرس این روش است که این همگرایی لزوماً رسیدن به جواب بهینه نمی‌باشد، برای جلوگیری از این اتفاق، موقعیت ذرات و همچنین بهترین ذره باید تغییر کند و تغییر این موقعیت از طریق همان ترکیب با الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. عملگرهای بسیار کارآمد الگوریتم ژنتیک، عملگر جهش و تقاطع می‌باشند که با به کار گرفتن عملگر تقاطع اطلاعات بین دو ذره از جمعیت مبادله می‌شوند و بدین ترتیب ذره مورد نظر می‌تواند به یک نقطه جدید

در فضای تصمیم منتقل شود. هدف از به کار بردن دومین عملگر مورد نظر (جهش) افزایش گوناگونی و ایجاد تنوع در جمعیت و نهایتاً جلوگیری از رسیدن به جواب بهینه موضعی می‌باشد (Shi و Eberhart, 1998).

2-5- معیارهای ارزیابی

صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی به منظور سنجش دقت مدل‌ها در انجام پیش‌بینی صورت می‌گیرد. برای این منظور آمار-های مختلفی تدوین شده و مورد استفاده قرار می‌گیرند. از پرکاربردترین آن‌ها در مدل‌سازی پیش‌بینی جریان‌های ورودی به مخازن سدها، معیارهای متداول ضریب نش ساتکلیف⁴ و جذر میانگین مربعات خطا⁵ می‌باشند که با توجه به روابط (1) و (2) باید مقادیر آن‌ها در هر دو مرحله آموزش و صحت‌سنجی در محدوده مطلوب قرار گیرند (Ghorbani و همکاران، 2018).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (2)$$

که در این روابط O_i بیانگر داده‌های مشاهداتی، $\bar{O}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، P_i داده‌های محاسباتی و N تعداد کل داده‌های موجود می‌باشد. ضریب NSE ضریبی است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. ضریب NSE از منفی بی‌نهایت الی یک متغیر است. اگر مقدار آن برابر یک باشد تناسب کاملی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی وجود دارد. در واقع هر چه مقدار ضریب NSE به عدد یک نزدیک‌تر شود، مدل از عملکرد بهتری برخوردار است. معیار $RMSE$ نیز معیاری جهت بررسی خطای مدل به کار می‌رود که هم واحد داده‌ها بوده و هر چه به صفر میل کند، مدل مورد نظر بهینه خواهد بود. همچنین به منظور امکان ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بهینه‌سازی به کار گرفته شده در این پژوهش از سه شاخص قابلیت اعتماد، آسیب‌پذیری و پایداری مخزن استفاده می‌شود که در ادامه به اختصار شرح داده می‌شود.

الف) شاخص قابلیت اعتماد

احتمال این که سیستم در طول دوره عملکرد خود در حالت بهره‌برداری نرمال (عدم شکست) قرارگیرد را ارائه می‌دهد. در حالت کلی می‌توان گفت که درصد اعتمادپذیری یا قابلیت اعتماد بیانگر درصدی از زمان است که مخزن قادر به تأمین تقاضا می‌باشد.

$$\delta = 100(1 - \frac{f}{T}) \quad (3)$$

مطالعه، از داده‌های هیدرولوژیکی شامل دبی ورودی به مخزن، بارش، دمای حداقل و حداکثر، درصد پوشش برف، شاخص خشکسالی SPI و شاخص عددی برای هر ماه (یک تا 12) به عنوان ورودی شبکه عصبی استفاده شده است. انتخاب این داده‌ها به دلیل تأثیرات مهمی است که بر فرآیند هیدرولوژیکی و جریان ورودی به مخزن دارند. بارش و دما مستقیماً بر حجم آب رواناب تأثیر می‌گذارند؛ پوشش برف نشان‌دهنده ذخیره آب در فصل‌های سرد است که بعداً با ذوب شدن به رواناب تبدیل می‌شود؛ شاخص SPI نیز برای در نظر گرفتن اثر خشکسالی و نوسانات اقلیمی به کار رفته است. محاسبه ضریب همبستگی بین هر یک از این داده‌ها و جریان ورودی به مخزن، مؤثرترین داده‌ها را برای مدل‌سازی شناسایی کرده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که پوشش برف و دما تأثیرات مهمی بر رواناب و دبی ورودی دارند و ترکیب این ورودی‌ها با شاخص SPI و بارش، دقت مدل در پیش‌بینی جریان ورودی را بهبود بخشیده است. قابل ذکر است که استفاده از SPI در کنار بارش به دلیل ارائه یک دید جامع‌تر از وضعیت آب و هوایی است. در حالی که بارش می‌تواند نشان‌دهنده مقدار بارش در یک دوره زمانی خاص باشد، SPI با ارائه اطلاعات در مورد تاریخچه بارش و تراکم آب زیرزمینی، از جامعیت بیشتری برخوردار است. این ارتباط نه تنها به تخمین جریان ورودی به مخزن سد کمک می‌کند، بلکه امکان بهبود مدیریت منابع آبی را فراهم می‌کند، زیرا می‌تواند الگوهای خشکسالی را در طول زمان شناسایی کند و از پایداری و عملکرد سدها حمایت کند. در گام سوم برای پیش‌بینی جریان آب ورودی به مخزن در هریک از ماه‌ها که از مهرماه سال آبی شروع (t) تا شهریور سال بعد (t+11)، به عبارتی 12 لگ تشکیل شد. به منظور مدل‌سازی با استفاده از مدل FFNN داده‌ها به دو قسمت تقسیم شدند، بدین ترتیب که 75 درصد از داده‌ها برای مرحله آموزش و 25 درصد باقی برای مرحله صحت‌سنجی، استفاده شدند. همچنین برای هماهنگ‌سازی نوع و محدوده داده‌ها اقدام به نرمال‌سازی آن‌ها گردیده است.

جهت مدل‌سازی چندگانه از توانایی مدل FFNN با انتشار برگشتی خطا برای پیش‌بینی جریان ورودی با به کارگیری ورودی-های مشاهداتی استفاده شده است. به همین منظور از مدل FFNN برای پیش‌بینی ورودی جریان آب به مخزن سد علویان یک تا دوازده گام بعد (12 ماه بعد) استفاده شده است. ساختار سه لایه شبکه FFNN در اکثر مدل‌سازی‌های سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک الگوی کلی برای نگاشت غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی است. جدول (1) نتایج و ساختار مدل‌سازی رواناب ورودی به مخزن سد علویان را با استفاده از مدل FFNN نشان می‌دهد، در این جدول ترکیب ورودی‌های مدل برای پیش‌بینی خروجی، شامل داده‌های ورودی به مخزن، بارش، دمای حداقل و حداکثر، پوشش برف، شاخص خشکسالی و شاخص ماه

در رابطه (3)، f تعداد کل دوره‌های شکست، T تعداد کل دوره‌های بهره‌برداری و δ قابلیت اعتمادپذیری می‌باشد، درواقع این پارامتر متمم احتمال شکست مخزن می‌باشد.

ب) شاخص آسیب‌پذیری

بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد، که به صورت نسبت کل آب عرضه شده در طول دوره‌های شکست به کل تقاضا در طول همان دوره‌هایی که شکست اتفاق افتاده است می‌باشد که به صورت رابطه (4) تعریف می‌گردد (Razaghi و همکاران، 2014).

$$\eta = \frac{\sum R_t^* - \sum R_t}{\sum R_t^*} \quad (4)$$

که در آن R_t^* تقاضای مورد نظر در طول t امین دوره شکست، R_t مقدار آب رها شده از سیستم در طول t امین دوره شکست، f تعداد کل دوره‌های شکست می‌باشد و η شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. ج) شاخص پایداری

باتوجه به عدم وجود رابطه همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، شاخص پایداری که ترکیبی از شاخص‌های فوق است، معرفی شده است. گزینه‌ای که بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد به عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. شاخص پایداری از رابطه (5) محاسبه می‌شود (Razaghi و همکاران، 2014).

$$\varphi = \delta\gamma(1 - \eta) \quad (5)$$

که در آن φ شاخص پایداری، δ شاخص اعتمادپذیری، γ شاخص سرعت برگشت‌پذیری و η شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. در رابطه (5) شاخص سرعت برگشت‌پذیری از رابطه (6) محاسبه می‌شود.

$$\gamma = 1/f/f_s \quad (6)$$

که در آن، f_s تعداد دوره‌های شکست به طور پیوسته و f تعداد کل دوره‌های زمانی می‌باشد.

3- نتایج و بحث

3-1- پیش‌بینی

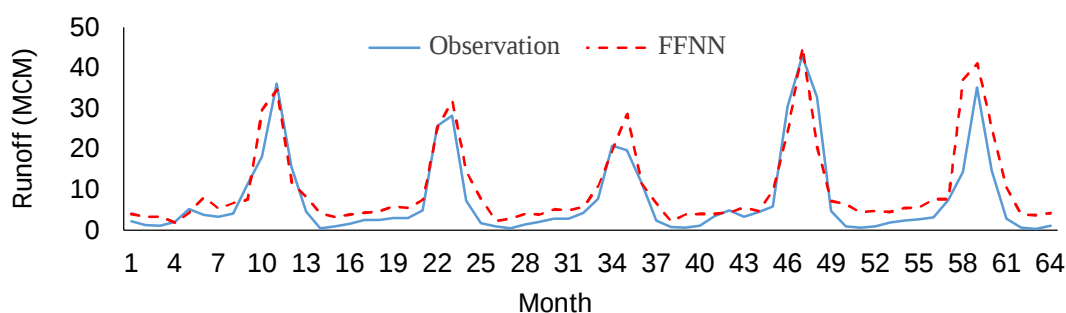
برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن در گام اول داده‌ها بازسازی و دسته‌بندی شده است، در گام دوم انتخاب داده‌ها و تشکیل ماتریس داده‌های ورودی به مدل صورت گرفته است، همان‌طوری که می‌دانیم انتخاب داده‌ها یکی از چالش‌های مهم مدل‌سازی می‌باشند، برای انتخاب داده‌های مؤثر بین انواع داده‌های ورودی و داده هدف، ضریب همبستگی محاسبه و انواع حالت‌های مختلف در مدل تست گردید و پس از سعی و خطا بهترین داده‌ها که نتایج مناسبی ارائه می‌دادند، انتخاب شدند. در این

به منظور ارزیابی کیفیت مدل سازی و بررسی دقیق تر، نتایج مدل سازی حاصل از مدل FFNN بر اساس معیارهای NSE و جذر میانگین مربعات خطا در مرحله صحت سنجی با سری زمانی ماهانه رواناب ورودی مشاهداتی مقایسه شده اند (شکل (2)). طبق شکل (2) مشاهده می شود که نتایج سری داده های مدل FFNN با داده های مشاهداتی به ویژه در پیک جریان های ورودی هم خوانی خوبی دارند. جهت مقایسه دقیق تر مقادیر پیش بینی با مقادیر مشاهداتی لازم است نمودارهای پراکنش نیز ترسیم گردد تا از روی نحوه پراکنش نقاط، تفسیرهای نسبتاً دقیقی در مورد نتایج صورت پذیرد. به عنوان مثال در شکل (4) ارتباط سری داده های مدل FFNN با سری داده های مشاهداتی با استفاده از رگرسیون خطی مورد بررسی قرار گرفته است، نتایج نشان می دهد که همبستگی مناسبی (0/83) بین سری داده های مشاهداتی با نتایج مدل FFNN دارد که نزدیک به یک بوده و همچنین داده های پرت (به- جز یک مورد) وجود ندارد.

بوده است، به عنوان مثال برای پیش بینی ورودی جریان آب به مخزن سد علویان در طول سال آبی به شکل زیر عمل می شود، برای پیش بینی مهر ماه از گام زمانی یک ماه قبل (شهریور ماه) و داده های یک سال قبل یعنی مهر ماه سال گذشته استفاده می شود و همین طور برای پیش بینی آبان ماه از دو گام زمانی قبل (شهریور ماه) و داده های یک سال قبل یعنی آبان ماه سال گذشته استفاده می شود، به همین ترتیب برای پیش بینی مرداد ماه از یازده گام زمانی قبل (شهریور ماه) و داده های یک سال قبل یعنی مرداد ماه سال گذشته استفاده می شود و در نهایت برای پیش بینی شهریور ماه از دوازده گام زمانی قبل (شهریور ماه) که همان داده های یک سال قبل یعنی شهریور ماه سال گذشته است، استفاده می شود. همچنین تعداد ماتریس ورودی برای هریک از ماه های مهر لغایت مرداد ماه 16 مورد (ترکیب داده های ورودی مدل) و صرفاً برای شهریور ماه هشت مورد می باشد.

جدول 1- نتایج و ساختار مدل سازی رواناب ورودی به مخزن سد علویان با استفاده از مدل FFNN

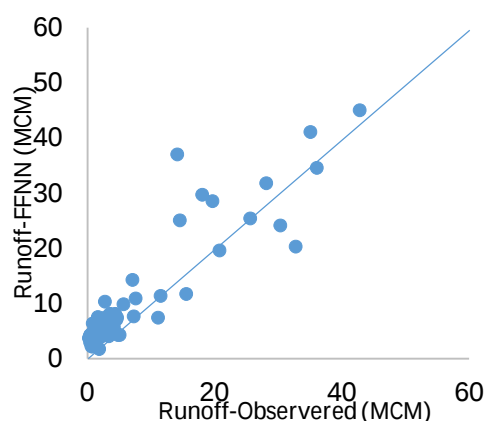
RMSE (MCM)		NSE		هدف	گام	متغیرهای ورودی
صحت سنجی	آموزش	صحت سنجی	آموزش			
3/2	2/5	0/91	0/93	Q (t)	1	(t-1, t-12)
4/5	2/8	0/82	0/90	Q (t+1)	2	(t-1, t-11)
3/7	2/5	0/89	0/91	Q (t+2)	3	(t-1, t-10)
3/5	2/4	0/89	0/91	Q (t+3)	4	(t-1, t-9)
3/8	2/9	0/89	0/90	Q (t+4)	5	(t-1, t-8)
4/1	3/7	0/85	0/89	Q (t+5)	6	(t-1, t-7)
3/2	2/6	0/91	0/92	Q (t+6)	7	(t-1, t-6)
3/1	2/9	0/91	0/91	Q (t+7)	8	(t-1, t-5)
4/5	3/2	0/82	0/89	Q (t+8)	9	(t-1, t-4)
4/6	3/1	0/81	0/91	Q (t+9)	10	(t-1, t-3)
3/5	2/3	0/89	0/94	Q (t+10)	11	(t-1, t-2)
2/8	2/1	0/90	0/94	Q (t+11)	12	(t-1)



شکل 2- نمودار سری زمانی مشاهداتی رواناب در مقایسه با سری های زمانی محاسباتی FFNN برای داده های صحت سنجی

توجه به سناریوهای مختلف مشاهده کنند و بدین منظور مدل علت و معلولی طراحی شده است.

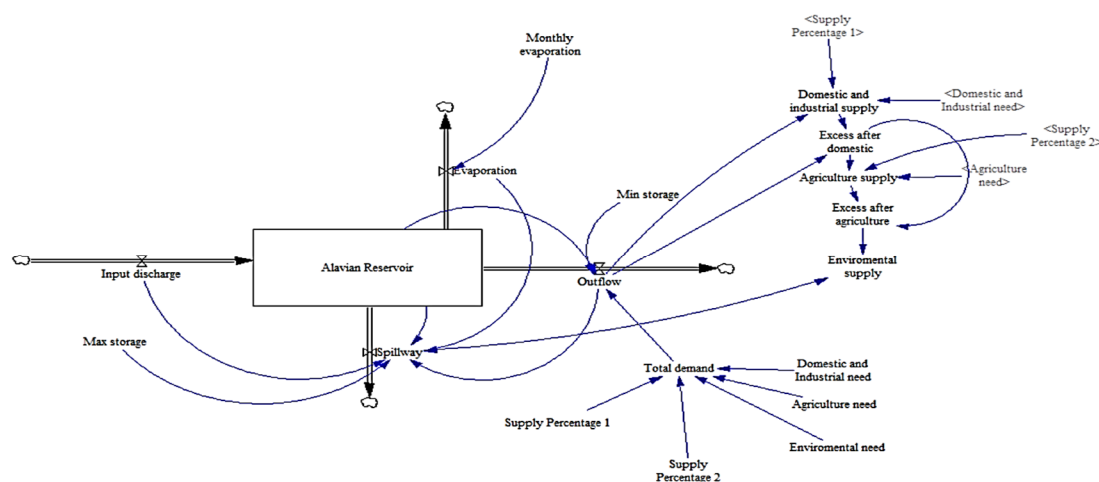
در گام اول فاز توسعه مدل بهینه سازی، مدل مفهومی سیستم منابع آب سد علویان با در نظر گرفتن متغیرهای مؤثر بر معادله بیلان آبی سد جهت برآورد مقادیر خروجی از سد (سرریز از سد و نیازهای شهری و صنعتی، کشاورزی و همچنین نیاز زیست محیطی دریاچه ارومیه) در محیط مدل ونسیم شبیه سازی شد (شکل 4)). در این راستا، رواناب به عنوان ورودی سد، حجم تبخیر، سرریز و رهاسازی (هدف مسأله) به عنوان خروجی سد در نظر گرفته شد. همچنین طی بررسی های مختلف، مشاهده شد که به کارگیری میانگین 10 سال گذشته حجم تبخیر تخمین مناسبی از حجم تبخیر فعلی به دست می دهد. به علاوه با توجه به وجود فرار آب از مخزن سد، مقدار بارش ورودی به مخزن از محاسبات کنار گذاشته شد، تا تعادلی در این رابطه به دست آید. لازم به ذکر است که اولویت اول مدل سازی تأمین نیاز آب شهری و صنعتی و سپس تأمین نیاز آب کشاورزی و محیط زیستی در نظر گرفته شده است. در این راستا، ابتدا یک حالت 300 ماهه با در نظر گرفتن تمامی داده های 25 سال (با هدف تأمین 100 درصدی نیازها) انجام شد که نتایج این مرحله در جدول (2) ارائه شده است.



شکل 3- مقایسه سری زمانی مشاهداتی رواناب با نتایج مدل FFNN

3-2- مدل سازی سیستم های پویا

در فاز مدل سازی سیستم های پویا، از مدل ونسیم جهت شبیه سازی رفتار سیستم با توجه به رواناب پیش بینی شده و مصارف واقعی استفاده شده است. هدف این فاز این مورد می باشد که مدیران سد بتوانند نتیجه سیاست های بهره برداری خود را با



شکل 4- شماتیک مدل توسعه داده شده در ونسیم

جدول 2- نتایج فاز مدل سازی سیستم های پویا با مدل ونسیم

سناریو	درصد تأمین نیاز کشاورزی (/.)	قابلیت اعتماد	آسیب پذیری	پایداری
کل 25 سال	100	0/98	0/54	0/15
ترسالی	100	1	-	-
نرمال	100	1	-	-
خشکسالی	100	0/92	0/75	0/23
خشکسالی	90	0/92	0/06	0/86
خشکسالی شدید	100	0/75	0/5	0/12
خشکسالی شدید	80	0/83	0/49	0/21

در حالتی که کل 25 سال در نظر گرفته شده است، با هدف تأمین 100% نیازهای آبی شهری و صنعتی، کشاورزی و محیط زیستی تنها طی شش ماه از 25 سال مدل با شکست مواجه شده است. در ادامه برای ارزیابی بهتر شرایط حال و آینده چندین سناریو شامل حالت‌های ترسالی، نرمال، خشکسالی و خشکسالی شدید برای سال بعد (فاز اول این پژوهش) در نظر گرفته شده و تحت این سناریوها شبیه‌سازی انجام گرفته است. لازم به ذکر است که تعیین سناریوهای مختلف بر اساس حجم رواناب ورودی به مخزن سد انجام شده است. در واقع با توجه به میانگین و انحراف معیار داده‌های رواناب طی 25 سال و حجم نیازها مرزبندی چهار سناریو مختلف انجام شده است (به جدول 3) مراجعه کنید). در ادامه نتایج سناریوهای مختلف ارائه شده است. همچنین قابل ذکر است که حداقل حجم اولیه مخزن 10 میلیون مترمکعب فرض

شده و حجم رواناب ورودی طبق جدول (3) برای یک سال آینده در نظر گرفته شده است. البته باید اشاره کرد که مدل‌سازی سیستم‌های پویا با عدم قطعیت‌های متعددی مواجه هستند که می‌تواند از تغییرات زمانی در پارامترها، دقت ورودی‌ها، فرضیات و شرایط اولیه ناشی شود. این عدم قطعیت‌ها می‌توانند بر قابلیت اطمینان و دقت پیش‌بینی‌های مدل تأثیر بگذارند. مقایسه نتایج سناریوهای مختلف نشان داد که در دو سناریوی اول و دوم (ترسالی و نرمال) قابلیت اعتماد تأمین تمام نیازهای آبی 100 درصد می‌باشد. اما با در نظر گرفتن سناریو سوم (خشکسالی) در صورت تأمین 100% نیازهای آبی قابلیت اعتماد تأمین هر سه نیاز شهری، کشاورزی و محیط زیست از 100% به 91/67% رسیده است، که در واقع در ماه 12ام با مشکل مواجه شده است.

جدول 3- معیار مرزبندی رواناب سالانه سناریوهای مختلف

سناریو بر اساس مجموع حجم رواناب سالانه (MCM)				ماه سال آبی
109.> 99	109/73< 99/69 رواناب	73/59< 69/17 رواناب	59.< 17	
ترسالی	نرمال	خشکسالی	خشکسالی شدید	
2/189	1/733	1/400	1/600	1
4/089	2/833	2/725	2/700	2
4/422	2/944	2/975	3/300	3
3/633	2/900	2/975	2/933	4
4/144	3/489	3/600	3/067	5
8/200	6/722	5/275	4/933	6
22/922	18/689	14/350	13/033	7
39/489	29/833	19/500	13/400	8
28/978	13/833	8/450	6/533	9
6/344	3/089	4/275	2/667	10
2/733	1/078	1/000	0/800	11
1/600	0/867	0/650	0/833	12
128/744	88/011	67/175	55/800	مجموع

در صورت تغییر هدف به تأمین 90% نیاز کشاورزی و 100% نیاز شهری و محیط زیستی، قابلیت اعتماد تأمین نیازهای شهری و کشاورزی 100% اما نیاز محیط زیستی 91/67% است. در ادامه با در نظر گرفتن سناریو چهارم (خشکسالی شدید) با هدف تأمین 100% نیازهای آبی، قابلیت اعتماد تأمین نیاز شهری به 91/67% و قابلیت اعتماد تأمین نیاز کشاورزی و محیط زیستی به 75% رسیده است. به عبارتی دیگر در تأمین نیاز شهری فقط در ماه 12ام و در تأمین نیاز کشاورزی و محیط زیستی در ماه‌های 10 تا 12 با مشکل مواجه شده است. در این راستا با تغییر هدف به تأمین 80% نیاز کشاورزی و 100% نیاز شهری و محیط زیستی، قابلیت اعتماد تأمین نیاز شهری 91/67% و قابلیت اعتماد تأمین نیاز کشاورزی

و محیط زیستی به 83/33% رسیده است که تعداد دوره‌های شکست کاهش یافته و نیز طی دوره مطالعاتی حجم آب بیشتری در سد ذخیره شده است. همان‌طور که مشخص است بیشترین مصرف پایین‌دست مربوط به کشاورزی می‌باشد و در نتیجه بدون صرفه‌جویی و بهینه‌سازی در این بخش امکان اختصاص حق‌آبه مناسب دریاچه وجود ندارد. پس بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی و در نتیجه کاهش مصرف آب راه حلی است که با رسیدن به آن هم می‌توان به قابلیت اطمینان بالاتر در تأمین نیاز شهری و صنعتی و زیست‌محیطی رسید.

3-3- بهینه‌سازی

$$A_t = -0.0002533 S_t^2 + 0.05197 S_t + 0.3806 \quad (7)$$

که در آن، A_t مساحت دریاچه سد علویان در ماه t ام به کیلومتر مربع و S_t حجم آب ذخیره شده در مخزن سد علویان به میلیون مترمکعب می‌باشد. جدول (4) نیاز واقعی بخش کشاورزی، شرب، صنعت، حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه صوفی چای و تبخیر از سطح مخزن سد علویان در مقیاس ماهانه را نشان می‌دهد. در ادامه، مسأله توسط الگوریتم ترکیبی حاصل از الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات مدل‌سازی شده است. جدول (5) ضرایب الگوریتم ترکیبی (ژنتیک- ازدحام ذرات) را نشان می‌دهد.

در فاز بهینه‌سازی این مطالعه، ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات به‌عنوان یکی از روش‌های فراابتکاری، جهت ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن سد علویان با در نظر گرفتن تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه صوفی چای و نیاز صددردی مصرف آب شرب شهرستان مراغه استفاده گردیده است که مراحل و نتایج آن به‌صورت زیر می‌باشد. برای محاسبه مقدار حجم تبخیر از سطح دریاچه و همچنین بارندگی مستقیم به سطح دریاچه سد، مساحت دریاچه با استفاده از منحنی سطح- حجم و با رابطه (7) حاصل گردید.

جدول 4- نیاز واقعی بخش کشاورزی، شرب، صنعت، زیست محیطی رودخانه صوفی چای و تبخیر از سطح مخزن سد علویان (MCM)

نوع مصارف	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
شرب	1/3	1/1	1/1	1/1	1/1	1/2	1/5	1/6	1/6	1/5	1/5	1.4	16
کشاورزی	0	0	0	0	0	0	0	8	13	12	8	4	45
صنعت	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/4	0/5	0/5	0/5	0/5	5/2
محیط زیست	0/3	0/25	0/25	0/25	0/25	0/3	0/5	0/6	0/6	1	1/1	0/6	6
حجم تبخیر	0/12	0/05	0/02	0	0	0/04	0/15	0/3	0/5	0/55	0/45	0/25	2/4

جدول 5- مقادیر انواع پارامترهای به‌کار رفته در الگوریتم ترکیبی

آیتم	مقادیر
تعداد جمعیت	50
تعداد تکرار	100
احتمال تقاطع (درصد)	70
احتمال جهش (درصد)	30
لاند	0/729
C1	2/04
C2	04/2
W	7/0-4/0

R_t مقدار آب رهاسازی شده در دوره زمانی t ، D_t مقدار تقاضا در دوره زمانی t ، D_{max} بیشینه میزان تقاضا در طول کل دوره و Z تابع هدف مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. در مسائل بهینه‌سازی، قیدها یکی از ارکان اصلی هستند که در این مسائل، محدوده جواب‌های ممکن را تعریف می‌کند. قیود مربوط به بیلان آب در مخزن که مهم‌ترین آن‌ها رابطه پیوستگی است و بر اساس معادله (9) استوار است.

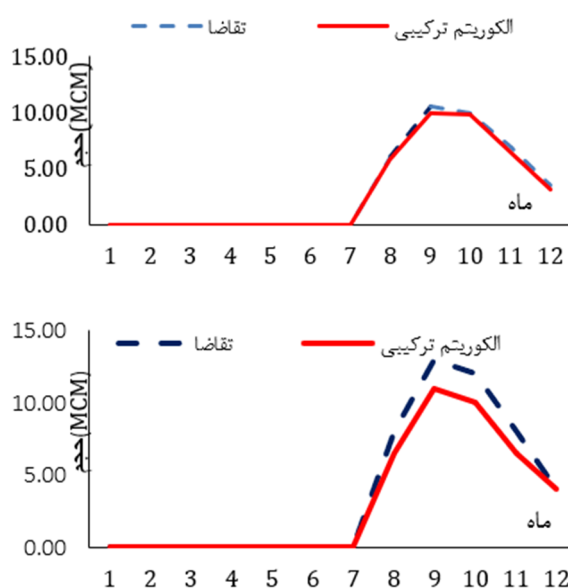
$$S_{t+1} = S_t + Q_t + P_t - R_t - E_t - Spillway_t \quad (9)$$

S_t حجم مخزن در ابتدای دوره t و S_{t+1} حجم مخزن در انتهای دوره t است. Q_t حجم ورودی به مخزن، E_t حجم تبخیر از سطح مخزن در ماه t ، P_t حجم بارش بر سطح مخزن در ماه t ، $Spillway_t$ حجم سرریز از مخزن در ماه t می‌باشد. از طرفی میزان رهاسازی از مخزن سد در هر دوره نباید از حدودی کمتر یا بیشتر باشد، به عبارت دیگر، باید رهاسازی در هر بازه R_t بین میزان رهاسازی کمینه R_{min} و میزان رهاسازی بیشینه R_{max} باشد و از طرفی میزان حجم مخزن در هر دوره S_t نیز باید بین حجم کمینه S_{min} و حجم بیشینه مخزن S_{max} باشد.

در این تحقیق رهاسازی از مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم منظور شده است. درمورد بهره‌برداری بهینه از مخازن، این مسأله به‌صورت نمودار تعریف شده است. در این نمودار، دوره‌های زمانی به‌منزله نقاط تصمیم و خروجی از مخزن در دوره‌های زمانی مختلف به‌منزله گزینه‌های تصمیم می‌باشند. جهت بررسی نحوه عملکرد این روش‌ها از اطلاعات سد علویان استفاده شده است.

برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی در حل یک مسأله خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را برای مسأله مورد نظر تعریف کرد. در مسأله بهره‌برداری از مخزن سد، متغیر تصمیم ممکن است حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی S_t یا میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی R_t باشد. در این تحقیق برای حل مسأله بهره‌برداری بهینه سد علویان، میزان رهاسازی از این مخزن به‌عنوان متغیر تصمیم در نظر گرفته شده است و پس از تأمین صددردی نیازهای شرب و صنعت، تابع هدف کمینه‌سازی میزان اختلاف تقاضا و رهاسازی است که مطابق با رابطه (8) تعریف می‌شود:

$$\text{Min } Z = \sum_{t=1}^{n=300} \left(\frac{R_t - D_t}{D_{max}} \right)^2 \quad (8)$$



شکل 5- مقایسه مقادیر تقاضای کشاورزی و رهاسازی به دست آمده از الگوریتم ترکیبی برای سد علویان در بحرانی ترین سال آبی: (الف) سناریو تامین آب 80%، (ب) سناریو تامین آب 100%

با توجه به این که جریان ورودی ماهیت تصادفی داشته و غیرقابل تغییر است، لذا تحلیل حساسیت صرفاً بر اساس تغییر در تقاضای مصرف صورت می گیرد. بر همین اساس، سناریوی تأمین 80 درصد نیازهای کشاورزی انجام گرفت و مدل بهینه سازی برای سناریوی فوق الذکر اجرا و مقادیر تابع هدف و شاخص های عملکرد مخزن در دوره آماری (12 ماهه سال بحرانی) در جدول (7) ارائه گردیده است.

جدول 7- شاخص های عملکرد الگوریتم ترکیبی و مدل ونسیم در بهره برداری از مخزن سد علویان (کوتاه مدت)

روش	درصد تأمین آب کشاورزی (%)	مجموع کمبودها (MCM)	قابلیت اعتماد	آسیب پذیری	پایداری
ونسیم	100	16/40	0/75	0/50	0/19
	80	7/21	0/83	0/47	0/22
ترکیبی	100	9	0/72	0/25	0/09
	80	3	0/94	0/15	0/12

از جدول (7) مشاهده می شود که در روش ترکیبی در سناریوی تأمین 100 درصد نیاز کشاورزی، مجموع کمبودها هشت میلیون مترمکعب و در سناریو تأمین 80 درصد نیاز کشاورزی، کمبودها دو میلیون مترمکعب کاهش چشمگیری داشته است و همچنین شاخص قابلیت اعتماد حجمی برای سناریو 100 درصدی تأمین نیاز کشاورزی 72 درصد و برای سناریو 80 درصدی تأمین

حجم حداقل و حداکثر مخزن به ترتیب معادل 10 و 57 میلیون مترمکعب می باشد. در فاز بهینه سازی نیز ابتدا یک حالت 300 ماهه با در نظر گرفتن تمامی داده های 25 سال انجام شده است (جدول (6)). جمع ورودی ماهیانه در این مدت معادل 2387 میلیون مترمکعب و جمع نیاز ماهیانه بلندمدت معادل 2024 میلیون مترمکعب می باشد.

جدول 6- شاخص های عملکرد الگوریتم ترکیبی و مدل ونسیم در بهره برداری از مخزن سد علویان (بلندمدت)

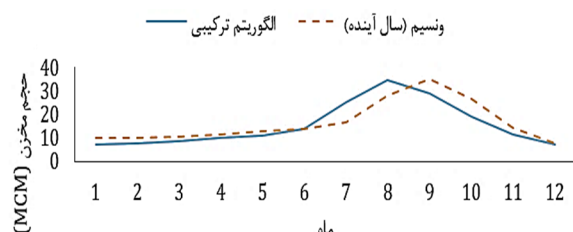
روش	مجموع کمبودها (MCM)	قابلیت اعتماد	آسیب پذیری	پایداری
ونسیم	20/52	0/98	0/54	0/15
ترکیبی	27/13	0/85	0/23	0/12

باتوجه به شاخص های عملکرد مخزن، الگوریتم ترکیبی توانسته است 85 درصد و روش ونسیم 83 درصد از نیاز آبی کشاورزی پایین دست سد علویان را تأمین کند. همچنین شاخص پایداری برای الگوریتم ترکیبی و مدل ونسیم به ترتیب برابر 12 و 10 می باشد. سپس برای تحلیل و ارزیابی روش های تحقیق جهت بهره برداری بهینه مخزن سد علویان، در یک دوره کوتاه مدت با در نظر گرفتن یک سال بحرانی انجام شده و در نهایت نتایج حاصل از الگوریتم ترکیبی با نتایج حاصل از مدل ونسیم مقایسه شده است. سال بحرانی به سالی اطلاق می شود که میانگین و حجم ورودی به مخزن سد در آن سال نسبت به بقیه سال های دوره بهره برداری کمترین مقدار باشد. با بررسی و آنالیزی که صورت گرفت سال آبی 77-78 به عنوان سال بحرانی تعریف شده است. شکل (5) مقادیر تقاضای کشاورزی با مقادیر رهاسازی به دست آمده توسط الگوریتم ترکیبی با سیاست فعلی سد علویان در بحرانی ترین سال آبی را نشان می دهد.

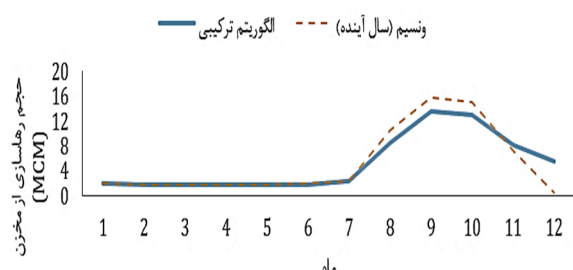
همان طور که در شکل (5) مشاهده می شود برای بحرانی ترین سال آبی در طول دوره بهره برداری، الگوریتم ترکیبی در سناریو تأمین 100 درصدی نیاز کشاورزی برابر 72 درصد از نیازهای کشاورزی پایین دست را برآورده می سازد.

برای این که درصد تأمین نیازهای پایین دست در سال بحرانی با درصد تأمین نیازهای پایین دست در کل دوره بهره برداری (25 ساله) همخوانی داشته باشد، در این تحقیق از دو سناریو تغییر در جریان ورودی ماهانه و یا در تغییر در تقاضای مصرف که از پارامترهای حساس برای مدل بهینه سازی می باشند، می توان استفاده نمود.

و رهاسازی آب اعمال کند. این تفاوت‌ها باعث شده‌اند که الگوریتم ترکیبی به‌ویژه در دوره‌های پیک مصرف آب، عملکرد بهتری نشان دهد و اختلافی در نتایج این دو مدل به‌وجود آید.



شکل 6- حجم ذخیره ماهانه براساس منحنی فرمان پیش‌بینی برای سد علویان



شکل 7- رهاسازی‌های ماهانه براساس منحنی فرمان پیش‌بینی برای سد علویان

برای مقایسه جامع‌تر حالت بلندمدت و کوتاه‌مدت، مجموع کمبودها و شاخص‌های عملکردی هر دو روش ونسیم و الگوریتم ترکیبی در شکل (8) ارائه شده است.

نیاز کشاورزی به‌میزان 94 درصد می‌باشد که در مقایسه با نتایج خروجی مدل ونسیم و عملکرد واقعی سد علویان در سال آبی 1401-1402 به‌عنوان سال آبی کنترل و ارزیابی جواب‌های مدل‌سازی، منطقی و مناسب می‌باشد.

در این پژوهش، علاوه بر مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان، تدوین منحنی فرمان سد علویان جهت تأمین نیازهای پایین‌دست براساس جریان ورودی پیش‌بینی شده در افق زمانی 12 ماه آتی که با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی شده است، جزء اهداف این تحقیق می‌باشد.

جدول (8) داده‌های رهاسازی از مخزن سد علویان در چند گام بعد (تا 12 ماه بعد) برای تأمین اهداف مصارف براساس مدل ونسیم و الگوریتم ترکیبی را نشان می‌دهد. همچنین شکل‌های (6) و (7) منحنی فرمان پیش‌بینی حجم رهاسازی و حجم مخزن در 12 ماه آتی برای سد علویان را نشان می‌دهند و نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان می‌دهد نمودار الگوریتم ترکیبی برای حجم ذخیره مخزن سد، کاملاً با رفتار واقعی منحنی فرمان سد علویان که در دوران ساخت سد طراحی شده و در ماه‌های فروردین و اردیبهشت نقطه پیک دارد همخوانی و مطابقت دارد. همین‌طور نمودار مربوط به حجم رهاسازی از مخزن سد در فصول آبیاری که در بهره‌برداری واقعی سد علویان از نیمه دوم اردیبهشت ماه شروع و در نیمه اول شهریورماه خاتمه می‌یابد، همخوانی و مطابقت خوبی دارد. تفاوت نتایج مدل ونسیم با الگوریتم ترکیبی در شکل (6)، به‌ویژه در نقطه پیک ماه‌های 8 و 9، عمدتاً به‌دلیل رویکردهای مختلف این دو مدل در پیش‌بینی و بهینه‌سازی حجم ذخیره مخزن است. مدل ونسیم بیشتر بر اساس رفتارهای تاریخی و قواعد ساده‌تری تنظیم شده است، درحالی‌که الگوریتم ترکیبی با استفاده از روش‌های فراابتکاری (الگوریتم‌های ژنتیک و ازدحام ذرات) توانسته است تنظیمات دقیق‌تری را برای بهینه‌سازی حجم ذخیره

جدول 8- شاخص‌های عملکرد الگوریتم ترکیبی و مدل ونسیم در بهره‌برداری از مخزن سد علویان (کوتاه مدت) (MCM)

روش	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	جمع
ونسیم	2/0	1/7	1/8	1/8	1/8	1/9	2/4	10/6	15/7	15/0	7/1	0/6	62/3
ترکیبی	1/9	1/7	1/7	1/7	1/7	1/8	2/3	8/5	13/5	13	8	5	60/8

در فاز مدل‌سازی سیستم‌های پویا، از مدل ونسیم جهت شبیه‌سازی رفتار سیستم با توجه به رواناب پیش‌بینی شده و مصارف واقعی استفاده شده است. در فاز بهینه‌سازی این تحقیق نیز، با توجه به تابع هدف در نظر گرفته شده، الگوریتم ترکیبی ژنتیک- ازدحام ذرات به‌عنوان یکی از روش‌های فرا ابتکاری، جهت ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تک‌مخزن سد علویان با در نظر گرفتن تأمین کامل نیاز زیست‌محیطی رودخانه صوفی چای و تأمین نیاز صددرصدی مصرف آب شرب شهرستان مراغه استفاده گردیده است. براساس خروجی‌های به‌دست آمده، در تحلیل‌های کوتاه‌مدت شاخص قابلیت اعتماد حجمی الگوریتم ترکیبی پیشنهادی 72 درصد برای سناریو 100 درصدی تأمین نیاز کشاورزی و 94 درصد برای سناریو 80 درصدی تأمین نیاز کشاورزی می‌باشد، درحالی‌که شاخص قابلیت اعتماد حجمی مدل ونسیم 75 درصد برای سناریو 100 درصدی تأمین نیاز کشاورزی و 83 درصد برای سناریو 80 درصدی تأمین نیاز کشاورزی می‌باشد. از این رو، نتایج حاکی از توانایی بسیار بالای روش فرا ابتکاری ترکیبی در بهینه‌سازی مخازن سد که مسئله‌ای غیرخطی محسوب می‌شود، بود و از نتایج این روش برای به‌دست آوردن منحنی‌های فرمان رهاسازی و حجم مخزن در ماه‌های آتی (12 گام بعد) استفاده شد.

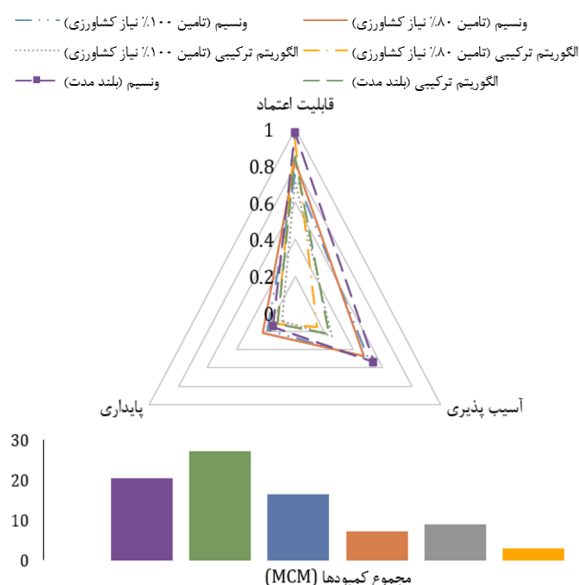
برای مطالعات آتی با توجه به وجود مدل‌های متنوع و جدید دیگر، در راستای افزایش دقت مدل‌سازی، می‌توان توانایی مدل‌های یادگیری عمیق به‌عنوان نسل جدید مدل‌های هوش مصنوعی را بررسی کرد. همچنین مدل‌سازی فصلی با استفاده از تبدیل موجک در ترکیب با مدل‌های هوش مصنوعی برای کنترل اجزاء اصلی سری زمانی و پیش‌بینی چندگام بعد پیشنهاد می‌شود. همچنین، بررسی و ارزیابی کاربرد این مدل در شبیه‌سازی رواناب و بهینه‌سازی منحنی فرمان سایر سدهای مخرنی می‌تواند از جمله موضوعات مطالعات پیشنهادی آتی به‌وسیله محققین دیگر باشد.

5- تقدیر و تشکر

از شرکت آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی، در همراهی و حمایت برای انجام این پژوهش، قدردانی می‌شود.

6- مراجع

- Abrahart RJ, Anctil F, Coulibaly P, "Two decades of anarchy? Emerging themes and outstanding challenges for neural network river forecasting", *Progress in Physical Geography*, 2012, 36, 480-513. <https://doi.org/10.1177/0309133312444943>
- Alami MT, Farzin S, Ahmadi MH, Aghabalaee B, "System Dynamics Modeling of Dam and Groundwater for Optimal Water Management (Case study: Golak Dam)", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2014, 44, 1-12.



شکل 8- نمودار مقایسه شاخص‌های عملکرد و کمبود دو روش ونسیم و الگوریتم ترکیبی در حالت‌های بلندمدت و کوتاه مدت

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از داده‌های پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن که توسط مدل‌سازی شبکه عصبی به‌دست آمده، برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد علویان از الگوریتم ترکیبی (ازدحام ذرات- ژنتیک) استفاده شده است، درواقع سرعت الگوریتم ازدحام ذرات و توانایی شناخته شده الگوریتم ژنتیک را در به‌دست آوردن جواب‌های بهینه باهم ترکیب کرده و تعادلی بین این دو برقرار کرده است، بدین‌ترتیب باعث افزایش توانمندی و کارآمدی فضای جستجو شده است. درنهایت الگوریتم ترکیبی بهبود داده شده حاصل، برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان در دوره بلندمدت 25 ساله و کوتاه‌مدت یک‌ساله به‌کار گرفته شده و نتایج حاصل از آن با نتایج مدل ونسیم مقایسه گردیده است. به‌طور کلی این پژوهش شامل دو فاز پیش‌بینی آورد رودخانه در سال آبی آینده، فاز شبیه‌سازی با سیستم‌های پویا و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان با استفاده از الگوریتم ترکیبی از ازدحام ذرات و ژنتیک می‌باشد. در فاز پیش‌بینی رواناب سال آبی آینده جریان ورودی سد علویان با استفاده از مدل FFNN پیش‌بینی شده و نشان داده شد که مدل FFNN می‌تواند دبی ورودی به سد را در یک تا سه ماه آینده، به خصوص در مرحله آموزش و همچنین مرحله صحت‌سنجی به‌خوبی پیش‌بینی کند و در سه تا شش ماه آینده پیش‌بینی‌ها مناسب و در حد قابل قبول و در شش تا 12 ماه آخر سال آبی دارای همبستگی ضعیفی با داده‌های مشاهداتی می‌باشد. همچنین نتایج به‌دست آمده نشان داد به‌علت برف‌گیر بودن حوضه آبریز سد علویان پارامتر دما در کنار بارش به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم در فرآیند مدل‌سازی بوده است.

- 3387-3409. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02619-z>
- Najafi H, Nourani V, Sharghi E, Babaeian Amini A, "Multistep Modeling of Hydroclimatic Phenomena Using Wavelet-Neural Network Seasonal Model", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 52, 139-150.
<https://doi.org/10.22034/jcee.2020.16962.1418>
- Nourani V, Najafi H, Amini A-B, Tanaka H, "Using hybrid wavelet-exponential smoothing approach for streamflow modeling", *Complexity*, 2021.
<https://doi.org/10.1155/2021/6611848>
- Nourani V, Baghanam A-H, Adamowski J, Kisi O, "Applications of hybrid wavelet-Artificial Intelligence models in hydrology: A review", *Journal of Hydrology*, 2014, 514, 358-377.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.057>
- Razaghi P, Babazadeh H, Shourian M, "Development of multi-purpose reservoir operation hedging rule in water resources shortage conditions using MODSIM8.1", *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 2014, 3, 11.
- Sharghi E, Nourani V, Molajou A, Najafi H, "Conjunction of emotional ANN (EANN) and wavelet transform for rainfall-runoff modeling", *Journal of Hydroinformatics*, 2019, 21, 136-152.
<https://doi.org/10.2166/hydro.2018.054>
- Shi Y, Eberhart RC, "Parameter selection in particle swarm optimization", *Evolutionary Programming VII: 7th International Conference*, EP98 San Diego, California, USA, 25-27 March, 1998.
- Soudi M, Ahmadi H, Yasi M, Sebilla S, Ahmad hamidi S, "Regulation of the Rule Curve of Dams Based on Conception of Environmental Flow (Case Study: Elected Inflow Rivers to Lake Urmia)", *Iran-Water Resources Research*, 2019, 15, 329-341.
- Wei S, Yang H, Song J, Abbaspour K-C, Xu Z, "System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China", *European Journal of Operational Research*, 2012, 221, 248-262.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.014>
- Xie J-X, Cheng C-T, Chau K-W, Pei Y-Z, "A hybrid adaptive time-delay neural network model for multi-step-ahead prediction of sunspot activity", *International Journal of Environment and Pollution*, 2006, 28, 364-381.
<https://doi.org/10.1504/ijep.2006.011217>
- Yang J-S, Yu S-P, Liu G-M, "Multi-step-ahead predictor design for effective long-term forecast of hydrological signals using a novel wavelet neural network hybrid model", *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2013, 17, 4981-4993.
<https://doi.org/10.5194/hess-17-4981-2013>
- Yang J, Lei K, Khu S, Meng W, "Assessment of water resources carrying capacity for sustainable development based on a system dynamics model: a case study of Tieling City, China", *Water Resources Management*, 2015, 29, 885-899.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0849-y>
- Zarei MA, Lalehzari R, "Efficiency of Particle Swarm Optimization and Multiobjective Genetic Algorithm
- Antar MA, Elassiouti I, Allam MN, "Rainfall-runoff modelling using artificial neural networks technique: a Blue Nile catchment case study", *Hydrological Processes: An International Journal*, 2006, 20, 1201-1216.
<https://doi.org/10.1002/hyp.5932>
- Chang F-J, Tsai M-J, "A nonlinear spatio-temporal lumping of radar rainfall for modeling multi-step-ahead inflow forecasts by data-driven techniques", *Journal of Hydrology*, 2016, 535, 256-269.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.056>
- Dinu C, Drobot R, Pricop C, Blidaru TV, "Flash-flood modelling with artificial neural networks using radar rainfall estimates", *Modelling in Civil Environmental Engineering*, 2017, 13, 10-20.
<https://doi.org/10.1515/mmce-2017-0008>
- Feizi H, Dashti R, Sattari MT, Nourani V, "Application of Teaching-Learning based optimization algorithms in the operation of Eleviyan reservoir considering environmental demand", *Water and Soil Science*, 2023, 33, 199-216.
<https://doi.org/10.22034/ws.2022.522485757.2485>
- Ghashghaie M, Marofi S, Marofi H, "Using system dynamics method to determine the effect of water demand priorities on downstream flow", *Water Resources Management*, 2014, 28, 5055-5072.
<https://doi.org/10.1007/s11269-014-0791-z>
- Ghorbani MA, Hosseini SH, H. Kashan M, Abbasi H, "Evaluation of Alavian Reservoir Operation Performance under the Condition of Future Climate Change", *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2015, 45, 59-72.
- Ghorbani MA, Khatibi R, Karimi V, Yaseen ZM, Zounemat-Kermani, M, "Learning from multiple models using artificial intelligence to improve model prediction accuracies: application to river flows", *Water resources management*, 2018, 32, 4201-4215. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2038-x>
- Hassanzadeh E, Elshorbagy A, Wheeler H, Gober P, "Managing water in complex systems: An integrated water resources model for Saskatchewan, Canada", *Environmental Modelling and Software*, 2014, 58, 12-26.
<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.03.015>
- Kim TW, Valdés JB, "Nonlinear model for drought forecasting based on a conjunction of wavelet transforms and neural networks", *Journal of Hydrologic Engineering*, 2003, 8, 319-328.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2003\)8:6\(319\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2003)8:6(319))
- Mahab Consulting Engineers, "Operational Guidelines for Alavian Dam: Hydrology Report", East Azerbaijan Regional Water Company, 1995.
- Misaghi F, "Forecasting of the Alavian Dam Inflow Water Using Optimized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (OANFIS)", *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 2016, 47, 439-448.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2016.59314>
- Mohammadi B, Ahmadi F, Mehdizadeh S, Guan Y, Pham Q-B, Linh N-T, Tri D-Q, "Developing novel robust models to improve the accuracy of daily streamflow modeling", *Water Resources Management*, 2020, 34,

in Optimal Operation of Agricultural Water Resources", Journal of Civil and Environmental Engineering, 2023, 52, 163-172.

<https://doi.org/10.22034/jcee.2021.7970.1224>

Zarghami M, Rahmani MA, "Toward effective water diplomacy by using system dynamics: case study", The 33rd International Conference of the System Dynamics Society Cambridge, Massachusetts, USA, 2015.