

ساخت مدل های پیش بینی جریان رودخانه و بهره برداری از مخزن با استفاده از سیستم استنباط فازی

سعید جمالی، کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران*
احمد ابریشم چی، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
مسعود تجربی، دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
*تلفن: ۰۲۱-۸۸۷۷۷۶۵۰ پست الکترونیکی: s_jamali@alum.sharif.edu

چکیده

حوضه زاینده رود در فلات مرکزی ایران قرار گرفته است و جزو مناطق کم آب ایران به حساب می آید. رشد روزافزون جمعیت و توسعه بخشهای کشاورزی و صنعتی منطقه موجب افزایش قابل توجه تقاضای آبی حوضه مذکور شده است. به جهت محدود بودن منابع آبی استفاده بهینه از این منابع الزامی است. در این مقاله مدلی مبتنی بر سیستم استنباط فازی برای بهره برداری مخزن سد زاینده رود 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 می باشد. مدل مزبور شامل دو قسمت است که در قسمت اول، حجم جریان فصلی رودخانه به وسیله یک سیستم استنباط فازی پیش بینی می شود. شاخص نوسانات جنوبی، بارش، برف و دبی، ورودیهای مدل و حجم آورد فصلی رودخانه خروجی آن می باشند. در قسمت دوم، قواعد بهره برداری از مخزن ساخته شده است. حجم جریان های پیش بینی شده، حجم ذخیره مخزن در ابتدای هر ماه و تقاضای ماهانه، به عنوان مقدمات شرط، و میزان خروج از مخزن در هر ماه نتیجه شرط در نظر گرفته می شود. داده های تاریخی به منظور آموزش و سپس ارزیابی قواعد به دو قسمت تقسیم گردید. در مرحله بعد نتایج حاصل از مدل استنباط فازی با نتایج روشهای سنتی از قبیل سیاست بهره برداری استاندارد و رگرسیون خطی مقایسه می شود. در این مرحله از شاخص هایی برای ارزیابی قواعد ساخته شده استفاده می شود که نشان می دهند سیستم استنباط فازی روش مناسبی برای ساخت قواعد بهره برداری از مخزن و استفاده آن در سیستم های پیچیده مخازن می باشد.

واژه های کلیدی: سیستم استنباط فازی، بهره برداری از مخزن، پیش بینی جریان، سیاست بهره برداری استاندارد، رگرسیون خطی

۱- مقدمه

بهره‌برداری مخزن فرایند تصمیم‌گیری پیوسته‌ای است که در آن با توجه به متغیرهای حالت مانند حجم ذخیره مخزن، مقدار تقاضاها و پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن، در مورد میزان خروج آب تصمیم‌گیری می‌شود. وظیفه بهره‌بردار ارضا کردن منظورهای تقاضاهای تعهد شده از مخزن تا حد امکان می‌باشد. عدم قطعیت^۱ و عدم دقت^۲ موجود در مسائل بهره‌برداری، تقاضاها، و پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی در پیچیدگی فرایند بهره‌برداری از مخزن نقش عمده‌ای دارند. عدم قطعیت به شرایط هواشناختی و هیدرولوژیکی و عدم وقوع یا تغییر هدفها، تقاضاها، استانداردها، ملاحظات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی با گذشت زمان بر می‌گردد. در حالی که عدم دقت به خطاهای انسانی یا اندازه‌گیری مربوط می‌شود. یکی از شیوه‌های برخورد با عدم قطعیت، استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی است. هدف منطق فازی استخراج نتایج دقیق با استفاده از مجموعه‌ای معلومات غیردقیق که با الفاظ و جملات زبانی تعریف شده است، می‌باشد. به طور نظری هر سیستمی که توسط منطق فازی طراحی شده باشد، توسط سایر تکنیک‌های طراحی مرسوم نیز قابل پیاده‌سازی است؛ اما ممکن است نسبت به شیوه منطق فازی پیچیده و مشکل‌تر باشد. اولین بار، زاده 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 [۱]. بعد از گسترش تئوری مجموعه‌های فازی و منطق فازی، محققان دریافتند که این منطق، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی بهره‌برداری مخزن می‌باشد. تئوری مجموعه‌های فازی در بهره‌برداری مخزن کاربردهای فراوانی دارد. تکنیک‌های بهینه‌یابی فازی^۳، سیستم‌های استنتاج فازی^۴ و تلفیق روش فازی با تکنیک‌های دیگر مانند تلفیق با شبکه‌های عصبی مصنوعی از کاربردهای مهم این تئوری در بهره‌برداری مخزن می‌باشند. مثالهایی از این کاربردهای را می‌توان در کارهای (Huang (1996) [۲]، Saad et al. (1996) [۳] و Fontane et al. (1997) [۴] ملاحظه کرد. سیستم استنباط فازی را می‌توان بر اساس دانش شخص خبره^۵ یا داده‌های مشاهده شده^۶ ساخت. نحوه استخراج قوانین از این روشها را Duckstein (1995) و Bardossy [۵] و Kosko (1992) [۶] شرح داده‌اند. Russell و Campbell (1996) دریافتند که با افزایش تعداد ورودیهای سیستم استنباط فازی، تعدد قوانین بیش از اندازه بزرگ و غیر قابل کنترل می‌شود [۷]. Sherestha et al. (1996) از پایگاه قواعد فازی برای به دست آوردن قوانین بهره‌برداری از مخازن چند منظوره استفاده کرد [۸]. در چند سال اخیر تلفیقی از شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی استفاده شده است (Dubrovin et al. (2002 مدلی استنتاجی 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 رقوم آب، تقاضاها و حجم آب ورودی می‌پردازد [۹]. Jolma et al. (2002) مدلی ساخت که هدف از آن تقلید از اپرتور انسانی می‌باشد. در واقع، رفتار بهره‌بردار در این مدل شبیه‌سازی شده است [۱۰]. هدف از این تحقیق، ساخت قواعد بهره‌برداری مخزن با توجه به ابهامات موجود در سیستم به وسیله سیستم استنباط فازی است.

۲- استنباط فازی

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. برای ساخت این توابع سه مرحله زیر را انجام باید داد.

¹ Uncertainty

² Inaccuracy

³ Fuzzy Optimization

⁴ Fuzzy Inference System

⁵ Expert Knowledge

⁶ Observed Data

– برای هر حالت، بهترین مقداری که از نظر زبانی توصیف کننده آن حالت است را تعریف کرده و به آن درجه عضویت یک ($\mu=1$) داده می‌شود.

– برای مقادیر از هر حالت که حالت بعدی آن مقدار حداکثر خود را دارد درجه عضویت برابر صفر تعیین می‌گردد.

– نقطه با درجه عضویت یک به نقاط قبلی و بعدی با درجه عضویت صفر به صورت خطی متصل می‌شود.

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

۱- فازی سازی: فازی سازی به عنوان نگاشتی از یک نقطه $X^0 \in U \subset R^n$ به یک مجموعه فازی A' در U تعریف می‌شود.

۲- موتور استنتاج فازی یا پایگاه قواعد فازی^۱: پایگاه قواعد فازی از مجموعه‌ای از قواعد اگر- آنگاه فازی تشکیل می‌شود. پایگاه قواعد فازی از این نظر که سایر اجزای سیستم فازی برای پیاده سازی این قواعد به شکل موثر و کارا استفاده می‌شوند، قلب یک سیستم فازی محسوب می‌شود. به طور مشخص، پایگاه قواعد شامل قواعد اگر- آنگاه فازی زیر

Rule: If x is A then z is B است:

برای ساخت قواعد بهره‌برداری مخزن با استفاده از سیستم‌های استنباط فازی نیاز به دانش خبره است که این دانش از روشهای متفاوتی استنتاج می‌شود. می‌توان از روشهای بهینه‌سازی به منظور ساخت این دانش استفاده کرد. در این تحقیق، دستیابی به این دانش از روش برنامه ریزی مرتبه دوم پی‌درپی^۲ (SQP) و با تابع هدف حداقل کردن مجموع مربعات انحراف میزان خروجی از مخزن نسبت به تقاضا و با استفاده از داده‌های مشاهده شده جریان ماهانه ورودی به مخزن میسر شده است. اساس SQP بر موثر بودن محاسبات الگوریتم برنامه ریزی غیر خطی مرتبه دوم و توانایی بالاتر بسط‌های مرتبه دوم نسبت به روابط خطی برای تقریب زدن توابع غیر خطی است. با وجود اینکه در این روش به جای خطی سازی تابع هدف، یک تقریب مرتبه دوم برای مسئله زده می‌شود، ولی قیود کماکان به صورت خطی باقی می‌مانند. در این تحقیق با توجه به داده‌های مشاهده شده به وسیله روش SQP حجمهای بهینه خروجی در گامهای زمانی ماهانه محاسبه شده و در نهایت به کمک مدل استنباط فازی قواعد بهره‌برداری ساخته شده است. در این مسئله گام زمانی، ماهانه در نظر گرفته شده و همچنین فرض شده حجم آب مورد تقاضا هر سال ثابت است؛ لکن مقدار آن در هر ماه تغییر می‌کند.

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

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

۳- مدل بهره‌برداری مخزن سد زاینده رود

۳-۱- توصیف مورد مطالعاتی

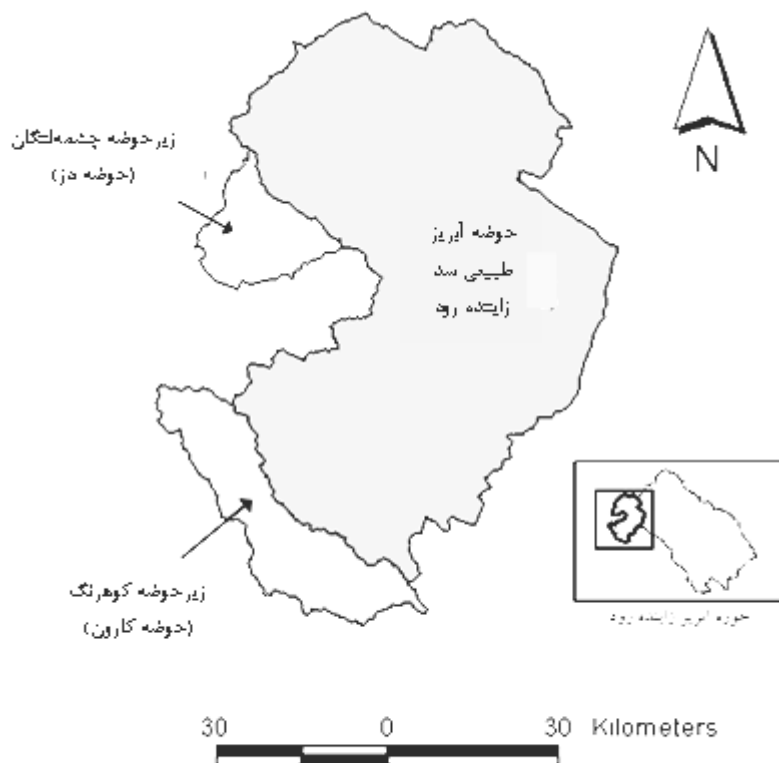
حوضه زاینده رود در فلات مرکزی ایران و در پهنه گرم و خشک کشور قرار گرفته است. این حوضه جزو مناطق کم آب ایران به حساب می‌آید. مساحت کل حوضه ۴۱۵۲۴ کیلومتر مربع است که این رقم ۲/۵ درصد مساحت کل کشور را شامل می‌شود. از این مقدار، ۱۶۶۷۰ کیلومتر مربع را مناطق کوهستانی و ۲۴۸۵۴ کیلومتر مربع را مناطق دشت و کوهپایه 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

¹ Fuzzy Rule-Base

² Successive Quadratic Programming

³ Aggregation

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 قرار دارد. این سد که یکی از اصلی‌ترین تاسیسات 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، تامین آب مورد نیاز شرب منطقه، تامین آب صنایع بزرگ، حفاظت از شهر و آثار تاریخی در مقابل سیل و کنترل بخش اعظمی از آب برای فصول کم‌آبی، تولید انرژی برق‌آبی، از منظوره‌های اصلی احداث سد زاینده‌رود است. در شکل ۱ زیر حوضه-های آبریز سد زاینده‌رود نشان داده شده است. حوضه‌های آبریز چشمه‌لنگان و کوهرنگ به ترتیب زیرحوضه‌هایی از رودخانه‌های دز و کارون اند که آب آنها به عنوان انتقال بین حوضه‌ای وارد حوضه آبریز طبیعی سد زاینده‌رود می‌شود.



شکل ۱- زیرحوضه‌های آبریز سد زاینده‌رود

۳-۲ مدل پیش‌بینی جریان فصلی رودخانه

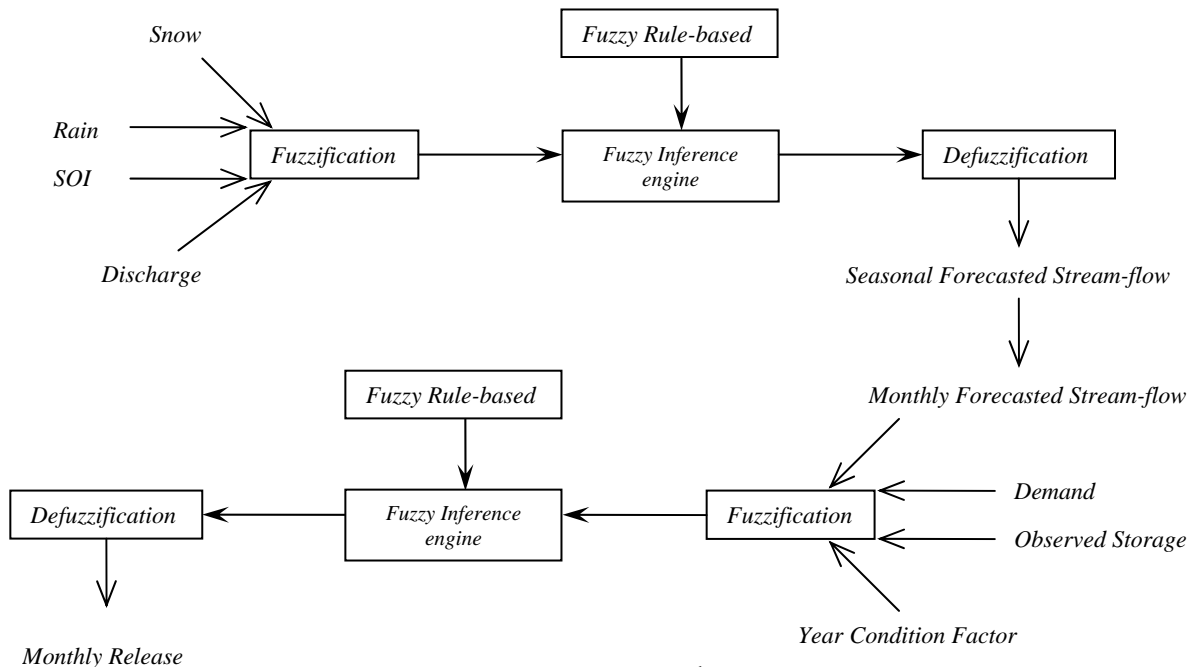
هدف از ساخت این مدل، پیش‌بینی وضعیت آبی هر فصل می‌باشد و نه پیش‌بینی دقیق جریان فصلی. بدین منظور هر سال به سه دوره زمانی مجزا تقسیم شده و در هر دوره جریان مربوط به آن دوره پیش‌بینی می‌شود، سپس فاکتور وضعیت سال به صورت کسر حجم آورد مشاهده شده در فصل مورد نظر به بیشترین حجم آورد مشاهده شده در کل بازه زمانی تعریف می‌شود.

دوره‌های زمانی فوق‌الذکر عبارت‌اند از: فصل بارش برف، فصل ذوب برف و بقیه سال. پیش‌بینی جریان در هر دوره زمانی به صورت جداگانه صورت می‌گیرد. برای پیش‌بینی جریان در دوره زمانی اول، از عواملی مانند میزان بارش و شاخص نوسانات جنوبی^۱ در ماههای دوره قبل استفاده می‌شود. جریان رودخانه در فصل ذوب برف وابستگی زیادی به آب

^۱ Southern Oscillated Index

معادل برف، بارش و شاخص نوسانات جنوبی دارد، اما برای جریان رودخانه در بقیه سال بیشتر به دبی رودخانه وابسته است. یک قانون فازی در مدل پیش‌بینی می‌تواند به صورت زیر باشد:

If snow water equivalent is small/ average/ large and amount of rain is low/ mediocre/ high, Then stream-flow is very small/ small/ average/ high/ very high.



شکل ۲- ساختار مدل

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

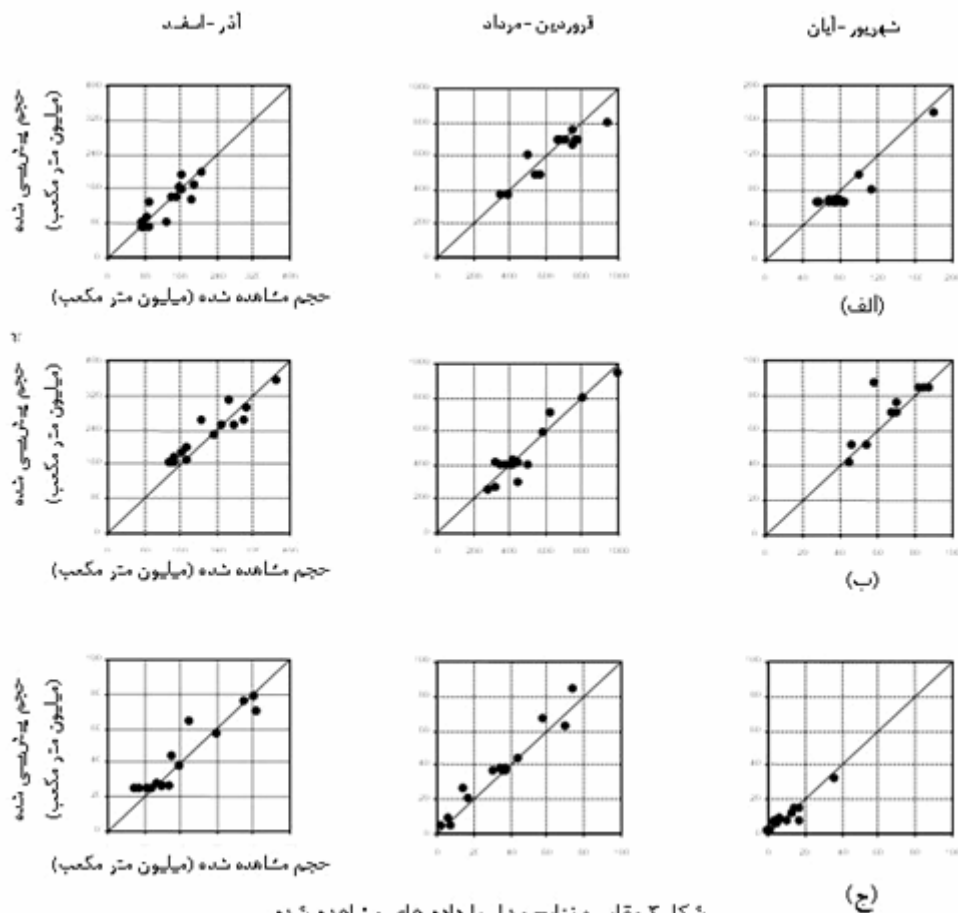
$$F_{YC} = \frac{I_{(t,n)}}{I_{(max,n)}} \quad (1)$$

با این معیار می‌توان وضعیت حجم آورد را از نظر خشکسالی، تر سالی و یا نرمال پیش‌بینی کرد. در نتیجه با آگاهی از وضعیت هر فصل می‌توان برای میزان خروج آب برنامه‌ریزی کرد. استفاده از این روش گام موثری در بهره‌برداری بهینه از مخزن 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 میزان 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 الی ۱۳۸۳ عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفته است. در شکل ۳ نتایج مقایسه حجم آورد مشاهده شده با ساخته شده به وسیله مدل آورده شده است.

منطبق شدن نقاط بر روی خط ۴۵ درجه نشان دهنده این است که مدل دقیقاً داده‌های مشاهده شده را پیش‌بینی کرده است. اما به علت وجود خطا در روش پیش‌بینی، همواره این نقاط نوساناتی حول این خط دارند. بدیهی است نزدیکتر شدن نقاط به خط، مبین دقت بیشتر مدل خواهد بود.



شکل ۳ مقایسه نتایج مدل با داده‌های مشاهده شده (الف) کوهرنگ، (ب) قلعه شاهرخ، (ج) اسکندری

۳-۳- مدل استنباط فازی بهره‌برداری مخزن

یک مدل مبتنی بر سیستم استنباط فازی برای سد زاینده‌رود ساخته شده است. متغیرها و یا مقدمات شرط مدل فازی در این تحقیق عبارت‌اند 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 است.

توابع عضویت پیشنهادی برای هر یک از متغیرهای فوق در شکل ۴ آمده است. چهار تابع عضویت مثلثی برای توصیف جریان ماهانه پیش‌بینی شده از ۲۰ تا ۲۵۰ میلیون متر مکعب در هر ماه و پنج تابع عضویت (سه تابع مثلثی و دو تابع ذوزنقه‌ای) برای توصیف حجم ذخیره مخزن از ۶۰ تا ۱۴۶۰ میلیون متر مکعب استفاده شده است. تقاضای ماههای مختلف نیز به ۵ تابع عضویت تقسیم شده که به ترتیب معرف تقاضاهای خیلی 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 ناکار آمدن شدن سیستم افزایش می‌یابد. بنابراین باید بین افزایش توابع عضویت و تعداد قوانین، تعاملی برقرار کرد. برخلاف تصور، افزایش قوانین باعث بهبود نتایج نمی‌شود؛ بلکه ممکن است موجب اختلال در کنترل سیستم و پیچیده تر شدن مسئله شود. ساختار قواعد به کار رفته در مدل به صورت زیر

می‌باشد. $If\ demand\ is\ A_{i,1}\ and\ storage\ volume\ is\ A_{i,2}\ and\ forecasted\ inflow\ is\ A_{i,3},\ Then\ release\ is\ B_i$

معادله موازنه سیستم یا موازنه جرم و شرایط فیزیکی یا مرزی برای بهره‌برداری از مخزن به صورت زیر در نظر

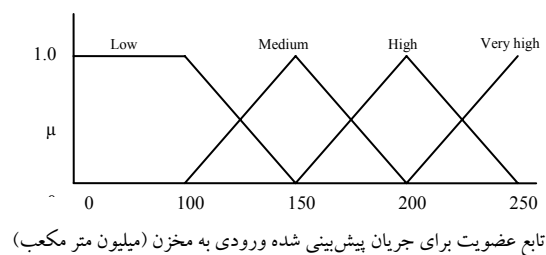
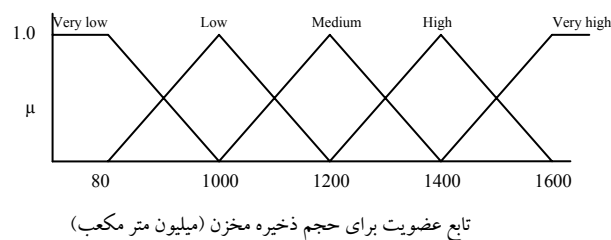
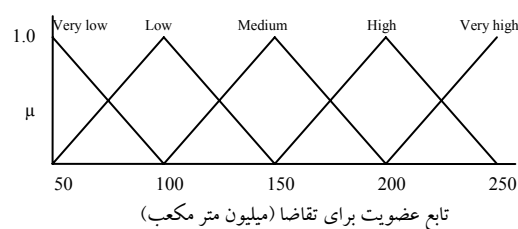
گرفته شده است

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t - L_t \quad (2)$$

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max} \quad (3)$$

$$R_{\min} \leq R_t \leq R_{\max} \quad (4)$$

نحوه اجرای مدل به این صورت است که برای تعیین خروجی از مخزن، مدل از جریان پیش‌بینی شده ورودی به مخزن استفاده می‌کند؛ لکن برای محاسبه حجم ذخیره مخزن در ابتدای ماه بعد، از جریان مشاهده شده در معادله موازنه جرم استفاده می‌شود. از داده‌های سالهای ۱۳۶۹ تا ۱۳۷۹ برای آموزش و ساخت مدل و از داده‌های سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ برای ارزیابی مدل استفاده شده است.



شکل ۴- توابع عضویت متغیرهای مدل

۴- معیارهای ارزیابی قواعد بهره‌برداری

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

(۱) اعتمادپذیری^۲: فراوانی نسبی عدم شکست در مقادیر هدف^۳ را اعتمادپذیری می‌نامند. به طور معمول، آستانه شکست به صورت تقاضای آبی از مخزن تعریف می‌شود؛ ولی این موضوع قراردادی است و می‌توان آنرا تغییر داد. خروجیهای

¹ Performance Criteria

² Reliability

³ Target Value

سیستم به دو مجموعه رضایت بخش (S) و مقادیر نارضایت بخش (F) تقسیم می‌شوند. اعتمادپذیری سیستم، α ، یعنی احتمال آنکه سیستم در حال رضایت بخش باشد [۱۲]

$$\alpha = \text{Prob} [X_t \in S] \quad (5)$$

Duckstein et al. (1987) شاخص اعتمادپذیری را به صورت زیر تعریف کرده است [۱۲]

$$RI = \frac{t + 1 - \sum_{j=0}^t S(\mu, j)}{t + 1} \quad (6)$$

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

$$S(\mu, j) = \begin{cases} 1 & \text{در زمان } j \text{ سیستم در حالت خراب باشد} \\ 0 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (7)$$

۲) برگشت‌پذیری^۴: برگشت‌پذیری، توانایی برگشت سیستم از حالت شکست را نشان می‌دهد و بیان می‌کند که با چه سرعتی یک سیستم از وضعیت شکست به وضعیت رضایت بخش برمی‌گردد. اگر TF برابر مدت زمانی باشد که یک سیستم بعد از شکست در حالت نارضایت بخش باقی می‌ماند، آنگاه برگشت‌پذیری سیستم می‌تواند به صورت عکس مقدار TF مطرح شود [۱۲]

$$\gamma = \frac{\rho}{1 - \alpha} \quad (8)$$

که در آن، γ برگشت‌پذیری سیستم و ρ احتمال آنکه سیستم در زمان t در حالت رضایت‌بخش و در گام زمانی بعدی به حالت نارضایت‌بخش تبدیل شود.

۳) آسیب‌پذیری^۵: آسیب‌پذیری، مقدار و شدت شکست را بیان می‌کند. اغلب سیستم‌های تامین آب با احتمال بسیار کوچکی از شکست طراحی می‌شوند که این امر به دلیل غیر قطعی بودن عوامل هیدرولوژیکی و اقلیمی می‌باشد. Hashimoto et al. (1983) معیار آسیب‌پذیری سیستم را به صورت آسیب‌پذیری حداکثر که بیشترین مقدار آسیب‌پذیری‌های حداکثر در ماه‌های مختلف را مشخص می‌سازد، تعریف کرده‌اند. این معیار ارائه شده مقدراری بین صفر و یک دارد و مزیت آن در این است که با معیارهای اعتمادپذیری که محدودیت تغییرات آنها در همین فاصله است، هماهنگی خواهد داشت و به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۲]

$$\lambda_{\max} = \max(\lambda_{\max_t}) \quad t = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$\lambda_{\max_t} = [\max(D_t - R_{it}), i = 1, 2, \dots, T] / D_t \quad (10)$$

که در آن، λ_{\max} آسیب‌پذیری حداکثر در طول دوره برنامه‌ریزی، λ_{\max_t} آسیب‌پذیری حداکثر در ماه t ام که مقدار آن بین صفر یک است، m تعداد ماه‌ها در یک سال که برابر ۱۲ است، P_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.

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 در برابر تحقیقات گذشته بررسی می‌شود. همچنین جهت بررسی امکان بهبود معیارهای بهره‌برداری در صورت استفاده عملی از این مدل‌ها، نتایج بهره‌برداری واقعی در شرایط عملکرد مخزن در ارزیابی فوق دخالت داده می‌شود. در جدول ۱ نتایج حاصل از این مقایسه آمده است.

⁴Resiliency

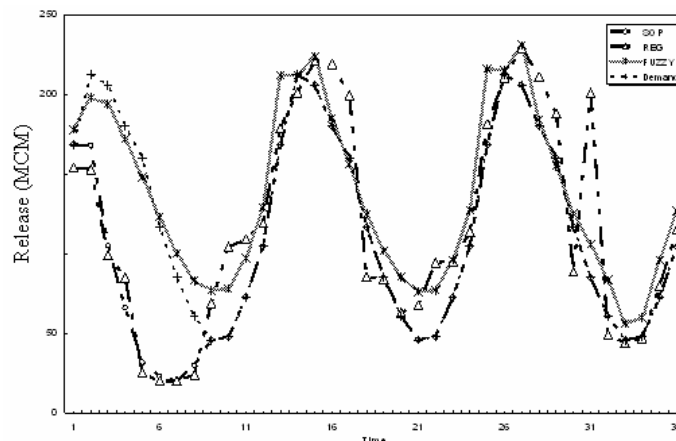
⁵Vulnerability

جدول ۱- نتایج ارزیابی مدل‌ها

مدل	اعتماد پذیری (درصد)	برگشت پذیری (ماه)	آسیب پذیری (درصد)
سیاست بهره‌برداری استاندارد	۸۱/۰	۳/۵	۸۰/۰
رگرسیون ماهانه	۶۸/۷	۴/۵	۸۴/۳
سیستم استنباط فازی	۸۲/۶	۳/۴	۶۴/۹

معیار اعتماد پذیری در ستون دوم جدول نشان می‌دهد که نتایج مدل‌ها به جز مدل رگرسیون اختلاف چندانی با هم ندارند. معیار برگشت پذیری 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 در مدت مناسبی قادر خواهد بود بعد از شکست به حالت عادی خود برگردد. در ستون چهارم حداکثر آسیب پذیری نشان داده شده است. جدول بالا نشان می‌دهد که سیستم استنباط فازی به مقدار قابل توجهی میزان آسیب پذیری را کاهش می‌دهد و همچنین میزان خسارت در طول دوران ارزیابی را نسبت به سیاست بهره‌برداری استاندارد یا رگرسیون خطی کم کرده است.

با توجه به مطالب ذکر شده به نظر می‌رسد که سیستم استنباط فازی نسبت به سایر روشها برتری داشته و می‌توان از آن برای ساخت قواعد بهره‌برداری استفاده کرد. در شکل ۵ ارزیابی قوانین حاصل از مدل استنباط فازی مشاهده می‌شود. در این شکل، محور قائم میزان خروج آب و محور افقی ماههای سالهای ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ را نشان می‌دهند.



شکل ۵- مقایسه مدل فازی با رگرسیون خطی و قاعده بهره‌برداری استاندارد

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 اعتمادپذیری، برگشت پذیری و آسیب‌پذیری مورد ارزیابی قرار گرفتند. بهره‌برداری از مخزن با محدودیتهای فیزیکی (از قبیل ظرفیت مخزن، سرریز، و ظرفیت کانال پایین دست)، 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 در آورد تا میزان خروجی متناسب با تقاضای واقعی شود. تحلیل نتایج و بررسی معیارهای عملکردی، موید 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 نمود، لکن با توجه به نکات زیر در روش برخورد در این تحقیق، اعلام حکم قطعی در مورد فوق را منوط به تحقیق و بررسی بیشتر می‌کند.

- ۱- دوره بهره‌برداری در روش‌های مختلف این مقاله، با توجه به داده‌های مورد استفاده، یک دوره ۱۳ ساله است که مسلماً برای اعلام نظر قطعی و مقایسه معیارهای معرفی شده کافی نیست.
- ۲- استفاده از روش بهینه‌یابی غیر خطی، مجموع مربعات انحرافات خروجی نسبت به تقاضا در هر دوره را کمینه می‌کند و نه در هر دوره را.
- ۳- تابع هدف در نظر گرفته شده تمام جوانب بهره‌برداری را در نظر نمی‌گیرد. برای حل این مسئله می‌توان از برنامه‌ریزی چند هدفه استفاده کرد.

۷- مراجع

- [۱] تشنه لب، محمد، صفار پور، نیما وافیونی داریوش. سیستم‌های فازی و کنترل فازی تهران: دانشگاه خواجه نصیر طوسی، ۱۳۷۸.
- [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. Fuzzy Rule – Based Modeling with Application to Geophysical, Biological and Engineering Systems, CRC, and Boca Raton, Fla. (1995)
- [6] Kosko, (1992) B. (1992) "Neural Networks and Fuzzy Systems". 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., 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" MODSIM, International Congress on Modeling and Simulation, Camberra, Australia,. 10-13.12.
- [11] Hashimoto, T., J. R. Stedinger and D. P. Loucks, (1982) "Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water Resources System Performance Evaluation", Water Resources Research, Vol. 18, No. 1, pp. 14-20.
- [12] Duckstein, L., E. Plate and A. Benedini, (1987) "Water Engineering Reliability and Risk: A system Framework", Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series, No. 124, pp.1-18.