

ساخت مدل‌های پیش‌بینی جریان رودخانه و بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از سیستم استنباط فازی

سعید جمالی^۱

احمد ابریشم‌چی^۲

سعید تجریشی^۳
(دریافت ۸۴/۱۲/۱۸ پذیرش ۸۶/۵/۲۴)

چکیده

موقعیت حوضه زاینده‌رود در فلات مرکزی ایران که جزء مناطق کم باران ایران محسوب می‌گردد، به همراه رشد روزافزون جمعیت و توسعه بخشهای کشاورزی و صنعتی در منطقه، موجب افزایش قابل توجه تقاضای آبی در حوضه مذکور شده است. وضعیت جغرافیایی این حوضه از یک سو و محدودیت منابع آبی موجود از سوی دیگر، لزوم بهره‌برداری بهینه از این منابع را دو چندان می‌کند. در این مقاله مدلی مبتنی بر سیستم استنباط فازی برای بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود توسعه داده شده است. مدل پایگاه قواعد فازی بر مبنای قاعده کلی اگر- آنگاه است که در آن اگر، بردار متغیرهای مستقل فازی یا مقدمات شرط و آنگاه، نتیجه شرط می‌باشد. این مدل شامل دو قسمت است که در قسمت اول، حجم جریان فصلی رودخانه به وسیله یک سیستم استنباط فازی پیش‌بینی می‌شود. شاخص نوسانات جنوبی، بارش، برف و حجم، ورودی‌های مدل و حجم آورد فصلی رودخانه، خروجی این قسمت می‌باشند. در قسمت دوم، مدل بهره‌برداری از مخزن ساخته شده است. ابتدا با استفاده از یک مدل بهینه‌یابی غیر خطی حجم بهینه جریانهای خروجی به دست آمده و سپس به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری، از سیستم استنباط فازی استفاده شده است. حجم جریانهای پیش‌بینی شده، حجم ذخیره مخزن در ابتدای هر ماه و تقاضای ماهانه، به عنوان مقدمات شرط، و میزان خروج از مخزن در هر ماه به عنوان نتیجه شرط در نظر گرفته می‌شود. داده‌های تاریخی به منظور آموزش و سپس ارزیابی قواعد به دو قسمت تقسیم گردید. به این ترتیب که از داده‌های سالهای ۱۳۶۹ تا ۱۳۷۷ برای ساخت مدل و سالهای ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ برای ارزیابی مدل استفاده شده است. در مرحله بعد نتایج حاصل از مدل استنباط فازی با نتایج روشهای سنتی از قبیل سیاست بهره‌برداری استاندارد و رگرسیون خطی مقایسه شد. بدین منظور از شاخصهای متفاوتی برای ارزیابی قواعد استفاده شد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد، سیستم استنباط فازی روش مناسبی برای ساخت قواعد بهره‌برداری از مخزن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سیستم استنباط فازی، بهره‌برداری از مخزن، پیش‌بینی جریان، شاخص نوسانات جنوبی، سیاست بهره‌برداری استاندارد، رگرسیون خطی.

River Stream-Flow and Zayanderoud Reservoir Operation Modeling Using the Fuzzy Inference System

Saeed Jamali¹ Ahmad Abrishumchi² Massoud Tajrishy³

(Received Mar. 8, 2006 Accepted Aug. 15, 2007)

Abstract

The Zayanderoud basin is located in the central plateau of Iran. As a result of population increase and agricultural and industrial developments, water demand on this basin has increased extensively. Given the importance of reservoir operation in water resource and management studies, the performance of fuzzy inference system (FIS) for Zayanderoud reservoir operation is investigated in this paper. The model of operation consists of two parts. In the first part, the seasonal river stream-flow is forecasted using the fuzzy rule-based system. The southern oscillated index, rain, snow, and discharge are inputs of the model and the seasonal river stream-flow its output. In the second part, the operation model is constructed. The amount of releases is first optimized by a nonlinear optimization model and then the rule curves are extracted using the fuzzy inference system. This model operates on an "if-then" principle, where the "if" is a vector of fuzzy permits and "then" is the fuzzy result. The reservoir storage capacity, inflow, demand, and year condition factor are used as permits. Monthly

1. PhD Student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, s.jamali@alum.sharif.edu
2. Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology
3. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

- ۱- دانشجوی دوره دکتراند دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، s.jamali@alum.sharif.edu
- ۲- استاد دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف
- ۳- دانشیار دانشگاه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

release is taken as the consequence. The Zayanderoud basin is investigated as a case study. Different performance indices such as reliability, resiliency, and vulnerability are calculated. According to results, FIS works more effectively than the traditional reservoir operation methods such as standard operation policy (SOP) or linear regression.

Keywords: Fuzzy Inference system, Reservoir Operation, Performance Indices, Southern Oscillated Index, Standard Operation Policy, Linear Regression.

۱- مقدمه

با شبکه‌های عصبی مصنوعی از کاربردهای مهم این تئوری در بهره‌برداری از مخزن می‌باشند. مثالهایی از این کاربردها را می‌توان در کارهای هوانگ^۵ در سال ۱۹۹۶، ساد^۶ و همکاران در سال ۱۹۹۶ و فونتان^۷ و همکاران در سال ۱۹۹۷ ملاحظه کرد [۲-۴]. سیستم استنباط فازی را می‌توان بر اساس دانش شخص خبره^۸ یا داده‌های مشاهده شده^۹ ساخت. نحوه استخراج قوانین از این روشها را داکستاین^{۱۰} و باردهوسی^{۱۱} در سال ۱۹۹۵ و کاسکو^{۱۲} در سال ۱۹۹۲ شرح داده‌اند [۵ و ۶]. کمپبل^{۱۳} و راسل^{۱۴} در سال ۱۹۹۶ دریافتند که با افزایش تعداد ورودی‌های سیستم استنباط فازی، تعداد قواعد بسیار زیاد و غیر قابل کنترل می‌شود [۷]. شرستا^{۱۵} و همکاران در سال ۱۹۹۶ از پایگاه قواعد فازی برای به دست آوردن قوانین بهره‌برداری از مخازن چند منظوره استفاده کردند [۸]. در سالهای اخیر از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی با منطق فازی در ساخت قواعد بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است. دابروین^{۱۶} و همکاران در سال ۲۰۰۲ مدلی استنباطی ساختند که از دو زیر مدل تشکیل شده است: زیر مدل اول به پیش‌بینی رقوم آب در مخزن سد و زیر مدل دوم به نحوه بهره‌برداری از مخزن با توجه به رقوم آب، تقاضاها و حجم آب ورودی می‌پردازد [۹]. جولما^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۰۲ مدلی ساختند که هدف آن تقلید از اپراتور انسانی بود؛ در واقع، رفتار بهره‌بردار در این مدل شبیه‌سازی شده است [۱۰]. هدف از تحقیق حاضر، استفاده از قابلیت سیستم‌های فازی در تقریب توابع و یا نگاشت‌های غیر خطی با اطلاعات غیر دقیق می‌باشد.

فرآیند بهره‌برداری از مخزن، تصمیم‌گیری پیوسته‌ای است که در آن میزان خروج آب با توجه به متغیرهای حالت مانند حجم ذخیره مخزن، مقدار تقاضاها و پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن انجام می‌شود. وظیفه بهره‌بردار ارضا کردن منظورهای تقاضاهای تعهد شده از مخزن تا حد امکان می‌باشد. وجود عدم قطعیت^۱ و عدم دقت^۲ در متغیرهای بهره‌برداری، تقاضاها، و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی، در پیچیدگی فرآیند بهره‌برداری از مخزن نقش عمده‌ای دارند. عدم قطعیت، به شرایط هوشناختی و هیدرولوژیکی و عدم وقوع یا تغییر هدفها، تقاضاها، استانداردها، ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی با گذشت زمان مربوط می‌شود. یکی از شیوه‌های برخورد با عدم قطعیت که با تئوری احتمال قابل تحلیل نیست، استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی است. هدف منطق فازی استخراج نتایج دقیق با استفاده از مجموعه‌ای از معلومات غیردقیق است که با الفاظ و جملات زبانی تعریف شده‌اند. به طور نظری هر سیستمی که توسط منطق فازی طراحی شده باشد، توسط سایر تکنیک‌های طراحی مرسوم نیز قابل پیاده‌سازی است؛ اما معمولاً این شیوه‌ها نسبت به شیوه منطق فازی پیچیده و دشوارتر می‌باشند. یکی دیگر از قابلیت‌های مهم منطق فازی توانایی آن در تقریب توابع و یا نگاشت‌های غیر خطی در مواقعی است که اطلاعات دقیق نمی‌باشد. اولین بار، عسگر لطفی‌زاده در سال ۱۹۶۵ منطق فازی و تئوری مجموعه‌های فازی را معرفی کرد. او از این روش برای مدل‌سازی ابهامات و عدم قطعیت موجود در تصمیم‌گیری استفاده کرد. ایده اصلی منطق فازی، ساده است. عبارات، فقط "صحیح" یا "غلط" نیستند بلکه می‌توانند تا حدی صحیح باشند یا تا حدی غلط [۱۱]. بعد از گسترش تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی، محققان تحلیل‌گر سیستم‌های منابع آب دریافتند که این منطق، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن است. روشهای بهینه‌یابی فازی^۳، سیستم‌های استنتاج فازی^۴ و تلفیق روش فازی با تکنیک‌های دیگر مانند تلفیق

⁵ Huang

⁶ Saad

⁷ Fontane

⁸ Expert Knowledge

⁹ Observed Data

¹⁰ Duckstein

¹¹ Bardossy

¹² Kosko

¹³ Campbell

¹⁴ Russell

¹⁵ Sherestha

¹⁶ Dubrovin

¹⁷ Jolma

¹ Uncertainty

² Inaccuracy

³ Fuzzy Optimization

⁴ Fuzzy Inference System

در منابع علمی معمولاً از سه نوع سیستم فازی صحبت به میان می‌آید:

(۱) سیستم فازی خالص؛

(۲) سیستم فازی تاکاگی^۱، سوگنو^۲ و کانگ^۳ (TSK)؛

(۳) سیستم‌های مجهز به فازی ساز و فازی زدا (مددانی).

مشکل اصلی در رابطه با سیستم‌های فازی خالص این است که ورودی‌ها و خروجی‌های آن، مجموعه‌های فازی می‌باشند (واژه‌هایی در زبان طبیعی)؛ درحالی که در سیستم‌های مهندسی، ورودی‌های و خروجی‌ها، متغیرهایی با مقادیر حقیقی هستند. برای حل این مشکل، تاکاگی، سوگنو و کانگ نوع دیگری از سیستم‌های فازی را معرفی کرده‌اند که ورودی‌ها و خروجی‌های آن متغیرهایی با مقادیر واقعی می‌باشند. به منظور استفاده از سیستم‌های فازی خالص در سیستم‌های مهندسی، یک روش ساده، اضافه کردن یک فازی ساز در ورودی است که متغیرهایی با مقادیر حقیقی را به یک مجموعه فازی تبدیل کرده و سپس افزودن یک فازی زدا قبل از خروجی است که یک مجموعه فازی را به یک متغیر با مقدار حقیقی در خروجی تبدیل می‌کند [۱].

هر مجموعه فازی را می‌توان با یک تابع عضویت تعریف کرد، که این تابع، درجه عضویت هر عضو را در مجموعه مورد نظر مشخص می‌سازد. روش ساده و متداول در این زمینه، استفاده از توابع عضویت مثلثی است. ساخت این توابع در سه مرحله زیر صورت می‌پذیرد.

ابتدا محدوده هر حالت مشخص می‌شود؛ یعنی ابتدا و انتهای بازه تعیین می‌گردد. درجه عضویت در این دو نقطه صفر است. پس از آن امکان پذیرترین حالت داخل بازه را مشخص کرده و به آن درجه عضویت ۱ داده می‌شود و در نهایت این نقاط به صورت خطی به هم وصل می‌شوند.

هر سیستم استنباط فازی دارای بخشهای مختلفی به شرح زیر است:

۱- فازی سازی: فازی سازی به عنوان نگاشتی از یک نقطه

$X^0 \in U \subseteq R^n$ به یک مجموعه فازی A' در U تعریف می‌شود.

۲- موتور استنباط فازی یا پایگاه قواعد فازی: پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل می‌شود. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزای سیستم فازی برای پیاده‌سازی این قواعد به شکل مؤثر و کارا استفاده می‌شوند. قلب

یک سیستم فازی محسوب می‌شود. به طور مشخص، پایگاه قواعد فازی شامل قواعد اگر- آنگاه فازی زیر است:

قاعده: اگر x است A آنگاه z است B .

۳- ترکیب خروجی‌ها^۴: در این مرحله نتایج حاصل از مرحله قبل با یکدیگر ترکیب می‌شوند که دو روش متداول در این زمینه عبارت‌اند از: استنباط مبتنی بر قواعد جداگانه و استنباط مبتنی بر ترکیب قواعد.

۴- فازی زدایی: فازی زدایی به عنوان نگاشتی از مجموعه فازی A' در $V \subseteq R$ (که خروجی موتور استنباط فازی است) به یک نقطه قطعی $y^0 \in V$ تعریف می‌شود. به طور مفهومی، وظیفه فازی زدای، مشخص کردن نقطه‌ای است که بهترین نماینده مجموعه فازی A' باشد.

۳- مدل پیش‌بینی جریان فصلی رودخانه

۳-۱- توصیف مورد مطالعه

حوضه زاینده رود در فلات مرکزی ایران و در پهنه گرم و خشک کشور قرار گرفته است. این حوضه جزو مناطق کم آب ایران به حساب می‌آید. مساحت کل حوضه ۴۱۵۲۴ کیلومتر مربع است که این مقدار ۲/۵ درصد مساحت کل کشور را شامل می‌شود. از این مقدار ۱۶۶۷۰ کیلومتر مربع را مناطق کوهستانی و ۲۴۸۵۴ کیلومتر مربع را دشت و کوهپایه تشکیل می‌دهد. این حوضه از شمال به حوضه آبریز دریاچه نمک، از شرق به حوضه‌های دق سرخ و کویر سیاه کوه، از جنوب به حوضه کویر ابرقو و از غرب و جنوب غرب به حوضه آبریز رودخانه کارون محدود می‌شود. میانگین بارندگی سالانه حوضه از حداقل ۵۰ میلی‌متر در شرق حوضه تا حداکثر ۱۵۰۰ میلی‌متر در سرشاخه‌های غرب حوضه متغیر است. سد زاینده‌رود بر روی رودخانه زاینده‌رود در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان بنا شده است. این سد که یکی از اصلی‌ترین تأسیسات آبی حوضه زاینده‌رود است، شامل سد مخزنی اصلی، نیروگاه برق آبی و سد تنظیم‌کننده (در ۴ کیلومتری سد اصلی) می‌باشد. آبیاری دشت اصفهان، افزایش سطح زیر کشت محصولات و در نتیجه بالا بردن سود حاصل از کشاورزی، تأمین آب مورد نیاز شرب منطقه، تأمین آب صنایع بزرگ، تولید انرژی برقی، حفاظت از شهر و آثار تاریخی در مقابل سیل و کنترل بخش اعظمی از آب برای فصول کم آبی، از منظورهای اصلی احداث سد زاینده‌رود است. زیر حوضه‌های آبریز سد زاینده رود در شکل ۱ نشان داده شده است. حوضه‌های آبریز چشمه لنگان و کوهرنگ به ترتیب زیر حوضه‌هایی

¹ Takagi

² Sugeno

³ Kang

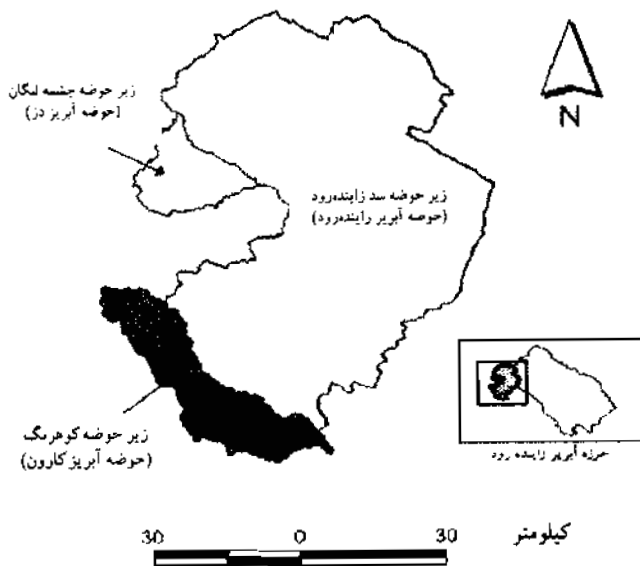
⁴ Aggregation

از رودخانه‌های دز و کارون‌اند که آب آنها به منظور انتقال بین حوضه‌ای وارد حوضه آبریز طبیعی سد زاینده رود می‌شود [۱۱].

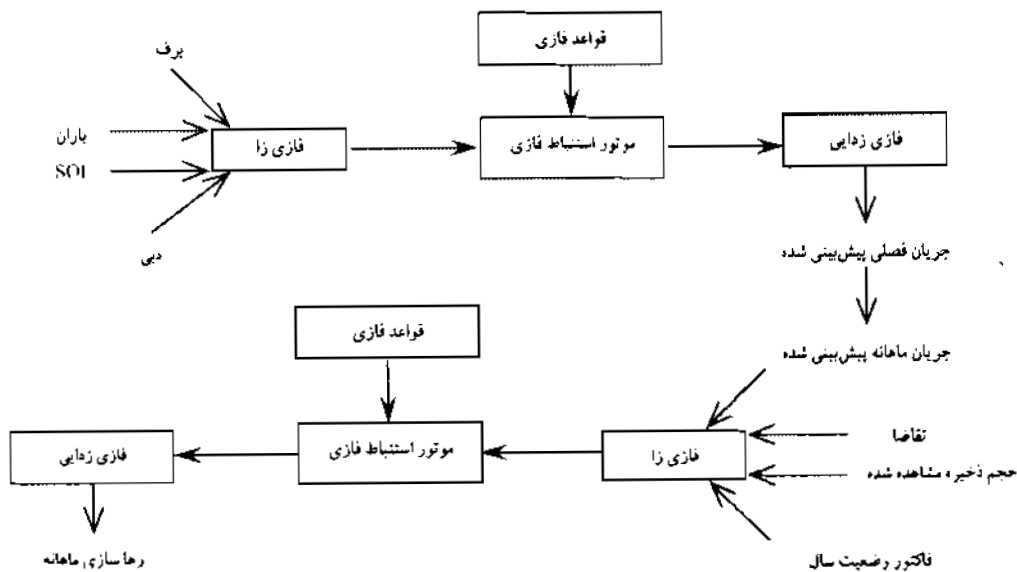
۲-۳- مدل پیش‌بینی جریان فصلی رودخانه

ساختار کلی مدل در شکل ۲ آورده شده است. هدف از ساخت این مدل، پیش‌بینی وضعیت آبی هر فصل می‌باشد و نه پیش‌بینی دقیق جریان فصلی. بدین منظور هر سال به سه دوره زمانی مجزا تقسیم شده و در هر دوره، جریان مربوط به آن دوره پیش‌بینی می‌شود.

سپس فاکتور وضعیت سال به صورت نسبت حجم آورد پیش‌بینی شده در فصل مورد نظر به بیشترین حجم آورد مشاهده شده آن فصل در کل دوره آماری تعریف می‌شود. دوره‌های زمانی مزبور عبارت‌اند از: فصل بارش برف، فصل ذوب برف و فصل شامل بقیه سال. پیش‌بینی جریان در هر فصل به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه نتایج تحقیقات قبلی ارتباط حجم آورد رودخانه زاینده‌رود را با شاخص نوسانات قبل استفاده می‌شود



شکل ۱- زیر حوضه‌های آبریز سد زاینده‌رود



شکل ۲- ساختار مدل

[۱۱]. جریان رودخانه در فصل ذوب برف بستگی زیادی به آب معادل برف (SWE)^۱، بارش و شاخص نوسانات جنوبی دارد، لکن جریان رودخانه در فصل بقیه سال بیشتر به دبی رودخانه در قبل وابسته است.

یک قانون فازی در مدل پیش‌بینی می‌تواند به صورت زیر باشد:

اگر SWE کم/متوسط/زیاد است و مقدار بارش کم/متوسط/زیاد است، آنگاه جریان رودخانه خیلی کم/کم/متوسط/زیاد/خیلی زیاد است.

پس از ساخت مدل پیش‌بینی، فاکتور وضعیت سال را به عنوان یک معیار مشخص کننده وضعیت آبی هر فصل باید تعریف کرد. این فاکتور به صورت زیر تعریف شده است:

$$F_{YC} = \frac{I(i,n)}{I_{max(i)}} \quad (1)$$

که در آن

$I_{max(i)}$ ، حجم آورد پیش‌بینی شده فصل i ام در سال n و حداکثر حجم آورد مشاهده شده در فصل i ام است.

با این معیار می‌توان وضعیت حجم آورد را از نظر خشکسالی، تر آبی و یا نرمال پیش‌بینی کرد و در نتیجه با آگاهی از وضعیت هر فصل می‌توان برای میزان خروج آب برنامه‌ریزی کرد. استفاده از این روش گامی مؤثر در بهره‌برداری بهینه از مخازن می‌باشد.

برای تصمیم‌گیری در مورد میزان خروج آب از سد در هر ماه، پیش‌بینی حجم آورد ماهانه ضروری است. از اینرو، نتایج پیش‌بینی حجم آورد فصلی باید به ماهانه تبدیل شود. بدین منظور داده‌های تاریخی ۱۳ ساله حجم آورد ماهانه ورودی به مخزن سد، مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که به طور متوسط سهم هر ماه چه درصدی از حجم آورد فصل خود است. در نتیجه برای هر ماه ضریبی به دست آمد که نشانگر سهم آورد هر ماه از حجم کل آورد در آن فصل است. با ضرب کردن ضرایب حاصل در حجم آورد فصلی حاصل از سیستم استنباط فازی، حجم آورد ماهانه به دست می‌آید.

با استفاده از داده‌های سالهای ۱۳۷۸ تا ۱۳۸۳ عملکرد مدل پیش‌بینی مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۳ نتایج مقایسه حجم آورد مشاهده شده با پیش‌بینی شده به وسیله مدل نشان داده شده است. منطبق شدن نقاط بر روی خط ۴۵ درجه مؤید این امر می‌بود که مدل دقیقاً داده‌های مشاهده شده را پیش‌بینی کرده است. اما به علت وجود خطا، همواره این نقاط نوساناتی حول این خط دارند. نزدیک‌تر شدن نقاط به خط، دقت بیشتر مدل را می‌رساند.

¹ Snow Water Equivalent, SWE

۴- مدل بهره‌برداری از مخزن سد

۴-۱- مدل SQP

ابتدا با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی مرتبه دوم پی‌درپی (SQP)^۲ و با تابع هدف حداقل کردن مجموع مربعات انحراف میزان خروجی از مخزن نسبت به تقاضا با رویکرد قطعی، جریانهای خروجی بهینه ماهانه در کل دوره مشاهداتی محاسبه می‌شود. تابع هدف مدل به صورت زیر است.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^N (D_t - R_t)^2 \quad (2)$$

قیود مدل به صورت زیر می‌باشد

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - L_t \quad (3)$$

$$S_{min} \leq S_t \leq S_{max} \quad (4)$$

$$R_{min} \leq R_t \leq R_{max} \quad (5)$$

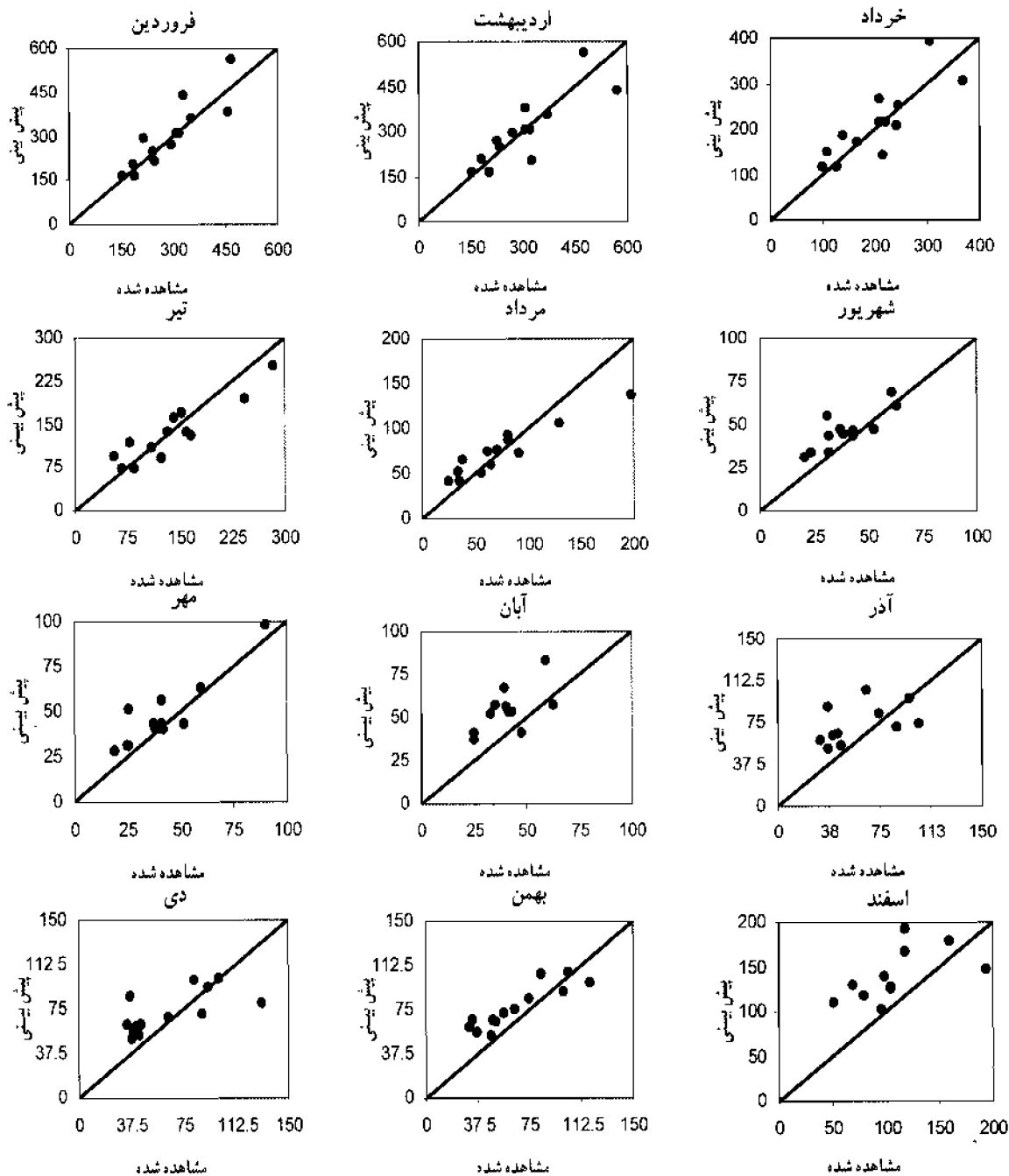
$$L_t = A_a e_t \left(\frac{S_1 + S_{t+1}}{2} \right) + A_o e_t \quad (6)$$

که در آن

D_t میزان نیاز در دوره t ، R_t میزان خروجی از مخزن در دوره t ، Q_t حجم جریان ورودی به مخزن در دوره t ، L_t حجم تبخیر در دوره t ، e_t نرخ تبخیر در دوره t ، A_o مساحت نظیر حجم مرده، A_a مساحت نظیر سطح فعال و S_t حجم ذخیره مخزن در دوره t می‌باشد. قیود ۴ و ۵ محدودیتهای حجم ذخیره مخزن و حجم خروجی آب از مخزن را نشان می‌دهند. در قید محدودیت حجم مخزن، S_{min} و S_{max} به ترتیب حجم حداقل و حجم حداکثر ذخیره مخزن می‌باشند. در قید محدودیت حجم خروجی، R_{min} و R_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر حجم خروج آب از مخزن می‌باشند. محدودیتهای حداقل و حداکثر حجم ذخیره و حجم خروج آب به مسائل کنترل کیفیت آب، کنترل سیل و نیز حیات وحش و محیط زیست در رودخانه و مخزن مربوط می‌شوند.

اساس SQP بر مؤثر بودن محاسبات الگوریتم برنامه‌ریزی غیرخطی مرتبه دوم و توانایی بالاتر بسط‌های مرتبه دوم نسبت به روابط خطی برای تقریب زدن توابع غیرخطی است. با وجود اینکه در این روش به جای خطی سازی تابع هدف، یک تقریب مرتبه دوم برای مسئله به کار می‌رود، لکن قیود کماکان به صورت خطی باقی می‌مانند [۱۲]. پس از محاسبه حجم خروجی بهینه ماهانه، قواعد بهره‌برداری بهینه با استفاده از سیستم استنباط فازی به دست می‌آید.

² Successive Quadratic Programming



شکل ۳- مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهده شده (میلیون مترمکعب)

توابع عضویت پیشنهادی برای هر یک از متغیرهای فوق در شکل ۴ نشان داده شده است. از چهار تابع عضویت مثلثی برای توصیف جریان ماهانه پیش‌بینی شده از ۲۰ تا ۲۵۰ میلیون متر مکعب در هر ماه و از پنج تابع عضویت (سه تابع مثلثی و دو تابع ذوزنقه‌ای) برای توصیف حجم ذخیره مخزن از ۶۰۰ تا ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب استفاده شده است. تقاضای ماههای مختلف نیز به پنج تابع عضویت تقسیم شده که به ترتیب معرف تقاضاهای خیلی

۲-۴- مدل سیستم استنباط فازی برای ساخت قواعد بهره‌برداری

در این مرحله یک مدل مبتنی بر سیستم استنباط فازی برای سد زاینده‌رود ساخته شد. متغیرها و یا مقدمات شرط مدل فازی در این تحقیق عبارت بودند از: حجم ذخیره مخزن در ابتدای هر دوره، جریان پیش‌بینی شده ورودی به مخزن و تقاضا در هر ماه و نتیجه مدل، حجم خروجی از مخزن در هر ماه بود.

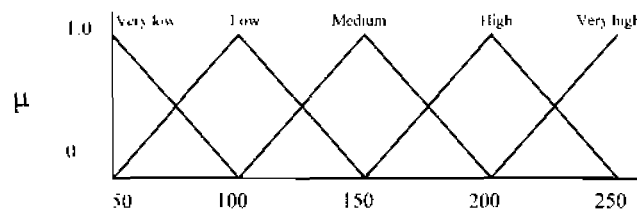
قواعد در این ساختار به سه دسته سالهای پرآبی، کم آبی و معمولی تقسیم می‌شوند که در قواعد سالهای پرآبی، حجم آورد پیش‌بینی شده و رودی به مخزن و حجم ذخیره و در سالهای خشکسالی فاکتور زمان و حجم ذخیره از اهمیت بیشتری برخوردارند. در سالهای معمولی میزان خروج از مخزن همواره برابر با مقدار تقاضاست. مگر آنکه حجم ذخیره به بالاترین حد خود برسد که در این حالت میزان خروجی بستگی به حجم آورد خواهد داشت. در جدول ۱ بخشی از نتایج این مدل ذکر شده است.

۴-۳- استفاده از رگرسیون چند متغیسه در ساخت قواعد بهره‌برداری

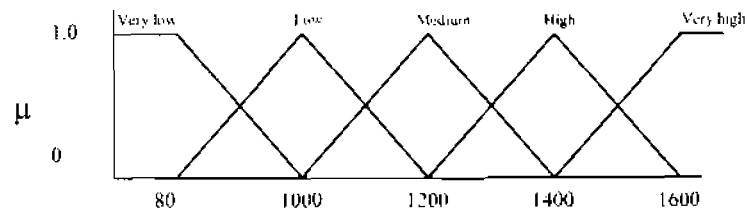
یکی از ساده‌ترین روشهای استنباط قوانین بهره‌برداری از مخازن، روش رگرسیون چند متغیره است. در این تحقیق از خروجی‌های

کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد است. خروجی سیستم به هفت حالت (ناچیز، خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد و فوق‌العاده زیاد) تقسیم شده است. به طور کلی، با افزایش توابع عضویت، تعداد قوانین و به تبع آن احتمال ناکارآمد شدن سیستم افزایش می‌یابد. برخلاف تصور، افزایش قوانین باعث بهبود نتایج نمی‌شود، بلکه ممکن است موجب اختلال در کنترل سیستم و پیچیده‌تر شدن مسئله شود. بنابراین باید بین تعداد توابع عضویت و تعداد قوانین، تعاملی برقرار کرد. ساختار قواعد به کار رفته در مدل به صورت زیر می‌باشد.

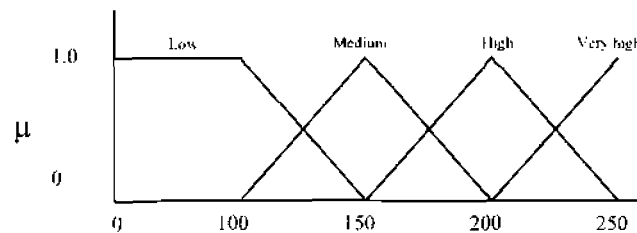
اگر تقاضا $A_{1,1}$ ، حجم ذخیره $A_{1,2}$ و پیش‌بینی حجم جریان ورودی به مخزن $A_{1,3}$ است، آنگاه خروجی B_j است. از داده‌های سالهای ۱۳۶۹ تا ۱۳۷۹ برای آموزش و ساخت مدل و از داده‌های سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ برای ارزیابی مدل استفاده شده است.



تقاضا (میلیون متر مکعب)



حجم ذخیره مخزن (میلیون متر مکعب)



جریان پیش‌بینی شده ورودی به مخزن (میلیون متر مکعب)

شکل ۴- توابع عضویت متغیرهای مدل

جدول ۱- نتایج قاعده بهره‌برداری حاصل از سیستم استنباط فازی در یک سال نمونه (سال نرمال)

ماه	فاکتور وضعیت سال	تقاضا (میلیون مترمکعب)	جریان ورودی (میلیون مترمکعب)	ذخیره مخزن (میلیون مترمکعب)	مساحت (کیلومتر مربع)	ارتفاع تبخیر (میلی متر)	حجم تبخیر (میلیون مترمکعب)	خروجی (میلیون مترمکعب)
۱	۰/۵۸	۱۶۸/۴۵	۳۲۹/۵۳	۱۱۰۹/۶۰	۴۴/۹۸	۱۶۶/۵۰	۵/۲۴	۱۶۸/۴۵
۲	۰/۵۸	۲۱۲/۳۴	۳۳۷/۵۱	۱۲۶۵/۴۳	۴۹/۲۶	۲۳۰/۰۰	۷/۹۵	۲۱۲/۳۴
۳	۰/۵۸	۲۰۵/۸۶	۲۴۵/۷۳	۱۳۸۲/۶۶	۵۱/۷۱	۳۰۲/۱۰	۱۰/۹۳	۲۰۵/۸۶
۴	۰/۵۸	۱۸۰/۱۴	۱۳۴/۵۴	۱۴۱۱/۵۹	۵۱/۲۱	۴۰۵/۴۰	۱۴/۵۳	۱۸۰/۱۴
۵	۰/۵۸	۱۶۰/۲۸	۶۳/۴۸	۱۳۵۱/۴۶	۴۸/۴۷	۴۰۱/۸۰	۱۳/۶۳	۱۶۰/۲۸
۶	۰/۵۸	۱۱۶/۶۲	۴۰/۹۸	۱۲۴۱/۰۳	۴۵/۳۱	۳۳۰/۰۰	۱۰/۴۷	۱۱۶/۶۲
۷	۰/۵۸	۸۵/۰۱	۸۳/۱۸	۱۱۵۴/۹۲	۴۳/۸۰	۲۱۰/۱۰	۶/۴۴	۸۵/۰۱
۸	۰/۵۸	۶۰/۷۱	۴۷/۸۵	۱۱۴۶/۶۴	۴۳/۴۰	۱۲۵/۶۰	۳/۸۲	۶۰/۷۱
۹	۰/۵۸	۴۵/۷۸	۴۴/۵۸	۱۱۲۹/۹۶	۴۳/۱۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۵/۷۸
۱۰	۰/۵۸	۴۷/۷۶	۷۱/۵۹	۱۱۲۸/۷۶	۴۳/۴۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۴۷/۷۶
۱۱	۰/۵۸	۷۲/۵۹	۷۶/۳۴	۱۱۵۲/۶۰	۴۳/۹۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۷۲/۵۹
۱۲	۰/۵۸	۱۰۴/۵۵	۱۳۳/۶۵	۱۱۵۶/۳۵	۲۵/۴۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۰۴/۵۵

جدول ۲- نتایج قاعده بهره‌برداری حاصل از رگرسیون در یک سال نمونه (سال نرمال)

ماه	فاکتور وضعیت سال	تقاضا (میلیون مترمکعب)	جریان ورودی (میلیون مترمکعب)	ذخیره مخزن (میلیون مترمکعب)	مساحت (کیلومتر مربع)	ارتفاع تبخیر (میلی متر)	حجم تبخیر (میلیون مترمکعب)	خروجی (میلیون مترمکعب)
۱	۰/۵۸	۱۶۸/۴۵	۳۱۵/۶۰	۸۸۵/۱۶	۳۶/۹۹	۱۶۶/۵۰	۴/۳۱	۲۰۴/۴۷
۲	۰/۵۸	۲۱۲/۳۴	۳۴۷/۰۰	۹۹۱/۹۷	۴۰/۲۶	۲۳۰/۰۰	۶/۴۸	۲۴۳/۴۶
۳	۰/۵۸	۲۰۵/۸۶	۲۴۳/۸۴	۱۰۸۹/۰۳	۴۲/۰۴	۳۰۲/۱۰	۸/۸۹	۲۲۱/۳۷
۴	۰/۵۸	۱۸۰/۱۴	۱۴۰/۰۶	۱۱۰۲/۶۱	۴۱/۳۴	۴۰۵/۴۰	۱۱/۷۳	۱۸۵/۲۳
۵	۰/۵۸	۱۶۰/۲۸	۶۲/۴۰	۱۰۴۵/۷۰	۳۸/۶۸	۴۰۱/۸۰	۱۰/۸۸	۱۶۰/۳۱
۶	۰/۵۸	۱۱۶/۶۲	۳۷/۲۰	۹۳۶/۹۱	۳۵/۴۴	۳۳۰/۰۰	۸/۱۹	۱۲۲/۳۵
۷	۰/۵۸	۸۵/۰۱	۸۴/۱۰	۸۴۳/۵۸	۳۳/۵۵	۲۱۰/۱۰	۴/۹۳	۱۰۳/۲۶
۸	۰/۵۸	۶۰/۷۱	۴۷/۸۵	۸۱۹/۴۹	۳۳/۰۸	۱۲۵/۶۰	۲/۹۱	۵۰/۰۰
۹	۰/۵۸	۴۵/۷۸	۴۴/۵۸	۸۱۴/۴۳	۳۲/۸۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۵۵/۰۰
۱۰	۰/۵۸	۴۷/۷۶	۶۳/۲۰	۸۰۴/۰۱	۳۲/۶۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۶۶/۰۰
۱۱	۰/۵۸	۷۲/۵۹	۶۴/۸۰	۸۰۱/۲۱	۳۲/۵۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۶۴/۰۰
۱۲	۰/۵۸	۱۰۴/۵۵	۱۲۷/۴۰	۸۰۲/۰۱	۱۹/۷۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۱۲۷/۷۰

کمک چندانی به بهبود نتایج نمی‌کند. از آن صرف نظر گردیده است. در جدول ۲ نتایج حاصل از این روش در میزان خروج آب در یک سال (معمولی) به عنوان نمونه آورده شده است.

بهینه به دست آمده از نتایج مدل SQP در به دست آوردن معادله رگرسیون استفاده شد. شکل عمومی چنین معادلاتی مطابق زیر است:

$$R_t = a_1 Q_t + b_1 S_t + c_1 D_t + a_2 Q_t^2 + b_2 S_t^2 + c_2 D_t^2 + \dots \quad (7)$$

که در آن

۴-۴- معیارهای ارزیابی قواعد بهره‌برداری
برای ارزیابی قواعد بهره‌برداری مدل استنباط فازی و نیز مقایسه آن با دیگر مدل‌ها، از چند معیار عملکرد^۱ به شرح زیر استفاده شده است:

R_t : حجم خروجی در دوره زمانی t ، Q_t : حجم آورد در دوره زمانی t ، S_t : حجم ذخیره مخزن در ابتدای دوره t و D_t : میزان تقاضا در دوره t می‌باشد. در این مسئله ضرایب a و b و ... از روش حداقل مربعات به دست می‌آیند. چون نتایج حاصل از قسمت غیر خطی

^۱ Performance Criteria

۱) اعتمادپذیری^۱: فراوانی نسبی عدم شکست در مقادیر هدف^۲ را اعتمادپذیری می‌نامند. به طور معمول، آستانه شکست به صورت تقاضای آبی از مخزن تعریف می‌شود؛ ولی این موضوع قراردادی است و می‌توان آن را تغییر داد. خروجی‌های سیستم به دو مجموعه مقادیر رضایت بخش (S) و نارضایت بخش (F) تقسیم می‌شوند. اعتمادپذیری سیستم، α ، یعنی احتمال آنکه سیستم در حال رضایت بخش باشد

$$\alpha = \text{Prob}[X_t \in S] \quad (8)$$

داکستاین و همکاران در سال ۱۹۸۷ شاخص اعتمادپذیری را به صورت زیر تعریف کرده‌اند

$$R_I = \frac{t+1 - \sum_{j=0}^t S(\alpha, j)}{t+1} \quad (9)$$

که در آن

t گام زمانی و $S(\alpha, j)$ تابع حالت شکست در j امین بازه زمانی است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$S(\alpha, j) = \begin{cases} 1 & \text{اگر در زمان } j \text{ سیستم در حالت خراب باشد} \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (10)$$

۲) برگشتپذیری^۳: توانایی برگشت سیستم از حالت شکست، برگشتپذیری نامیده می‌شود. این شاخص بیانگر آن است که یک سیستم با چه سرعتی از وضعیت شکست به وضعیت رضایت بخش برمی‌گردد. اگر TF برابر مدت زمانی باشد که یک سیستم بعد از شکست در حالت نامطلوب باقی می‌ماند، آنگاه برگشتپذیری سیستم می‌تواند به صورت عکس مقدار TF مطرح شود [۱۳]

$$\gamma = \frac{p}{1-\alpha} \quad (11)$$

که در آن

γ برگشتپذیری سیستم است و p احتمال آنکه سیستم در زمان t در حالت رضایت‌بخش و در گام زمانی بعدی به حالت نامطلوب تبدیل شود.

۳) آسیب‌پذیری^۴: مقدار و شدت شکست را آسیب‌پذیری می‌نامند. اغلب سیستم‌های تأمین آب با احتمال بسیار کوچکی از شکست طراحی می‌شوند که این امر به دلیل غیرقطعی بودن عوامل هیدرولوژیکی و اقلیمی می‌باشد. هاشیموتو^۵ و همکاران در سال ۱۹۸۳ معیار آسیب‌پذیری سیستم را به صورت آسیب‌پذیری حداکثر که بیشترین مقدار آسیب‌پذیریهای حداکثر در ماههای مختلف را مشخص می‌سازد، تعریف کرده‌اند. این معیار مقدراری بین صفر و یک دارد و مزیت‌اش در این است که با معیارهای اعتمادپذیری که محدودیت تغییرات آنها در همین فاصله است، هماهنگی خواهد داشت و به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۳].

$$\lambda_{\max} = \max(\lambda_{\max t}) \quad t = 1, \dots, m \quad (12)$$

$$\lambda_{\max t} = [\max(D_t - R_{it}), i = 1, 2, \dots, T] / D_t \quad (13)$$

که در آن

λ_{\max} آسیب‌پذیری حداکثر در طول دوره برنامه‌ریزی، $\lambda_{\max t}$ آسیب‌پذیری حداکثر در ماه t ام که مقدار آن بین صفر و یک است، m تعداد ماهها در یک سال که برابر ۱۲ است، D_t مقدار تقاضا در ماه t ام، R_{it} مقدار تخصیص در ماه t ام از سال i ام و T تعداد کل سالهای شبیه‌سازی شده‌اند.

این ارزیابی‌ها براساس شبیه‌سازی انجام می‌گیرند و باید دقت داشت تا طول دوره ارزیابی برای مدل‌های مختلف که مورد مقایسه قرار می‌گیرند، یکسان باشد.

۵- نتایج و بحث

به منظور تحلیل و ارزیابی کارایی مدل‌های ارائه شده در تعیین قواعد بهره‌برداری از مخزن، نتایج این مدل‌ها با مدل‌های مشابه در این زمینه مقایسه و تواناییهای آنها نسبت به یکدیگر سنجیده می‌شود. همچنین جهت بررسی امکان بهبود معیارهای بهره‌برداری در صورت استفاده عملی از این مدل‌ها، نتایج بهره‌برداری واقعی در شرایط عملکرد مخزن در ارزیابی فوق‌دخالت داده می‌شود. در جدول ۳ نتایج حاصل از این مقایسه ذکر شده است.

¹ Reliability

² Target Value

³ Resiliency

⁴ Vulnerability

⁵ Hashimoto

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل‌ها

تابع خسارت	آسیب‌پذیری (درصد)	برگشت‌پذیری (ماه)	اعتمادپذیری (درصد)	مدل
$\text{Min} \sum_{t=1}^n (D_t - R_t)^2$	۵۳/۵۸	۳/۶	۸۰/۷۵	SQP
۱۲۸۰۰	۸۰/۰	۳/۵	۸۵/۱۰	SOP
۵۵۶۰۰	۸۴/۳	۴/۵	۶۸/۷	رگرسیون ماهانه
۸۷۴۰۰	۶۴/۹	۳/۴	۸۲/۶	سیستم استنباط فازی
۱۷۴۰۰				

۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی از تحقیق حاضر، ساخت قواعد بهره‌برداری مخزن سد زاینده‌رود با استفاده از سیستم استنباط فازی می‌باشد. به منظور بررسی و ارزیابی قابلیت‌ها، نتایج مدل حاضر با استفاده از معیارهای ارزیابی کارایی سیستم‌های منابع آب از قبیل اعتماد پذیری، برگشت پذیری و آسیب‌پذیری مورد سنجش قرار گرفتند. بهره‌برداری از مخزن با محدودیت‌های فیزیکی (از قبیل ظرفیت مخزن، سرریز و ظرفیت کانال پایین‌دست)، محدودیت‌های تقاضا، عدم قطعیت در پیش‌بینی جریان رودخانه، و تلفات ناشی از تبخیر مواجه است. بنابراین تجربه بهره‌بردار نقش مهمی را در تصمیم‌گیری در مورد میزان خروجی ایفا می‌کند. کوشش سیستم استنباط فازی بر آن است تا تمام موارد ذکر شده را تحت شروط و قوانین فازی درآورد تا میزان خروجی متناسب با تقاضای واقعی شود. تحلیل نتایج و بررسی معیارهای عملکردی، مؤید توانمندیهای سیستم استنباط فازی می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد که روش استنباط فازی نسبت به سایر روشها برتری داشته و می‌توان از آن برای ساخت قواعد بهره‌برداری استفاده کرد.

معیار اعتمادپذیری در ستون دوم جدول نشان می‌دهد که نتایج مدل‌ها به جز مدل رگرسیون اختلاف چندانی با هم ندارند. معیار برگشت‌پذیری در ستون سوم نشان می‌دهد که در مدل استنباط فازی مدت زمان برگشت از حالت شکست به حالت رضایت بخش به مدل بهینه‌سازی نزدیک بوده و سیستم قادر است در مدت مناسبی بعد از شکست به حالت عادی خود برگردد. در ستون چهارم حداکثر آسیب پذیری نشان داده شده است. جدول مذکور نشان می‌دهد که سیستم استنباط فازی به مقدار قابل توجهی میزان آسیب‌پذیری را کاهش می‌دهد و همچنین میزان خسارت در طول دوره ارزیابی را نسبت به سیاست بهره‌برداری استاندارد یا رگرسیون خطی کم کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار تابع خسارت برای مدل بهینه‌یابی از کمترین مقدار برخوردار است. مقادیر تابع خسارت قاعده بهره‌برداری استاندارد و رگرسیون خطی اختلاف فاحشی با نتیجه به دست آمده از مدل بهینه‌یابی دارند. در حالی که این اختلاف بین مدل بهینه‌یابی و سیستم فازی ناچیز می‌باشد.

با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد که سیستم استنباط فازی از سایر روشها برتر است و می‌توان از آن برای ساخت قواعد بهره‌برداری استفاده کرد.

۷- مراجع

- ۱- تشنه لب، م. صفار پور، ن. و افیونی، د. (۱۳۷۸). *سیستم‌های فازی و کنترل فازی*. دانشگاه خواجه نصیر طوسی، تهران.
- 2- Huang, W. C. (1996). "Decision support system for reservoir operation." *Water Resour. Bull.*, 32 (6), 1221-1232.
- 3- Saad, M., Bigras, P., Turgeon, A., and Duquette, R. (1996). "Fuzzy learning decomposition for the scheduling of hydroelectric power systems." *Water Resour. Res.*, 32(1), 179- 186.
- 4- Fontane, D. G., Gates, T. K., and Moncad, E. (1997). "Planning reservoir operations with imprecise objectives." *J. Water Resour. Plan Manage.*, 123(3), 157- 162.
- 5- Bardossy, A., and Duckstein, L. (1995). *Fuzzy rule-based modeling with application to geophysical, Biological and engineering systems*, 1st Ed., CRC and Boca Raton, FL, USA.
- 6- Kosko, B. (1992). *Neural networks and fuzzy systems*. 1st Ed., Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N. J.
- 7- Russel, S. O., and Campbell, P. F. (1996). "Reservoir operating rules with fuzzy programming." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 123(3), 165-170.
- 8- Sherestha, B. P., Duckstein, L., and Stakiv, E. Z. (1996). "Fuzzy rule-based modeling reservoir operating." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 122(4), 262-269.
- 9- Dubrovin, T., Jolma, A., and Turunen, E. (2002). "Fuzzy model for real - time reservoir operation." *J. water Resour. Plan. Manage.*, 128 (1), 66-73.
- 10- Jolma, A., Turunen, E., and Kummu, M. (2001). "Reservoir operation by fuzzy reasoning." *Proc., International Congress on Modeling and Simulation, MODSIM*, Camberra, Australia, 10-13.
- ۱۱- دفتر مطالعات آب و محیط زیست. (۱۳۸۴). *مطالعات پیش‌بینی آورد حوضه آبریز زاینده‌رود با استفاده از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و زمینی*. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- 12- Labadie, W. J. (2004). "Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review." *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 130(2), 93-111.
- 13- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation." *Water Resources Research*, 18 (1), 14-20.