تحقیقات منابع آب ایران
Iran-Water Resources Research

سال هشتم، شماره ۲، پائیز ۱۳۹۱
Volume ۸, No. ۲, Fall ۲۰۱۲ (IR-WRR)
۱-۱۱

ترکیب مدل برنامه ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی-فازی تطبیقی در بهره برداری بهینه چند هدفه از یک سیستم دو مخزنی

وحید نورانی[۱] ، نعیمه ابوالواسط[۲*] و کامران صالحی[۲]

چکیده

بـهینه سـازی بهره برداری از مخازن یکی از مهمترین مسائل مطرح در زمینه مدیریت منابع آب می‌باشد. در واقع نیاز مـبرم به اسـتفاده صـحیح از منـابع آب و انرژی، لزوم انجام برنامه‌ریزی جامع و بهره‌برداری صحیح از سدها را بیش از پیش روشن می‌سازد. در حال حاضر تحقـیقات گسترده‌ای در مورد تعمیم روش‌های بهینه‌سازی تک هدفه به چند هدفه برای سیستم‌های چند مخزنی با پیچیدگی‌های بیـشتر در حال مطالعه و بررسی می‌باشد. در این مقاله، مسأله بهینه‌سازی بهره برداری از سیستم مخازن با سه هدف مختلف تأمین نیازهای آبی پایین دست، کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی از مخازن برای سیستم دو مخزنه در حوضه آبریز سفیدرود (واقـع در شمال ایران)، براساس برنامه‌ریزی آرمانی مدل‌سازی شده است. با مقایسه نتایج مدل‌های تحقیق، مدلی که دارای شاخص عملکرد مخزن مناسب تری بود به عنوان مدل برتر انتخاب گردید. در نهایت جهت منظور کردن عدم قطعیت و همچنین برای به دست آوردن روش کلی بهره‌برداری از سیستم مخازن و به دلیل این که قواعد زبانی مزیت قابل توجهی در فهم بهتر و تفسیر آسان‌تر سیستم دارد، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی ساخته شد. نتایج تحـقیق، حاکی از موفقیت مدل به کار گرفته شده در مدیریت صحیح سیـستم دو مخزنه مورد نظر می‌باشد.

کلمات کلیدی: مخازن، بهره برداری، بهینه‌سازی چند هدفه، شبیه‌سازی، سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴ فروردین ۱۳۸۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۸ مرداد ۱۳۹۱

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
۲- کارشناس ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.
*- نویسنده مسئول

A hybrid Goal Programming method and Adaptive Neural-Fuzzy Inference System for Optimal Operation of a Multi-Objective Two-Reservoir System

V. Nourani [1] , N. Abolvaset [2] and K. Salehi [2]*

Abstract

Optimization of reservoirs operation is one of the most important tasks in the field of water resources management. In fact, vital requirement for beneficial use of water and energy resources clear the necessity of doing integrated planning and right operation of dams. recently, research has been made focusing on a shift from traditional single objective models to multi–objective models for the planning of multiple reservoir systems in a river basin. In this study the three objectives of meeting irrigation and environmental demand, flood control and recreation (sometimes in conflict with each other) are referred to for a two reservoir system by Goal Programming.

Within this framework, the mathematical model of two reservoirs system in Sefidrud watershed (Northern Iran) with the three objectives is formulated and the system parameters and decision variables are defined. The problem involves finding desired water releases from each reservoir in the system in order to satisfy the multiple objectives.

With comparing results of optimization models of this study, the model with the higher reliability indices was chosen as the best model. Due to the considerable advantages of linguistic rules in better inferring and interpreting the systems, an adaptive neural based fuzzy inference system (ANFIS) approach is used to consider uncertainties and to achieve a general method for multipurpose multi reservoir systems. The results of the Adaptive Neural Fuzzy Inference System (ANFIS) models shows that they can be applied successfully to provide high accuracy for the management of the reservoir systems.

Keywords: Reservoirs, Operation, Multi objective Optimization, Simulation, Adaptive Neural Fuzzy Inference System.

Received: April ۳, ۲۰۱۰

۱- Associate Professor, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran
۲- Master of Science Graduated, Faculty of Civil Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran E-mail: na_vaset۸٦@yahoo.com
*- Corresponding Author

Accepted: August ۸, ۲۰۱۲

۱- مقدمه

با توجه به کمبود آب در ایران، مدیریت منابع آب از اهمیت خاصی برخوردار است و مدیریت صحیح و مناسب این منـابع در رفع مشکلات آبی کشور نقش ویژه‌ای را ایفا می‌کند. استفاده از آب‌های سطحی با مهار و جلوگیری از هدر رفتن آن‌ها به شرط آسیب نرساندن به اکوسیستم موجود امکان‌پذیر است. یکی از روش‌های استفاده از آب‌های سطحی، احداث سد است که به لحاظ وجود نیازهای آبی در نقاط متعدد مکانی، گاه سیستم ذخیره‌ای شامل یک مخزن و گاهی شامل چندین مخزن متوالی بر روی رودخانه و یا شبکه‌ای از مخازن بر روی رودخانه‌ها و سرشاخه‌های آن مطرح می‌گردد. در این میان نحوه بهره‌برداری از این مخازن به اندازه احـداث خود سـدها مهم می‌باشد. به عبارت بهتر، به جای احداث چندین سد جدید با هزینه بالا برای جبران کمبود آب، می‌توان از سـدهای موجود، بهره‌برداری بهینه و مناسب انجام داد. عـدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی منابع آب حوضه آبریز در آینده، متغیر بودن رژیم‌های بارندگی و جریان رودخانه در سال‌های مختلف، اتخاذ یک راهکار مناسب جهت مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخزن سدها را با روش‌های علمی، ضروری می‌نمایاند. بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن، مبحثی است که حجم زیادی از تحقیقات را به خود اختصاص می‌دهد و در این راسـتا مدل‌های بهینه‌سازی مختلفی توسعه یافته و به کار گرفته شده‌اند.

Loganathan and Bhattacharya (۱۹۹۰)، پنج تکنیک مختلف برنامه‌ریزی آرمانی[۱]، شامل ۱) Weighte GP ۲) Preemptive GP ۳) Min-Max GP ۴) Fuzzy GP و ۵) Interval GP را برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن در حوضه رودخانه گرین به کار بردند. Russell et al. (۱۹۹۶)، از پایگاه قواعد فازی برای به دست آوردن قوانین بهره‌برداری از مخزن برق آبی تک منظوره استفاده کردند. آن‌ها در ساخت قوانین فازی از عملکرد واقعی مخزن و تجربه بهره بردار استفاده نمودند.

Eschenbach et al. (۲۰۰۱)، از سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری GP، برای بهینه‌سازی چند هدفه سیستم‌های چند مخزنه استـفاده نمودند. ایشان Preemptive GP را جهت مدل‌سازی انتخاب نمودند و بدین منظور از نرم‌افزار RiverWare به عنوان ابزاری مناسب برای بهینه‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های چند مخزنه جهت بهره‌برداری روزانه استفاده کردند. Labadie (۲۰۰۴)، آخرین کارهای صورت گرفته در زمینه بهره‌برداری سیستم‌های چند مخزنه با استفاده از الگوریتم‌های ریاضی و فراکاوشی را بررسی نموده است. وی کاربرد الگوریتم‌هایی همـچون ژنـتیک، شبـکه‌های عصـبی مصـنوعی و روش‌های مبـتنی بر سیستم‌های فازی را مورد بحث قرار داده است. Abdelaziz Foued and Sameh (۲۰۰۱)، یک مسأله چندمعیاره[۲] را برای بهـره‌برداری بهینه از مخازن واقع در شمال تونس، با استفاده از برنامه ریزی آرمانی استوکستیک[۳] حل نمودند.

عدم قطعیت‌های موجود در پدیده‌های هیدرولوژیکی مستلزم استفاده از ابزارهایی می‌باشد که قادر به در نظر گرفتن ابهامات و پیچیدگی‌های خاص موجود در این پدیده‌ها است. تاکنون تحقیقات متعددی در خصوص شبیه‌سازی عدم قطعیت در پدیده‌های هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم‌های هوشمند انجام گرفته است: از جمله این سیستم‌ها می‌توان به سیستم استنتاج فازی و اخیراً سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی[۴] اشاره کرد. در زمینه استفاده از ANFIS جهت شبیه‌سازی عدم قطعیت در پدیده‌های هیدرولوژیکی می‌توان به کارهای انجام گرفته در مورد مدل‌سازی بارش-رواناب (نورانی و همکاران، ۱۳۸۸) شبیه‌سازی بار معلق رسوب (Kişi, ۲۰۰۵ and Rajaee et al. ۲۰۰۹)، آب‌های زیرزمینی (Dixon, ۲۰۰۵) و بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن (Mousavi et al. ۲۰۰۷) اشاره کرد. همچنین در این زمینه Mehta and K.Jain (۲۰۰۹)، جهت ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از یک مخزن واقع در هند با اهداف تأمین آب شهری، کشاورزی و نیروی برقابی از روش‌های مدل‌سازی FRB[۵] و ANFIS استفاده نمودند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از ارائه نتایج بهتر توسـط ANFIS نسبت به مـدل فـازی مـمدانی به کاررفته می‌باشد.

در این مقاله، برای یک سیستم دو مخزنه از دیدگاه بهره‌برداری چند هدفه، مدلی بهینه بر اساس برنامه ریزی آرمانی ارائه و حل گردیده است، سپس جهت بیان روش کلی بهره برداری از سیستم مخازن و به دلیل این که قواعد زبانی مزیت قابل توجهی در فهم بهتر و تفسیر آسان تر سیستم دارد، کارآیی سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-مواد و روشها

۲-۱-روش برنامه ریزی آرمانی

مدل برنامه‌ریزی آرمانی (GP)، یکی از مـدل‌های ریاضی مشهور برای حل مسـائل چند معـیاره است و شاید بتوان گفت که از قدیمی‌ترین مدل‌های موجود تصمیم گیری‌های چند هدفه می‌باشد

که کاربردهای وسیعی داشته است. این مدل قابلیت در نظر گرفتن همزمان چند هدف در یک مسأله را برای انتخاب قانع‌کننده‌ترین جواب از میان تعدادی جواب امکان‌پذیر و مناسب داراست و از نظر کاربردی GP یک روش ساده و قابل فهم است. به طور کلی تلاش در GP بر آن است که منطق مدل‌های ریاضی بهینه تواماً با تمایل تصمیم گیرنده[۶] در تأمین مقاصد مشخصی از اهداف مختلف مورد توجه قرار بگیرند. Charnes and Cooper (۱۹۹۵)، اولین مقاله را درباره GP منتشر کردند به طوری که آن‌ها کمینه کردن مجموع قدرمطلق انحرافات از مقاصد مشخصی را مورد بررسی قرار دادند (اصغرپور، ۱۳۷۷). همان گونه که ذکر شد، استفاده از مدل GP، به سرعت توسط محققان دیگر در زمینه‌های گوناگون گسترش پیدا کرد، از جمله می‌توان به کاربرد آن در مدیریت حوضه‌های آبریز، اقتصاد و بازرگانی، کنترل کیفیت، منابع انسانی، تولید، حمل ونقل، مکان یابی، مطالعات فضایی، مخابرات، کشاورزی، جنگل‌داری و غیره اشاره کرد (Aouni et al. ۲۰۰۵).

به عنوان مثال در مورد هدف کنترل سیلاب، مدل برنامه‌ریزی آرمانی می‌تواند به صورت روابط (۱)، (۲) و (۳) بیان شود:

$$\text{Minimize} \quad \sum_j v_j D_j + w_j E_j \qquad (۱)$$

$$\text{Subject to} \quad g_i(x) = b_i \qquad i = ۱,۲, \dots, m \qquad (۲)$$

$$Z_j(x) = T_j^* - D_j + E_j \qquad (۳)$$

در این روابط، v_j و w_j، وزن معیارها می‌باشند که به اصطلاح نشان دهنده اهمیتی هستند که تصمیم گیرنده به معیارها می‌دهد، m، تعداد قیود موجود در مسأله، x، متغیر تصمیم گیری، j، تعداد اهداف متفاوت، $g_i(x)=b_i$، قیود مسئله (جواب‌های امکان پذیر)، $Z_j(x)$، تابع معیار مورد نظر و T_j^*، مقدار مناسب برای معیار مورد نظر می‌باشد. به عنوان مثال T_j^*، می‌تواند تراز آب مورد نظر در مخزن برای جلوگیری از وقوع سیلاب باشد، D_j، در این حالت مقداری کمتر از این تراز و E_j، مقداری بیشتر از آن است که به صورت رابطه (۳) به مدل اضافه شده‌اند (Loucks and Van Beek, ۲۰۰۵).

۲-۲- سیستم استنتاجی عصبی - فازی تطبیقی

با وجود موفقیت‌های زیادی که در زمینه بهره برداری از مخازن به دست آمده است، انطباق تکنیک‌های بهینه سازی جهت بهره برداری با مشکلات زیادی مواجه است. لذا تلاش در جهت بهبود و ساده کردن عملیات محاسباتی به تنهایی نمی‌تواند کارا باشد و به کارگیری مدلی که با فهم و درک بهره بردار سازگاری داشته باشد بایستی در انتخاب مدل مدنظر قرار گیرد. در چند دهه اخیر منطق فازی برای مدل کردن مدیریت مخازن و حل ویژگی‌های مبهم آن پیشنهاد شده است. با وجود این در منطق فازی، روند سیستماتیکی برای طراحی یک کنترل کننده فازی وجود ندارد. به عبارت دیگر، یک شبکه عصبی این توانایی را دارد که از محیط آموزش ببیند (جفت‌های ورودی– خروجی)، ساختارش را خود مرتب کند و با شیوه‌ای، تعامل خود را تطبیق دهد ولی منطق فازی از چنین توانایی برخوردار نیست. بدین منظور پروفسور Jang (۱۹۹۳) مدل ANFIS را ارائه کرد که قابلیت ترکیب توانایی دو روش مذکور را داشت (Jang, ۱۹۹۳). ANFIS، قابلیت خوبی در آموزش، ساخت و طبقه بندی دارد و همچنین دارای این مزیت است که اجازه استخراج قوانین فازی را از اطلاعات عددی یا دانش متخصص می‌دهد و به طور تطبیقی یک قاعده - بنیاد می‌سازد. علاوه بر این، می‌تواند تبدیل پیچیده هوش بشری به سیستم‌های فازی را تنظیم کند. مشکل اصلی در مدل ANFIS، نیاز نسبتاً زیاد به زمان برای آموزش ساختار و تعیین پارامترها می‌باشد. به منظور ساده سازی در تعریف سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی، فرض می‌شود که سیستم استنتاجی مورد نظر دو ورودی y و x و یک خروجی z دارد. برای یک مدل فازی Takagi-Sugeno درجه اول، می‌توان یک مجموعه قانون نمونه را با دو قانون اگر-آنگاه فازی به صورت زیر بیان کرد (Jang et al. ۱۹۹۷):

قانون اول: اگر x برابر $A_۱$ و y برابر $B_۱$ باشد آنگاه $z_۱=p_۱x+q_۱y+r_۱$

قانون دوم: اگر x برابر $A_۲$ وy برابر $B_۲$ باشد آنگاه $z_۲=p_۲x+q_۲y+r_۲$

که r_i ،p_i و q_i $(i=۱,۲)$ پارامترهای خطی بخش تالی مدل فازی Takagi-Sugeno درجه اول هستند.

ساختار ANFIS شامل پنج لایه است:

لایه اول (گره‌های ورودی)، هر گره از این لایه، مقادیر عضویتی که به هر یک از مجموعه‌های فازی مناسب تعلق دارند، با استفاده از تابع عضویت، مطابق روابط (۴) و (۵) تولید می‌کنند.

$$O_{۱,i}=\mu_{A_i}(x), \qquad i=۱,۲ \qquad (۴)$$

$$O_{۱,i}=\mu_{B_{i-۲}}(y), \qquad i=۳,۴ \qquad (۵)$$

که در روابط (۴) و (۵) y و x ورودی‌های غیرفازی به گره i و A_i و B_i برچسب‌های زبانی هستند که به ترتیب با توابع عضویت مناسب μ_{A_i} و μ_{B_i} مشخص می‌شوند و از فازی سازهای گوسی، مثلثی، ذوزنقه‌ای و زنگی شکل استفاده می‌شود.

لایه دوم (گره‌های قاعده)، در این لایه عملگر" و" (AND) به کار برده می‌شود تا خروجی (قوه اشتغال) که نمایانگر بخش مقدم آن قانون است، بدست آید. قوه اشتغال به مقدار درجه‌ای که بخش مقدم یک قانون فازی برآورده شده، گفته می‌شود و به تابع خروجی آن قانون شکل می‌دهد. از این رو، خروجی‌های $O_{2,i}$ این لایه، مطابق رابطه (۶)، حاصلضرب درجات مربوط به لایه اول هستند.

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x).\mu_{B_i}(y), \quad i=1,2 \qquad (۶)$$

لایه سوم (گره‌های متوسط)، هدف اصلی در این لایه، تعیین نسبت هر قوه اشتغال در قانون i به مجموع همه قوه اشتغال قوانین می‌باشد. در نتیجه $\overline{w_i}$ به عنوان قوه اشتغال نرمال شده با استفاده از رابطه (۷) به دست می‌آید.

$$O_{3,i}=\overline{w_i}=\frac{w_i}{w_1+w_2}, \quad i=1,2 \qquad (۷)$$

لایه چهارم (گره‌های نتیجه)، تابع گره چهارمین لایه توزیع در قانون i را به کل خروجی محاسبه می‌کند و به صورت رابطه (۸) تعریف می‌شود:

$$O_{4,i}=\overline{w_i}f_i=\overline{w_i}\left(p_i x+q_i y+r_i\right), \quad i=1,2 \qquad (۸)$$

که $\overline{w_i}$ خروجی گره i از لایه قبلی است، r_i ،p_i و q_i ضرایب این ترکیب خطی بوده، همچنین مجموعه پارامترهای بخش تالی مدل فازی Takagi-Sugeno نیز می‌باشند.

لایه پنجم (گره‌های خروجی)، که در رابطه (۹) نیز آورده شده است. بنابراین، در این لایه فرآیند غیرفازی سازی، نتایج هر قانون فازی را به خروجی غیر فازی تغییر شکل می‌دهد.

$$O_{5,i}=\sum_i \overline{w_i}f_i=\frac{\sum_{i=1} w_i f_i}{\sum_{i=1} w_i} \qquad (۹)$$

در شکل ۱ الگوریتم ساده‌ای از عملکرد و ارتباط بین لایه‌ها در مدل استنتاج عصبی فازی تطبیقی آورده شده است.

این شبکه بر اساس یادگیری با نظارت، آموزش داده می‌شود. بنابراین هدف ما آموزش شبکه‌های تطبیقی است که قادر به تخمین توابع نامشخص حاصل از اطلاعات آموزش بوده و مقدار دقیقی برای پارامترهای بالا پیدا کنند. ویژگی متمایز کننده ANFIS، فراهم کردن الگوریتم یادگیری پیوندی، روش شیب گرادیان و روش حداقل مربعات، به منظور اصلاح پارامترها می‌باشد.

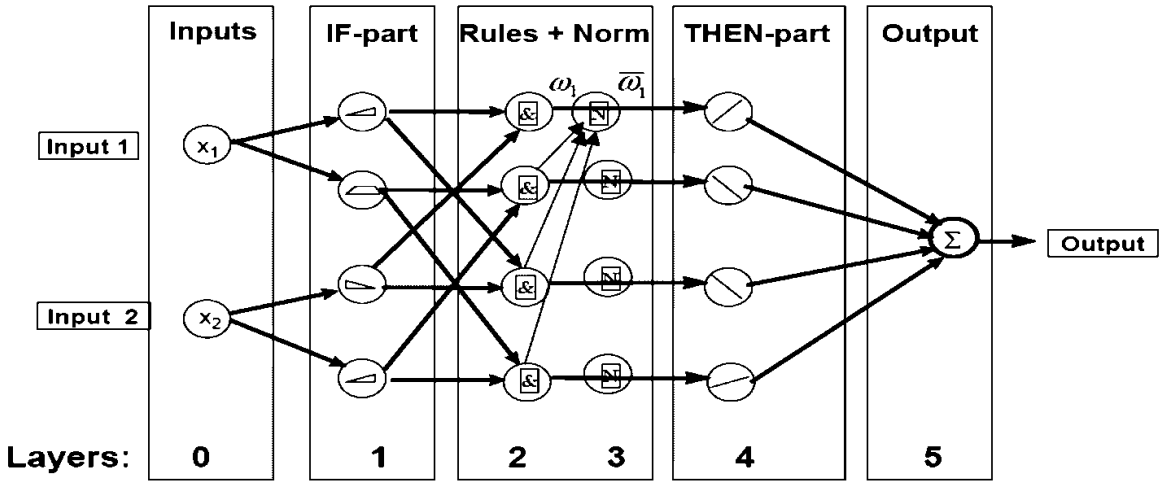
روش شیب گرادیان به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای غیرخطی مقدماتی (a_i,b_i) را تنظیم کند، در حالی که روش حداقل مربعات به کار گرفته می‌شود تا پارامترهای خطی بخش تالی را تعیین کند (Jang et al. ۱۹۹۷).

۲-۳- مطالعه موردی

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل دو سد مخزنی سفیدرود و شهریار می‌باشد که در حوضه آبریز سفیدرود واقع شده اند. مساحت این زیر حوضه ۶۰۰۱۵ کیلومتر مربع می‌باشد.

شکل شماتیک موقعیت سدهای سفیدرود و شهریار و همچنین نمایی از حوضه آبریز سفید رود، در اشکال ۲ و ۳ ارائه شده است.

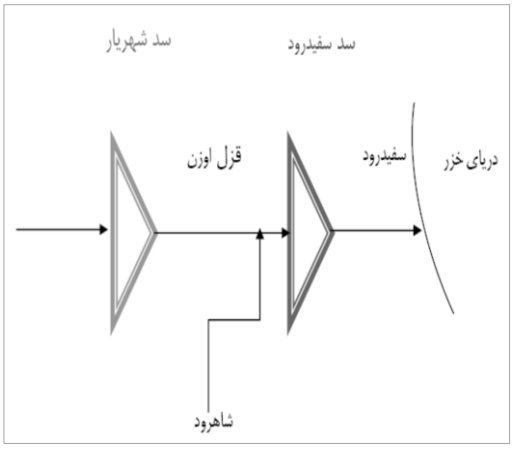
سد سفیدرود: سد بتنی- وزنی سفیدرود در ۲۵۰ کیلومتری شمال غربی شهر تهران و ۱۰۰ کیلومتری شهر منجیل در محل تلاقی دو رودخانه قزل اوزن و شاهرود، در فاصله بین سال‌های ۱۳۴۰-۱۳۳۶ ساخته شده است. رسوب‌گذاری شدید مخزن سد سفیدرود که بهره‌برداری از آن از سال ۱۳۴۱ شروع شده، به طور قابل ملاحظه‌ای توانایی این مخزن را در تأمین نیازهای آبی منطقه کاهش داده است.



شکل ۱- شمای ساده‌ای از مدل ANFIS

به طوری که ظرفیت اولیه این مخزن که ۱۷۶۰ میلیون متر مکعب بوده است در سال ۱۳۵۹ به ۹۰۰ میلیون متر مکعب تقلیل یافته و به طور متوسط حجم مخزن سد به میزان ۴۷ میلیون متر مکعب در سال کاهش داشته است. هدف از رسوب زدایی سد سفیدرود که در سال ۱۳۵۹ آغاز گردید مقابله با رسوب‌گذاری سریع مخزن این سد بوده است. بدیهی است با استمرار رسوب‌گذاری در مخزن احتمال وقوع کمبودهای شدید همراه با نتایج زیان‌آور اقتصادی و اجتماعی وجود خواهد داشت. در چنین شرایطی پروژه سد شهریار (استور) با هدف اصلی افزایش کارآیی مخزن سد سفیدرود و جایگزینی آن در آینده نزدیک به منظور تأمین نیازهای آبی منطقه گیلان مطرح گردید. (مهاب قدس، ۱۳۸۲)

سد شهریار (استور): سد بتنی دو قوسی شهریار در ۳۹ کیلومتری شمال شرقی شهرستان میانه بر روی رودخانه قزل اوزن در استـــان آذربایجـــان شرقی در دست احداث می‌باشد. در شکل ۴

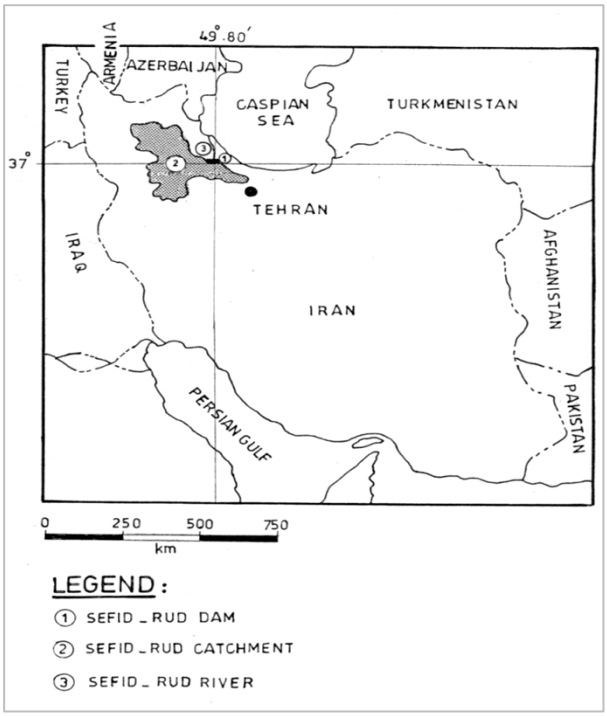


شکل ۲- شکل شماتیک موقعیت سد شهریار و سد سفیدرود

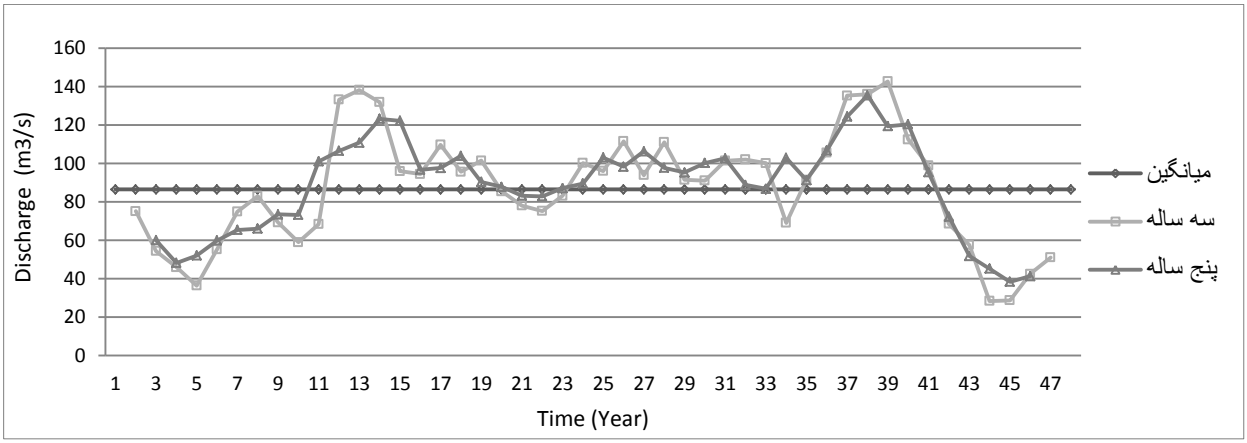
آبدهی سالانه ورودی به سد استور برای ۴۸ سال آماری، در مقایسه با میانگین درازمدت و میانگین‌های متحرک ۳ و ۵ ساله نشان داده شده است تا نحوه تغییرات و دوره‌های خشک و تر قابل مشاهده باشد.

۲-۴-تشریح ساختار مدل پیشنهادی

در این مقاله سعی گردید در مرحله اول بر اساس مدل برنامه‌ریزی آرمانی یک سیستم دو مخزنه، با اهداف بهینه‌سازی مختلف، از دیدگاه قانون بهره‌برداری به صورت همزمان، بهینه‌سازی شود.



شکل ۳- حوضه آبریز سفیدرود



شکل ۴- میانگین آبدهی سالانه و میانگین متحرک ۳ و ۵ ساله ورودی سد شهریار

در مرحله دوم نیز سعی شد با استفاده از نتایج مدل بهینه سازی GP و به منظور وارد کردن عدم قطعیت و همچنین برای به دست آوردن روش کلی بهره برداری، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی ساخته شود. علت استفاده از سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی، به کار گیری قابلیت شبکه عصبی مصنوعی در ساخت قواعد سیستم استنتاج فازی می‌باشد. بدین منظور سیاست‌های بهره برداری بهینه حاصل از مدل GP به عنوان اطلاعات ورودی-خروجی جهت مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت به طوری که جریان ورودی به مخازن، حجم مخازن و نیاز پایین دست ماهانه به عنوان متغیرهای موجود در بخش مقدمه مدل فازی و رهاسازی از مخازن به عنوان متغیر بخش نتیجه درنظر گرفته شده است. برای تهیه مدل چند هدفه بهره‌برداری بهینه از این سیستم دو مخزنه، سه هدف کلی در نظر گرفته شده است که عبارتند از: تأمین نیاز آبی پایین دست (کشاورزی و محیط زیست)، کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی. به طور کلی عمده اهداف احداث سد شهریار، تأمین نیاز آبی کشاورزی و صنعتی گیلان (با افزایش کارآیی مخزن سد سفید رود)، تأمین نیاز آبی اراضی میانه و محیط زیست پایین دست و همچنین کنترل سیلاب می‌باشد. با در نظر گرفتن این مسأله در این مقاله این اهداف مورد توجه بیشتری قرار گرفته اند. در ادامه، با تحقیقاتی که در زمینه استفاده از سواحل مخازن جهت استفاده‌های تفریحی گردید، این هدف نیز جزو اهداف مورد مطالعه تحقیق در نظر گرفته شد. جدول ۱ نشان‌دهنده نیاز آبی پایین دست سد شهریار می‌باشد. ساختار ریاضی مدل بهینه سازی I به صورت روابط (۱۰) تا (۲۵) ارائه شده است: شایان ذکر است که در تمامی مدل‌های ارائه شده، اندیس ۱، مربوط به سد شهریار و اندیس ۲، مربوط به سد سفیدرود می‌باشد.

در مدل‌های چند هدفه[۸] تحقیق برای بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنه مورد مطالعه، ترکیبی از تمامی اهداف ذکر شده، منظور شده است.

جدول ۱- نیاز آبی پایین دست (کشاورزی و محیط زیست) سد شهریار (MCM[۷])

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۲۲	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۱۳	۲۵	۱۶۰	۱۶۸	۱۳۰	۵۰	۱۴

ساختار ریاضی مدل بهینه سازی چند هدفه I

Minimize

$$C=(aw\times OF_I)+(bw\times OF_{II})+(cw\times OF_{III}) \quad (۱۰)$$

Subject to

$$OF_I=\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Ad_1^+(y,t)+Ad_1^-(y,t)\right)+\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Ad_2^+(y,t)+Ad_2^-(y,t)\right) \quad (۱۱)$$

$$OF_{II}=\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Fd_1^+(y,t)+Fd_1^-(y,t)\right)+\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Fd_2^+(y,t)+Fd_2^-(y,t)\right) \quad (۱۲)$$

$$OF_{III}=\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Rd_1^+(y,t)+Rd_1^-(y,t)\right)+\sum_{y=1}^{48}\sum_{t=1}^{12}\left(Rd_2^+(y,t)+Rd_2^-(y,t)\right) \quad (۱۳)$$

$$R_1(y,t)=D_1(y,t)+Ad_1^+(y,t)-Ad_1^-(y,t) \quad (۱۴)$$

$$R_2(y,t)=D_2(y,t)+Ad_2^+(y,t)-Ad_2^-(y,t) \quad (۱۵)$$

$$S_1(y,t)=Fl_1(t)+Fd_1^+(y,t)-Fd_1^-(y,t) \quad (۱۶)$$

$$S_2(y,t)=Fl_2(t)+Fd_2^+(y,t)-Fd_2^-(y,t) \quad (۱۷)$$

$$S_1(y,t)=Rl_1(t)+Rd_1^+(y,t)-Rd_1^-(y,t) \quad (۱۸)$$

$$S_2(y,t)=Rl_2(t)+Rd_2^+(y,t)-Rd_2^-(y,t) \quad (۱۹)$$

$$S_1(y,t+1)=S_1(y,t)+Q_1(y,t)-R_1(y,t) \quad (۲۰)$$

$$S_2(y,t+1)=S_2(y,t)+Q_2(y,t)+kR_1(y,t)-Q_1(y,t)-R_2(y,t) \quad (۲۱)$$

$$S_{min}\le S_1(y,t)\le S_{max} \quad (۲۲)$$

$$R_{min}\le R_1(y,t) \quad (۲۳)$$

$$S_{min}\le S_2(y,t)\le S_{max} \quad (۲۴)$$

$$R_{min} \le R_{۲}(y,t) \qquad (۲۵)$$

همان‌گونه که ذکر گردید، مـدل‌های ارائه شده در این تحـقیق، براساس برنامه‌ریزی آرمـانی تهیه گردیده‌اند. در مدل‌های ارائه شده، برای فرمول‌بندی روابط بهینه‌سازی (توابع هدف و محدودیت‌ها) از داده‌ها و فرضیات زیر استفاده شده است. داده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده عبارتند از:

آمار دبی ورودی به مخازن به صورت متوسط ماهانه برای دوره آماری ۴۸ ساله (۸۳–۳۵)، آمار مربوط به نیاز آب مصرفی کشاورزی و زیست محیطی به صورت متـوسط ماهانه و همچنین موارد زیر در تهیه مدل‌ها در نظر گرفته شده‌اند:

منحنی سطح–حجم–ارتفاع مخازن، محدودیت حجم مخازن به صورت حداکثر و حداقل حجم، محدودیت میزان رهاسازی از مخازن، محدودیت تراز مناسب آب در مخزن برای کنترل سیلاب، محدودیت تراز مناسب آب در مخزن برای استفاده‌های تفریحی.

همچنین لازم به ذکر است که فرم ریاضی تابع هدف و قیود به کار رفته در مدل‌های II و III نیز مشابه مدل I می‌باشد و تفاوت در اعمال وزن‌هایی است که در توابع هدف مدل‌ها منظور شده اند به عبارت دیگر اهداف فوق الذکر دارای اولویت‌های یکـسانی از دیدگاه تصمیم‌گیرنده نمی‌باشند و همچنین تفاوت به کار رفته در مدل‌ها در ترازهای قراردادی آب، جهت استفاده‌های مورد بررسی، است. در تمامی مدل‌ها براساس نظر کارشناسان محترم تصمیم گیرنده در امور طرح سد شهریار اولویت نسبی هدف تأمین نیازهای آب کشاورزی و محیط زیست به خاطر اهمیت ویژه آن، بیشتر از دو هدف کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی در نظر گرفته شده است. در مدل I، وزن نسبی هدف کنترل سیلاب بیشتر از استفاده‌های تفریحی، در مدل II، با هم برابر و در مدل III، عکس حالت مدل I، اعمال شـده است. رابطه (۱۰)، رابطه تابع هدف مدل است که در این رابطه، OF_I، OF_{II} و OF_{III}، توابع هدف اهداف مورد مطالعه برنامه‌ریزی آرمانی در این تحقیق می‌باشند (روابط (۱۱) تا (۱۳)). البته لازم به ذکر است که این توابع با در نظر گرفتن وزن‌هایی، در مدل اعمال شده‌اند. aw ، bw و cw وزن‌های نسبی توابع هدف مدل هستند. مجموع این وزن‌ها بایستی برابر یک باشد. روابط (۱۴) و (۱۵) قیود مربوط به مدل برنامه‌ریزی آرمانی است که در آن، متغیرهای مازاد و کمبود مسأله جهت کمینه نمودن فاصله تقـاضا از میـزان خـروجی (رها سازی) از مخـزن در مدل اعمـال می‌شوند. به بیان دیگر، هدف، نزدیک کردن اختلاف (فاصله) بین میزان رهاسازی از مخزن و میزان نیاز، $D(y,t)$ ، می‌باشد که برای این منظور یک متغیر مازاد و یک متغیر کمبود به مدل به صورت روابط فوق الذکر اضافه شده است. روابط (۱۶) تا (۱۹)، نیز قیود مربوط به مدل برنامه‌ریزی آرمانی هستند که در آن، $RI(t)$ حجم معادل تراز قراردادی آب، جهت استفاده‌های تفریحی می‌باشد. به عنوان مثال در صورتی که هدف، تأمین حداقل عمق لازم به منظور کشتی‌رانی باشد، باید در قالب نیازهای آبی آن را ملحوظ نمود تا به موقع از مخزن رها گردد و حداقل عمق مورد نیاز کشتیرانی را در رودخانه فراهم نماید. $Fl(t)$ حجم معادل تراز قراردادی آب، جهت کنترل سیلاب می‌باشد. $Ad^{-}(y,t)$ و $Ad^{+}(y,t)$، $Fd^{+}(y,t)$ و $Fd^{-}(y,t)$، $Rd^{+}(y,t)$ و $Rd^{-}(y,t)$، متغیرهای مازاد و کمبود مدل برنامه‌ریزی آرمـانی می‌باشند. روابط (۲۰) و (۲۱) همان مهمترین قید موجود در مسأله بهره‌برداری مخزن، یعنی رابطه پیوستگی می‌باشند: به عبارت دیگر می‌توان گفت که در یک مخزن، ذخیره آب در ابتدای دوره بعد باید برابر حاصل جمع مقدار ذخیره و تفاضل ورودی‌ها و خروجی‌ها در ابتدای آن دوره باشد. در این رابطه، $S(y,t)$ برابر حجم ذخیره مخزن در دوره زمـانی مربوط به مـاه t از سـال y ، $Q(y,t)$ برابر ورودی‌های مخزن در دوره زمانی t و y، $R(y,t)$ برابر میزان رها سازی مخزن در دوره زمانی t و y، می‌باشد. لازم به ذکر است موارد زیر به صورت فرضیات رابطه پیوستگی در سیستم اعمال شده است: از تلفات سیستم به صورت تبخیر، نشت و ... صرف نظر شده است. از میزان بارش به سطح مخازن صرف نظر شده است. در رابطه پیوستگی سد سفیدرود، ورودی به مخزن به صورت دبی جریان ورودی به سد از رودخانه شاهرود و نیز ثلث میزان رهاسازی از سد شهریار در نظر گرفته شده است. و در نهایت، روابط (۲۲) تا (۲۵) مربوط به محـدودیت‌های کمینه و بیشینه حجم مخازن و میزان خروجی از آن‌ها می‌باشند. در شکل‌های ۵ تا ۸، نتایج حاصل از اجرای مدل‌های I، II و III، برای دوره آماری (۸۳–۳۵)، در حالت میانگین سال‌های آماری ذکر شده، نشان داده شده است. خروجی‌های مدل‌های مذکور به صورت ماهانه عبارتند از: حجم آب در مخازن در دوره آماری مورد نظر، میزان رهاسازی آب از سدها در دوره آماری مورد نظر، میزان متـغیرهای مازاد و کمـبود مدل برنامه‌ریزی آرمانی به طوری که مشاهده می‌شود، در مدل‌های I, II, III تغییرات حجم آب در مخزن سدهـای شهریـار و سفیدرود محسوس می‌باشد. در مخزن سد شهریار میزان حجم آب در ماه‌های شهریور و مهر، دارای حداقل و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد، دارای حداکثر مقدار خود می‌باشد. سد سفیدرود نیز حالتی تقریباً مشابه سد

شهریار دارد به طوری که در مخزن این سد، حجم آب در ماه شهریور دارای کمترین مقدار و در ماه‌های خرداد وتیر دارای بیشترین مقدار است. با این وجود در مدل‌های I, II, III، نتایج نشان دهنده تغییرات آن چنانی در میزان رها سازی از سـدها نمی‌باشد و به طـوری که در قسـمت بعدی در مورد شاخص‌های عملکرد مخزن برای مدل‌ها بحث خواهد شد، در تمامی این مدل‌ها معیارهای عملکرد دو سد در تأمین نیازها، نتایج کمابیش بهتری داشته‌اند.

۲-۵-شاخص‌های عملکرد مخزن

عموماً سیستم مخازن ذخیره برای بهره‌برداری در شرایط نرمال یعنی تأمین تقاضای طرح، طراحی می‌شوند. اما به دلیل بروز دوره خشکی شدیدتر از دوره خشکی مشاهداتی یا به دلیل تغییر ناگهانی در الگوی تقاضای آب (رهاسازی آب)، ممکن است سیستم در زمان بهره‌برداری دچار شکست شود.به منظور ارزیابی سیستم تحت شرایط شکست، از شاخص‌های عملکرد مخزن استفاده می‌شود که عبارتند از: ضریب اعتمادپذیری[۹] :سیستم چند بار با شکست روبرو می‌شود و رابطه ریاضی آن به صورت رابطه (۲۶) می‌باشد:

$$\delta = \left(1 - \frac{f}{T}\right) \qquad (۲۶)$$

که δ، قابلیت اعتماد زمانی ($0 \leq \delta \leq 1$)، f، تـعداد کل دوره‌های شکست و T، تعداد کل دوره بهره برداری است.

برگشت پذیری[۱۰] : سیستم پس از وقوع یک شکست، با چه سرعتی به وضعیت رضایت بخش خود باز می‌گردد و رابطه ریاضی آن به صورت رابطه (۲۷) می‌باشد:

$$\lambda = \frac{1}{\frac{f}{f_s}} \qquad (۲۷)$$

که λ، سرعت برگشت پذیری، f_s، تعداد سری دوره‌های شکست پیوسته و f، تعداد کل دوره‌های شکست است.

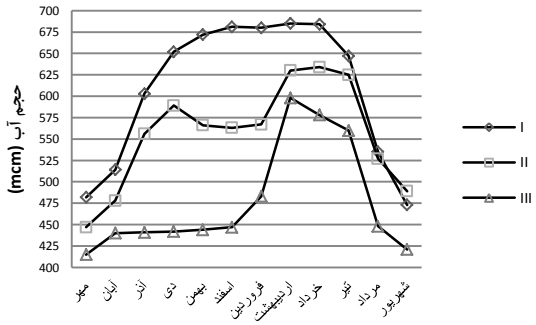
آسیب پذیری[۱۱]: شکست‌های محتمل سیستم دارای چه وسعتی است که به صورت رابطه (۲۸) تعریف می‌شود:

$$\eta = \frac{(\sum_{t\epsilon f} R_t^* - \sum_{t\epsilon f} R_t)}{\sum_{t\epsilon f} R_t^*} \qquad (۲۸)$$

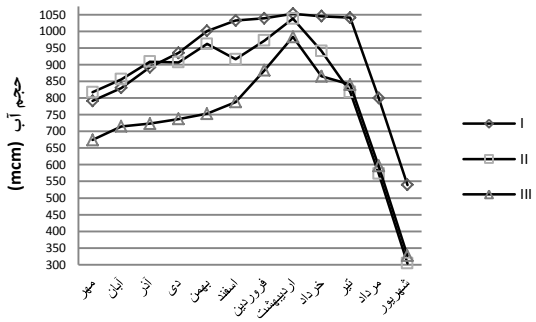
که η، بزرگی شکست، R_t^* تقاضای مورد نظر در طول دوره t دوره شکست، R_t، مقدار آب رها شده از سیستم در طول دوره t دوره شکست می‌باشد.

این سه شاخص تصویر کاملاً روشنی از عملکرد مخزن طی دوره بهره‌برداری ارائه می‌کنند (Loucks and Van Beek, ۲۰۰۵).

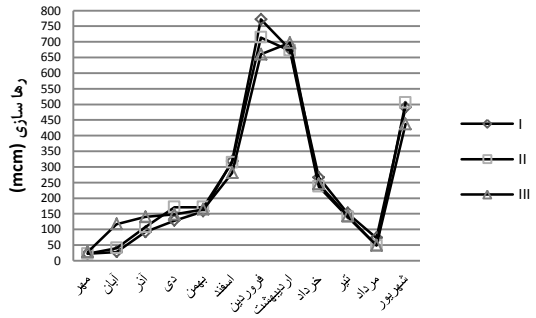
Loucks در سال ۱۹۹۷ به منظـور تعیین مقدار شاخص پایداری[۱۲] مخزن در طراحی و بهره‌برداری، سه شاخص اعتمادپذیری، سرعت برگشت‌پذیری و آسیب‌پذیری را به صورت رابطه (۲۹) با هم ترکیب کرد:



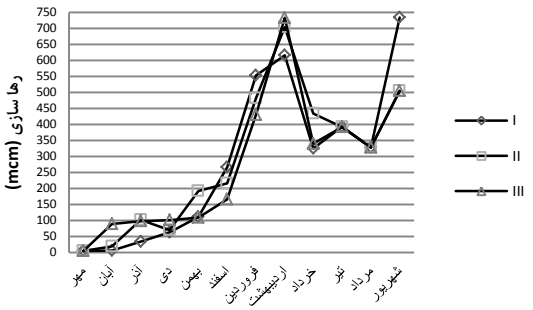
شکل ۵- مقایسه حجم آب (mcm) در مخزن سد شهریار، مدل‌های I, II, III



شکل ۶- مقایسه حجم آب(mcm) در مخزن سد سفیدرود، مدل‌های III,II,I



شکل ۷- مقایسه میزان رهاسازی (mcm)از مخزن سد شهریار، مدلهای I, II, III

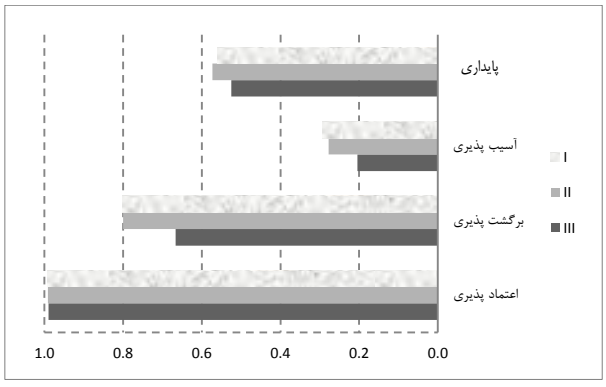


شکل ۸- مقایسه میزان رهاسازی (mcm) از مخزن سد سفیدرود، مدل‌های I, II, III

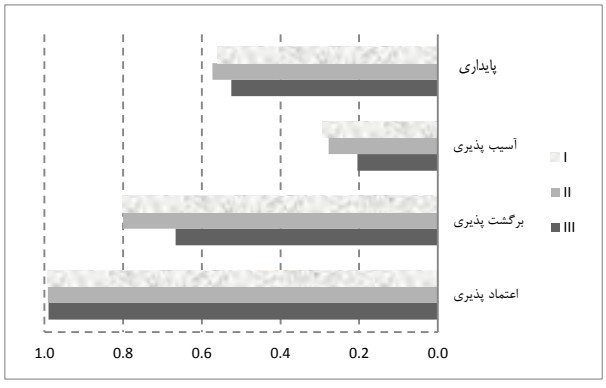
$$\varphi = \delta\lambda(1-\eta) \qquad (۲۹)$$

که در رابطه فوق، Φ شاخص پایداری، δ، اعتماد پذیری، λ، سرعت برگشت پذیری و η آسیب پذیری است.

این شاخص برای مقایسه طراحی‌ها و سیاست‌های بهره‌برداری مختلف در یک سیستم بسیار مناسب می‌باشد. در بهره‌برداری سیستم‌های ذخیره ایده‌آل‌ترین سیاست بهره‌برداری زمانی است که سیستم دارای بیشترین ضریب اعتمادپذیری و برگشت‌پذیری و کمترین آسیب‌پذیری باشد. هر چند داشتن چنین سیستمی به خاطر وجود تعامل بین شاخص‌های عملکرد مخزن، چندان امکان پذیر نمی‌باشد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ شاخص‌های عملکرد سیستم مخازن سفیدرود و شهریار ارائه شده است.



شکل ۹- مقایسه شاخص‌های عملکرد سد سفیدرود



شکل ۱۰- مقایسه شاخص‌های عملکرد سد شهریار

۲-۶-نتایج کاربرد مدل ANFIS در بهره برداری از سیستم مخازن

تئوری مجموعه‌های فازی از جمله ابزارهایی است که امکان مدل‌سازی ریاضی عدم صراحت و عدم قطعیت در اطلاعات را فراهم می‌کند. ویژگی‌های یاد شده باعث رویکرد محققین مختلف به استفاده از تئوری فازی در حل مدل‌های بهینه‌سازی منابع آب گشته است (Rajaee et al., ۲۰۰۹). برای شبیه‌سازی نتایج مدل بهینه‌سازی سیستم دو مخزنه و چند منظوره مورد مطالعه، اقدام به تشکیل سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی گردید که بتواند در تمامی شرایط و حالت‌ها بیانگر روش کلی بهره‌برداری از سیستم مخازن باشد. در این راستا جهت مدل‌سازی، تقسیم‌بندی داده‌ها برای مراحل آموزش، بررسی و آزمون در حالات مختلفی انجام گرفت و در نهایت از ۷۰ درصد داده‌های مربوط به نتایج مدل بهینه‌سازی II (مناسبترین مدل بهینه‌سازی چند هدفه این تحقیق) برای آموزش و ۲۰ درصد آن برای بررسی و ۱۰ درصد مابقی برای آزمایش مدل استفاده گردید. برای هماهنگ سازی نوع و محدوده داده‌ها اقدام به نرمال‌سازی آن‌ها با رابطه (۳۰) گردید که در این صورت محدوده داده‌ها بین ۰،۰۵ تا ۱ خواهد بود (نورانی و همکاران، ۱۳۸۸).

$$x'_i = ۰.۰۵ + ۰.۹۵\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \qquad (۳۰)$$

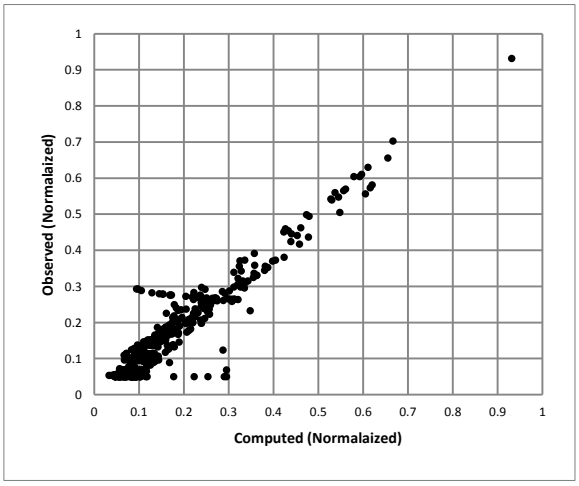
که در آن x'_i : مقدار نرمال شده، x_i : مقدار متغیر، x_{min} و x_{max} مقادیر کمینه و بیشینه داده‌ها می‌باشند. در بخش مقدمه فازی، متغیرهای جریان ورودی به مخزن سد، حجم مخزن و نیاز ماهیانه پائین دست سد و در بخش نتیجه فازی مقدار رهاسازی در هر ماه به عنوان متغیرهای موجود مدل در نظر گرفته شده است. بعد از ساخت مدل‌هایی با انواع مختلف توابع عضویت (مثلثی، ذوزنقه‌ای و گوسی) و همچنین تعداد مختلف توابع عضویت (سه، چهار و پنج) برای هر ورودی در نهایت مدل ANFIS با توابع عضویت گوسی و پنج تابع عضویت برای هرورودی، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در مقاله حاضر، جهت ارزیابی کارایی مدل‌های شبیه سازی، از دو معیار معتبر در منابع آب یعنی جذر میانگین مربعات خطا[۱۳] و ضریب تبیین[۱۴] به صورت روابط (۳۱) و (۳۲) استفاده شده است.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=۱}^{n}(x_i - y_i)^۲}{n}} \qquad (۳۱)$$

$$R^۲ = ۱ - \frac{\sum_{i=۱}^{n}(x_i - y_i)^۲}{\sum_{i=۱}^{n}(y_i - \bar{x}_i)^۲} \qquad (۳۲)$$

که در روابط (۳۱) و (۳۲)، y_i، داده‌های مربوط به نتایج مدل، x_i، داده‌های مربوط به ورودی مدل، $\bar{y}$ و $\bar{x}$، میانگین داده‌های ذکر شده

می‌باشد. مقادیر این دو معیار برای مدل‌های دو سد شهریار و سفید رود مطابق جدول ۲ می‌باشد. در این جا از خروجی مدل II به عنوان داده‌های مشاهداتی جهت مقایسه با نتایج به دست آمده از مدل ANFIS (میزان رهاسازی آب از مخازن سدهای سفیدرود و شهریار) استفاده شده است. در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نیز مقایسه‌ای بین داده‌های حاصل از خروجی مدل ANFIS و مدل II ارائه شده است. همان گونه که از دیاگرام‌های متقابل فوق مشخص است، ANFIS قابلیت بالایی در مدل سازی سیستم‌های پیچیده منابع آب دارد و می‌توان از آن به عنوان مدل جامع در کارهای آتی استفاده کرد.

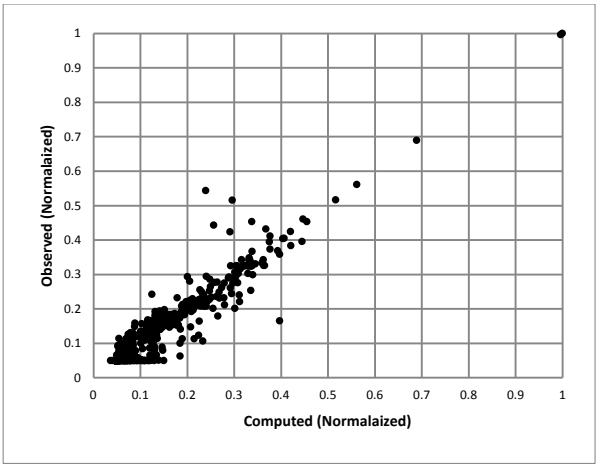


شکل ۱۱- مقایسه دقت نتایج مدل ANFIS و مدل II در مخزن سد شهریار(R۲=۰,۸۴)

۳- نتیجه گیری

نتایج مدل‌های GP ساخته شده نشان داد که بر اساس سری بلند مدت تاریخی و در نظر گرفتن نیازهای متوسط ماهانه و نیز توابع هدف و قیود مربوطه، در مخزن سد شهریار میزان حجم آب در ماه‌های شهریور و مهر، دارای حداقل و در ماه‌های اردیبهشت و خرداد، دارای حداکثر مقدار خود می‌باشد. سد سفیدرود نیز حالتی تقریباً مشابه سد شهریار دارد به طوری که در مخزن این سد، حجم آب در ماه شهریور دارای کمترین مقدار و در ماه‌های خرداد و تیر دارای بیشترین مقدار است. با این وجود در مدل‌های I, II, III، نتایج نشان‌دهنده تغییرات آن چنانی در میزان رهاسازی از سدها نمی‌باشد.

با مقایسه شاخص‌های عملکرد مخازن مورد مطالعه نیز می‌توان گفت که در حالت کلی، عملکرد مخازن مورد مطالعه در تأمین اهداف مسأله مناسب می‌باشند و همچنین مدل بهینه‌سازی چند هدفه II دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به مدل‌های I و III تحقیق می‌باشد. البته ممکن است میزان رهاسازی در اکثر موارد از نیاز آبی ماهانه بیشتر باشد و یا در بعضی ماه‌ها و دوره‌های خشک کمبودهایی در تأمین نیازهای آبی مشاهده شود که می‌توان با در نظر گرفتن شرایط خاص و اولویت تأمین نیازهای مختلف این کمبودها را بر طرف نمود.



شکل ۱۲- مقایسه دقت نتایج مدل ANFIS و مدل II در مخزن سد سفیدرود (R۲=۰,۹۱)

لازم به ذکر است که دریافت نتایج مطلوب از مدل منوط به ارائه اطلاعات صحیح و به هنگام بوده و به طور کلی اعتبار و قابلیت اجرایی آن بستگی کامل به میزان صحت اطلاعات ورودی خواهد داشت. همان گونه که ذکر شد، با مقایسه نتایج مدل‌های تحقیق، مدل II که دارای شاخص عملکرد مخزن مناسبتری بود به عنوان مدل برتر و اساس مدل‌سازی با سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی انتخاب گردید. در تمامی مدل‌ها بر اساس نظر کارشناسان محترم تصمیم گیرنده در امور طرح سد شهریار اولویت نسبی هدف تأمین نیازهای آب کشاورزی و محیط زیست به خاطر اهمیت ویژه آن، بیشتر از دو هدف کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی در نظر گرفته شده است. در مدل I، وزن نسبی هدف کنترل سیلاب بیشتراز استفاده‌های تفریحی، در مدل II، با هم برابر و در مدل III، عکس حالت مدل I، اعمال شده است. در نهایت جهت بیان روش کلی بهره‌برداری از سیستم مخازن، مدل ANFIS، با توابع عضویت گوسی و پنج تابع عضویت برای هر ورودی، به عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در این تحقیق بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن به صورت ترکیبی از اهداف مختلف نظیر تأمین نیاز آب پایین دست، کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی از مخازن مد نظر قرار گرفته بود.

جدول ۲- معیارهای ارزیابی کارآیی مدل‌های ANFIS

معیارهای سنجش	مرحله مدل سازی	نام سد	معیارهای سنجش	مرحله مدل سازی	نام سد

		RMSE	R^2			RMSE	R^2
سد شهریار	Train	۰/۰۳	۰/۹۷	سد سفیدرود	Train	۰/۰۳	۰/۹۶
	Check	۰/۰۴	۰/۹۵		Check	۰/۰۵	۰/۸۶
	Test	۰/۰۵	۰/۸۴		Test	۰/۰۳	۰/۹۱

در تحقیقات آتی می‌توان اهداف دیگری نظیر تولید انرژی برقابی، کنترل رسوب ورودی به مخزن و نیز اهداف کیفی را هم مدنظر قرار داد. همچنین می‌توان مسأله بهینه سازی بهره برداری چند هدفه از سیستم مخازن را با روش‌های تکاملی و فراکاوشی مانند جستجوی ممنوعه، الگوریتم ژنتیک، کلونی مورچه‌ها و غیره نیز مدل‌سازی نمود.

پی‌نوشت‌ها

۱- Goal Programming: GP

۲- Multi Criteria Decision Making: MCDM

۳- Stochastic Goal Programming: SGP

۴- Adaptive Neuro Fuzzy Inference System: ANFIS

۵- Fuzzy Rule-Based: FRB

۶-Decision Maker

۷- Million Cubic Meters: MCM

۸- Multi Objective

۹- Reliability

۱۰- Resilience

۱۱- Vulnerability

۱۲- Sustainability

۱۳- Root Mean Square Error

۱۴- Determination Coefficient

۴- مراجع

اصغرپور، م. ج. (۱۳۷۷)، *"مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره"*، انتشارات دانشگاه تهران.

مهندسین مشاور مهاب قدس، (۱۳۸۲)، *" گزارش مطالعات بهنگام نمودن آبدهی طرح سد و نیروگاه شهریار"*.

نورانی، و.، صالحی، ک.، ابوالواسط، ن. و صالحی، م. (۱۳۸۸). "مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از روش شبکه عصبی فازی تطبیقی موجکی و مقایسه آن با روش‌های شبکه عصبی موجکی و شبکه عصبی فازی تطبیقی"، *هشتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، اردیبهشت۸۸، دانشگاه شیراز، شیراز.

Abdelaziz Foued, B., Sameh, M. (۲۰۰۱), "Application of goal programming in a multi-objective reservoir operation model in Tunisia", *European Journal of Operational Research*, Vol. ۱۳۳, pp. ۳۵۲-۳۶۱.

Aouni, B., Abdelaziz Foued, B., and Martel, J.M. (۲۰۰۵), "Decision-Maker preferences modeling in the stochastic goal programming", *European Journal of Operational Research*, Vol. ۱۶۲, pp. ۶۱۰-۶۱۸.

Eschenbach, E., Magee, T., Zagona, E., Goronflo, M., and Shane R. (۲۰۰۱), "Goal programming decision support system for multi objective operation of reservoir system", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. ۱۲۷, No. ۲, pp. ۱۰۸-۱۲۰.

Dixon, B. (۲۰۰۵), "Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: A GIS-based sensitivity analysis", *Journal of Hydrology*, Vol. ۳۰۹, pp. ۱۷-۳۸.

Jang, J.S.R. (۱۹۹۳), "ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference systems", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. ۲۳, No. (۳), pp. ۶۶۵-۶۸۵.

Jang, J.S.R., Sun, C.T., and Mizutani, E. (۱۹۹۷). "*Neuro fuzzy and soft computing: A computational approach to learning and machine intelligence*", Printice-Hall International, New Jersey.

Kişi, O. (۲۰۰۵), "Suspended sediment estimation using neuro-fuzzy and neural network approaches", *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. ۵۰, No. ۴, pp. ۶۸۳-۶۹

Labadie, J.W. (۲۰۰۴), "Optimal operation of multireservoir system: State-of-the-art review, "*Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. ۱۳۰, No. ۲, pp. ۹۳-۱۱۱.

Loganathan, G., Bhattacharya, D. (۱۹۹۰). "Goal programming techniques for optimal reservoir operations", *Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. ۱۱۶, No. ۶, pp. ۸۲۰-۸۳۸.

Loucks, D.P. (۱۹۹۷), "Quantifying trends in system sustainability", *Journal of Hydrological Sciences*, Vol. ۴۲, No. ۴, pp. ۵۱۳-۵۳۰.

Loucks, D.P., Van Beek, E. (۲۰۰۵), "*Water resources systems planning and management: An introduction to methods, models and applications, studies and reports in hydrology*", UNESCO Publishing, Paris, France.

Mehta, R., K.Jain, S. (۲۰۰۹), "Optimal operation of a multi-purpose reservoir using Neuro-Fuzzy technique", *Water Resources Management*, Vol. ۲۳, pp. ۵۰۹-۵۲۹.

Mousavi, S.J., Ponnambalam, K., and Karray, F. (۲۰۰۷), "Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. ۱۵۸, pp. ۱۰۶٤-۱۰۸۲.

Rajaee, T., Mirbagheri, S.A., Kermani, M., and Nourani, V. (۲۰۰۹), "Daily suspended sediment concentration simulation using ANN and Neuro-Fuzzy models", *Science of the Total Environment*, Vol. ٤۰۷, pp. ٤۹۱٦–٤۹۲۷.

Russell, S.O., Campbell, P.F. (۱۹۹٦), "Reservoir operating rules with fuzzy programming", Journal of *Water Resources Planning and Management, ASCE*, Vol. ۱۲۲, No. ۳, pp. ۱٦۵-۱۷۰.