



Evaluation of Fuzzy Rule Generation Methods for Reservoir Operation

H. Hosseini Safa¹, S. Morid^{2*} and M. Moghaddasi³

Abstract

Fuzzy logic (FL) as a soft computing method based on human inference is widely used for water resources issues such as reservoir operation. However, common to any FL modeling approach, the definition of membership functions (MF) and the inference rules (IR) are a difficult and time consuming practice that construct the objective of this paper. Self organizing feature maps (SOFM) method is applied to create MF. Also Fuzzy associative maps (FAM) and Bootstrap fuzzy relevance test (BFRT) are applied to generate IRs. Zayandeh-rud dam in Esfahan Province, Iran, was taken as the case study. The results showed that the suggested classification by SOFM to define MF is quite acceptable. But, the resulted rules from FAM and BFRT need more evaluation and screening before application. Nevertheless, the applied methods play a significant role in reducing the required time to set up the final fuzzy model.

Keywords: Fuzzy logic, Rule generation, Membership function generation, Reservoir operation modeling, Zayandeh Rud dam.

Received: January 18, 2009

Accepted: July 19, 2010

ارزیابی روش‌های تولید قوانین فازی برای بهره‌برداری از مخزن سد

حمیده حسینی صفا^۱، سعید مرید^{۲*} و مهنوش مقدسی^۳

چکیده

منطق فازی به عنوان تکنیکی محاسباتی برگرفته از نحوه استدلال انسان، در مسائل گوناگون مدیریت منابع آب از جمله بهره‌برداری از مخازن، بسیار بکار گرفته شده است. یکی از مشکلات عمده در مدل‌سازی فازی، ساخت توابع عضویت و استخراج قوانین می‌باشد. بدین منظور در این تحقیق تلاش شده تا با استفاده از روش‌های خودکار، توابع عضویت و قواعد فازی جهت تعیین خروجی مخزن سد زاینده‌رود برای بخش کشاورزی مورد ارزیابی قرار گیرد. برای این منظور روش SOFM^۱ برای ساخت توابع عضویت و روش‌های FAM^۲ و BFRT^۳ نیز برای ساخت قواعد بهره‌برداری از مخزن بکار گرفته شده است. نتایج حاکی از آن است که طبقه‌بندی متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از روش SOFM راهکاری مناسب برای تعریف توابع عضویت فازی بوده، ولی روش BFRT و FAM هر چند قوانین قابل قبولی را تولید می‌کنند، ولی لازم است قوانین تولید شده بررسی و سپس مورد استفاده قرار گیرند. البته روش‌ها در کاهش زمان لازم برای ساخت قوانین، نقش موثری داشتند.

کلمات کلیدی: منطق فازی، تولید قوانین، تولید توابع عضویت، بهره‌برداری از مخزن، سد زاینده‌رود

تاریخ دریافت مقاله: ۲۹ دی ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۸ تیر ۱۳۸۹

1- M.Sc., Dept. of Water Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: safa_h_h@yahoo.com

2- Associate Prof. Dept. of Water Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Email: s_morid@hotmail.com

3- Ph.D. candidate, Dept. of Water Resources, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد منابع آب دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

۳- دانش‌آموخته دکتری سازه‌های آبی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول

یافته (SOFM)، ورودی TIN^۴ و TIP^۵ و خروجی را خوشه‌بندی کرده و سپس توابع عضویت مربوط را بدست آورده و برای داده‌های هر خوشه، یک قانون تعریف نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که خوشه‌بندی روشی مناسب برای تعریف توابع عضویت و استخراج قوانین می‌باشد. در مطالعه دیگری توسط این محققین (Chen and Mynett, 2004) مدل‌سازی فازی غلظت کلروفیل a در آبهای سواحل دریای شمال به انجام رسید و بدین منظور از مدلی آماری برای تعیین قوانین فازی استفاده شد. آنان برای تعریف توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی، روش SOFM را بکار برده و با استفاده از داده‌های تاریخی تعدادی قوانین فازی بدست آوردند. سپس با کمک روش آزمون FRT^۶ بر مبنای توزیع برنولی، درستی و نادرستی قوانین خود را آزمایش و ۱۵ قانون مناسب استخراج کردند. نتایج تحقیق نشان داد روش FRT روشی مناسب برای رد و یا قبول قوانین فازی است. برای پیش‌بینی غلظت نوعی باکتری و بررسی کیفیت آب رودخانه Murray در استرالیا، (Maier et al., 2001) نیز مدلی فازی را بکار بردند. آنها برای تعریف توابع عضویت فازی و استخراج قوانین از روش B-spline نگاشت‌های پیوسته (AM^۷) شبکه عصبی استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که این روش قوانین فازی را به خوبی استخراج نموده و قوانین حاصل حاکی از آن است که افزایش غلظت باکتری‌ها در رودخانه، پس از عبور سیل و در دمای بالای آب صورت می‌گیرد.

تحقیق حاضر نیز تلاشی است برای استفاده از روش‌های خودکار در تدوین و تعیین توابع عضویت و قوانین فازی و بررسی نتایج آنها که بدین منظور بهره‌برداری از سد زاینده‌رود و ساخت قوانین بهره‌برداری آن بر این اساس مورد مطالعاتی در نظر گرفته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مورد مطالعاتی

حوزه آبریز زاینده‌رود با مساحت ۴۱۵۰۰ کیلومترمربع در فلات مرکزی ایران واقع شده و جزء مناطق کم آب ایران به شمار می‌رود. سد مخزنی زاینده‌رود در ۱۱۰ کیلومتری غرب اصفهان قرار دارد. متوسط سالانه جریان ورودی به سد ۱۶۰۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که در حدود ۶۰۰ میلیون مترمکعب آن از حوزه رودخانه کارون است (عراقی نژاد، ۱۳۸۴). حجم کل مخزن سد ۱۴۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد که تامین آب مورد نیاز شبکه‌های کشاورزی، صنایع، شهرها و روستاها را بر عهده دارد و نیاز کشاورزی حدود ۷۰٪ کل تقاضای پایین‌دست را شامل می‌شود. مهم‌ترین شبکه‌های کشاورزی در پایین‌دست این سد به ترتیب از بالا به پائین شامل مهیار، نکوآباد

منطق فازی به عنوان یک تکنیک محاسباتی کامپیوتری بر مبنای نحوه استدلال و تفکر بشری، بطور روزافزونی مورد توجه قرار گرفته است. این منطق در طیف متنوعی از مسائل مربوط به مدیریت آب مانند پیش‌بینی بارندگی (Halide and Ridd, 2000)، شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی بلند مدت جریان رودخانه (عراقی نژاد و کارآموز، ۱۳۸۴) و الویت‌بندی طرح‌های منابع آب (طوسی، ۱۳۸۵) بکار گرفته شده است. از دیگر بخش‌هایی که این تکنیک مورد استفاده قرار گرفته است، مدیریت مخازن و ساخت قواعد بهره‌برداری می‌باشد. جایی که هم مدل‌سازی و هم تجربه، کارآمدی بهتر تصمیمات را محقق می‌سازد. Shrestha et al., 1996 از مدل‌سازی فازی برای بهره‌برداری چند منظوره از مخزن دریاچه سد با اهداف کنترل سیلاب و تامین نیروی برق‌آبی استفاده نمودند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که این منطق روش مناسبی برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده می‌باشد، اما برای استخراج قوانین از روی داده‌های تاریخی نیاز به دوره زمانی طولانی مدت است. بهره‌برداری چند منظوره از مخزن دریاچه‌ای در فنلاند به صورت زمان واقعی با بکارگیری روش کنترل فازی نیز موضوع تحقیق Dubrovin et al., 2002 بوده است. مدل آنها از دو زیر مدل تشکیل شده بود. زیر مدل اول رقوم سطح آب مخزن را برای هر بازه زمانی پیش‌بینی کرده و زیر مدل دوم مقدار آب خروجی از آن را در دوره زمانی بعدی محاسبه می‌کرد. آنها با کمک مدل خود، کاهش خسارت ناشی از کنترل سیلاب و همچنین سود بدست آمده از نیروی برق‌آبی را تعیین نمودند، هر چند برای مواقع سیلابی مدل به خوبی پاسخ‌گو نبود. جمالی و همکاران (۱۳۸۴) نیز در تحقیق خود، حجم جریان فصلی رودخانه را شبیه‌سازی کرده و قواعد بهره‌برداری از مخزن سد زاینده‌رود را به وسیله سیستم استنتاج فازی مدل‌سازی نمودند. مقایسه نتایج حاصل از مدل استنتاج فازی با روش‌های سنتی از قبیل سیاست بهره‌برداری استاندارد و رگرسیون خطی نشان داد که سیستم استنتاج فازی روش مناسب‌تری برای ساخت قواعد بهره‌برداری از مخزن می‌باشد.

اما یکی از مشکلات در مدل‌سازی فازی، استخراج قوانین می‌باشد. در بیشتر مواردی که از این تکنیک استفاده شده، از جمله موارد بالا نظرات کارشناسی و داده‌های تاریخی، برای ساخت توابع عضویت و قواعد فازی بکار گرفته شده است. بدین منظور تلاش‌هایی صورت گرفته است که این قوانین به‌طور خودکار با روش‌های مناسبی بدست آیند، مانند تحقیق (Chen and Mynett, 2003) برای مدل‌سازی فازی غلظت جلبک‌ها. آنها با استفاده از روش نگاشت خود سازمان

$W_{D,t}$ مقدار آب مورد نیاز بخش‌های شرب و صنعت (۳۰۰ MCM) و t دوره زمانی می‌باشد که در اینجا مقیاس سالانه در نظر گرفته شده است (تلفات نشت، تبخیر از سد و بارندگی روی سطح آن ناچیز فرض شده است).

راست و چپ، برخوار، آبشار راست و چپ، رودشت و تعدادی شبکه‌های کوچک می‌باشند (شکل ۱). در این تحقیق گیاهان اصلی شبکه شامل گندم، جو، سیب‌زمینی، یونجه، چغندرقد و برنج در مدل‌سازی‌ها مد نظر قرار گرفته است.

۲-۲- انتخاب متغیرهای ورودی و خروجی مدل فازی

برای خروجی مدل فازی نیز (حجم آب رها شده از مخزن برای بخش کشاورزی) مدل بهینه‌سازی با استفاده از روش هوش جمعی PSO^8 با تابع هدف ماکزیمم کردن سود تهیه گردید. در این روش‌شناسی ابتدا ۳ زیر مدل برای هر سال از دوره آماری ۲۲ ساله، با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی توسعه داده شد. سپس با استفاده از توابع سود حاصل از زیر مدل سوم، مدل مخزن (با روش PSO) برای ۲۲ سال آماری از سال آبی ۶۳-۱۳۶۲ تا سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ تهیه گردید (مقدسی و همکاران، ۱۳۸۷ و Moghaddasi et al., 2008). نتایج حاصل از مدل PSO برای حجم آب رها شده از مخزن به عنوان خروجی مدل فازی در نظر گرفته شد. در زیر شرح مختصری از مدل چهار لایه تخصیص آب ارائه می‌گردد:

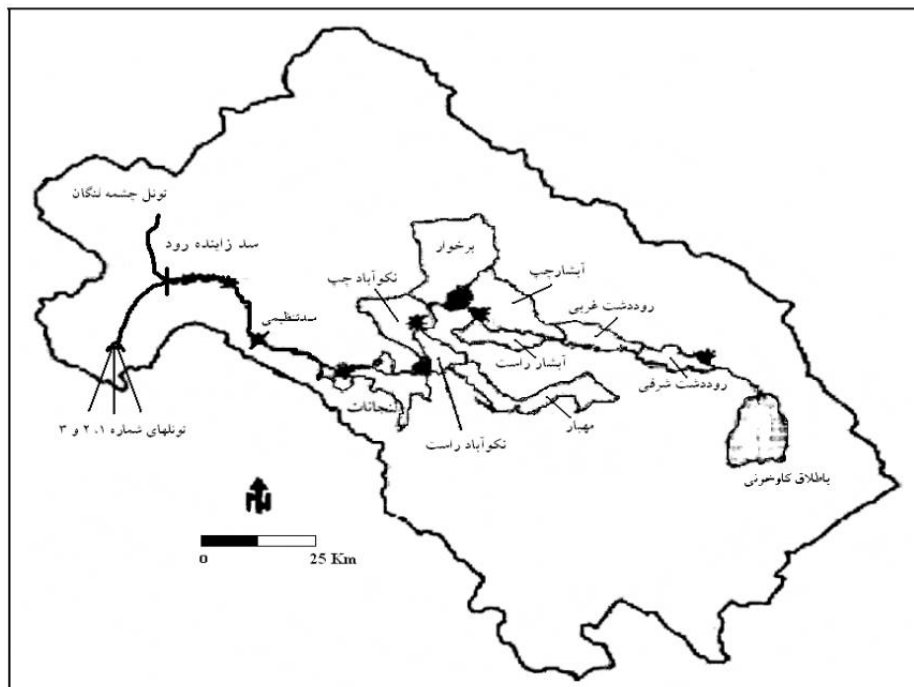
همان‌گونه که در مقدمه اشاره گردید، برای ارزیابی روش‌های خودکار تولید قوانین فازی و توابع عضویت، شبیه‌سازی خروجی سالانه برای بخش کشاورزی مد نظر قرار گرفته است. پس از بررسی ورودی‌های مختلف مانند حجم آورد رودخانه، مقدار ذخیره مخزن و همچنین تقاضای سالانه پایین‌دست، تنها دو عامل حجم آورد رودخانه به مخزن و مقدار ذخیره مخزن در ابتدای هر سال، به عنوان ورودی‌های مدل انتخاب شدند. برای آورد سالانه رودخانه از داده‌های مشاهده‌ای ۲۲ سال آماری از سال آبی ۶۳-۱۳۶۲ تا سال آبی ۸۴-۱۳۸۳ و برای محاسبه مقدار ذخیره مخزن از معادله پیوستگی استفاده گردید. از آنجایی که آب مورد نیاز بخش صنعت و شرب و آب مورد نیاز برنج به طور کامل تخصیص یافت، بیلان مخزن سد به صورت زیر تعریف گردید:

$$S_{t+1} = I_t + S_t + W_i + W_{D,I} - R_t \quad (1)$$

۲-۲-۱- مدل بهینه‌سازی تخصیص آب کشاورزی

بهینه‌سازی سیستم با توسعه چهار زیرمدل و بر اساس کار تحقیقاتی Moghaddasi et al. (2008) صورت گرفته است که توضیحات بیشتر در مورد قیود و روابط بکار رفته در این مرجع قابل دسترس می‌باشد.

که در آن R_t آب رها شده برای شبکه‌های کشاورزی، I_t کل آب ورودی به مخزن سد، S_t و S_{t+1} به ترتیب حجم مخزن در ابتدا و انتهای هر دوره، W_i مقدار آب مورد نیاز برنج (۱۱۶/۲ MCM)،



شکل ۱- شکل شماتیک حوزه زاینده‌رود، سد و شبکه‌های کشاورزی پایین‌دست آن

محدوده حداقل و حداکثر نیاز آبی طی کل دوره رشد گیاه) اجرا گردید تا عملکرد آن به ازای احجام مختلف تعیین و تابع بدست آید.

زیر مدل سوم: بهینه‌سازی توزیع آب بین شبکه‌های مختلف: زیرمدل سوم کل آب رها شده از مخزن سد را بصورت بهینه بین شبکه‌ها توزیع می‌نماید. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از کل شبکه‌ها می‌باشد:

$$MAX \left\{ \sum_{n=1}^N P_n(V_n) \right\} \quad (5)$$

که در آن N تعداد شبکه‌ها و $P_n(V_n)$ تابع سود هر شبکه به ازای آب تخصیص یافته است. برای محاسبه $P_n(V_n)$ زیرمدل دوم را برای هر شبکه و به ازای احجام مختلف اجرا گردید تا تابع مربوط (حجم آب اختصاص یافته به هر شبکه در مقابل سود) بدست آید.

زیر مدل چهارم: بهینه‌سازی سالانه سهم آب کشاورزی از مخزن سد: مدل‌سازی این بخش، با توجه به نتایج قسمت‌های قبلی و توابع عملکرد سالانه، تخصیص بهینه آب کشاورزی را طی دوره ۲۲ سال آماری ارائه می‌دهد. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از جریان خروجی از مخزن بوده که بصورت زیر تعریف می‌گردد:

$$MAX \left\{ \sum_{y=1}^Y P_y(Q) \right\} \quad (6)$$

در این رابطه Y تعداد سال‌ها و $P_y(Q)$ تابع سود هر سال به ازای آب تخصیص یافته است. برای محاسبه $P_y(Q)$ زیرمدل سوم برای هر سال و به ازای دبی‌های مختلف (مقادیر گوناگون آب خروجی از مخزن) اجرا گردید تا تابع سود برای هر سال بدست آید.

۲-۳- تولید توابع عضویت فازی با طبقه‌بندی به روش SOFM

روش SOFM که گاهی نقشه‌های کوهون^۹ نامیده می‌شود، شبکه‌ای از گره‌ها با ساختاری مشابه با شکل ۲ است (Kohonen, 2001). در این شکل نمونه‌ای از یک شبکه ورودی n بعدی و خروجی دو بعدی نشان داده شده است. هر گره دارای موقعیت مکانی مشخصی (یک جدول مختصات (x, y) و مشتمل بر وزن‌هایی با همان ابعاد بردار ورودی می‌باشد. به عبارت دیگر اگر داده‌های آموزشی شامل بردار X با n بعد باشند: $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ، آنگاه هر گره دارای بردار اوزان W با n بعد خواهد بود: $W_1, W_2, W_3, \dots, W_n$. خطوط اتصال گره‌ها که در شکل آمده، تنها برای نمایش مجاورت بوده و برخلاف شبکه‌های عصبی معمولی، هیچ‌گونه اتصالی را معین نمی‌کنند.

زیر مدل اول: بهینه‌سازی توزیع آب در طول فصل رشد گیاهان: در این قسمت از محاسبات، کل آب مصرفی هر محصول در فصل رشد در دوره‌های ۱۰ روزه (دور آبیاری منطقه مطالعاتی) بصورت بهینه توزیع می‌شود. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن نسبت عملکرد واقعی به عملکرد حداکثر محصول در هکتار بوده که بصورت ذیل می‌باشد:

$$MAX : \frac{Y_{ac}}{Y_{\max c}} = 1 - \sum_{g=1}^n Ky_g \left(1 - \frac{ETa_{c,g}}{ET \max_{c,g}} \right) \quad (2)$$

در این رابطه $ETa_{c,g}$ تبخیر و تعرق واقعی محصول c در مرحله رشد g (mm/10days)، $ET \max_{c,g}$ حداکثر تبخیر و تعرق محصول c در هر مرحله رشد (mm/10days)، Ky_g ضریب حساسیت عملکرد نسبت به تنش آبی برای هر گیاه در هر مرحله رشد، n تعداد مراحل رشد، Y_{ac} عملکرد واقعی محصول c و $Y \max_c$ حداکثر عملکرد محصول c (کیلوگرم در هکتار) می‌باشد. لازم به ذکر است حداکثر عملکرد گندم، جو، چغندر قند، سیب‌زمینی و یونجه (در تمام چین‌هایش) به ترتیب برابر با ۹۰۰۰، ۷۰۰۰، ۷۰۰۰۰ و ۵۰۰۰۰ و ۲۸۳۳ کیلوگرم در هکتار می‌باشد و مقدار حداکثر تبخیر و تعرق ($ET \max$) در گیاهان مختلف از رابطه زیر برآورد شد:

$$ET \max_{c,t} = Kc_{c,t} \times ET_o \quad (3)$$

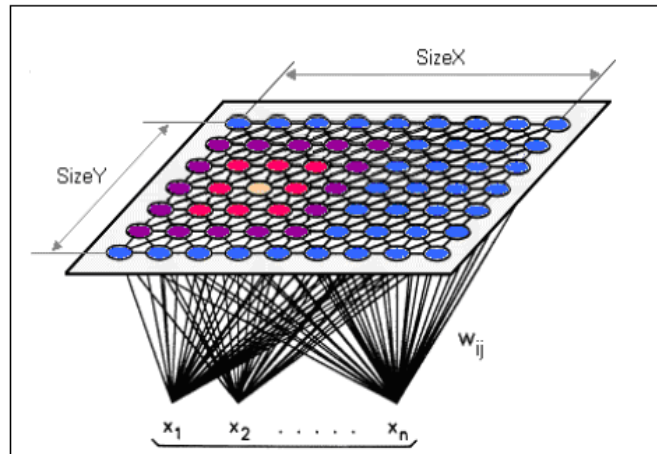
که در آن ET_o تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع، $Kc_{c,t}$ ضریب گیاهی و t دوره‌های ده روزه رشد گیاه می‌باشد. برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع روش پنمن - مانتیت با استفاده از داده‌های ایستگاه سینوپتیک اصفهان (دمای متوسط روزانه، دمای بیشینه و کمینه، سرعت باد، متوسط رطوبت نسبی و تابش خورشیدی) و ضریب گیاهی در هر مرحله از رشد گیاه بکار گرفته شد.

زیر مدل دوم: بهینه‌سازی توزیع آب بین محصولات مختلف در یک شبکه: این زیرمدل تخصیص بهینه کل آب را در یک شبکه بین محصولات مختلف عهده‌دار می‌باشد. تابع هدف این مدل حداکثر نمودن سود حاصل از همه محصولات در یک شبکه است:

$$MAX \left\{ \sum_{k=1}^K F_k(V_k) A_k Y_{\max k} P_k \right\} \quad (4)$$

که در آن K تعداد محصولات، $F_k(V_k)$ تابع عملکرد محصول (رابطه بین حداکثر عملکرد نسبی به آب تخصیص داده شده)، A_k سطح زیرکشت (ha)، $Y_{\max k}$ حداکثر عملکرد محصول و P درآمد محصول k است.

لازم به ذکر است که $F_k(V_k)$ از زیر مدل قبل برآورد می‌گردد. بدین منظور مدل اول برای هر محصول و به ازای احجام مختلف



شکل ۲- شبکه کوهونن ۲ بعدی با n ورودی (ماخذ: Kohonen, 2001)

df برابر است با n-1 که در اینجا n اندازه هر طبقه می‌باشد) و SD از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$SD = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

که در رابطه بالا σ مقدار انحراف معیار هر طبقه می‌باشد. میانگین طبقه‌های بدست آمده از روش SOFM برای هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی مدل نباید در باند $1-\alpha$ درصد با یکدیگر همپوشانی داشته باشند. اگر میان طبقه‌ها از لحاظ آماری همپوشانی معنی‌داری وجود نداشته باشد، نتیجه طبقه‌بندی قابل قبول است (Chen and Mynett, 2003).

در ادامه درجه تابع عضویت یک، برای میانگین هر طبقه از متغیرهای ورودی و خروجی در نظر گرفته می‌شود. سپس نوع تابع عضویت تعیین شده و سایر پارامترهای آنها بدست می‌آید (Chen and Mynett, 2004). شکل ۳ نمونه‌ای از توابع حاصل را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که برای استفاده از این طبقه‌بندی، ابتدا داده‌های ورودی و خروجی مطابق زیر نرمال می‌شوند (Chen and Mynett, 2003):

$$\xi_{n,k} = \frac{x_{n,k} - \mu_n}{\sigma_n} \quad (9)$$

که در آن، n تعداد متغیرهای ورودی و خروجی، k اندازه هریک از متغیرها، $x_{n,k}$ داده k ام از متغیر n ام، μ_n و σ_n به ترتیب میانگین و انحراف معیار متغیر n ام و $\xi_{n,k}$ مقدار نرمال شده $x_{n,k}$ می‌باشد.

طریقه کار روش SOFM به صورت خلاصه در زیر آورده شده است: الف) تعیین اولیه اوزان هر گره

ب) بررسی همه گره‌ها بطوریکه گره‌ای که دارای مشابه‌ترین اوزان به بردار ورودی است، پیدا شود. این گره، گره برنده نامیده می‌شود.

ج) محاسبه شعاع همسایگی گره برنده که برای محاسبه آن توابع مختلفی (فاصله اقلیدسی^۱، فاصله Link^۲، فاصله Manhattan^۳ و غیره) وجود دارد، اما معمولاً از تابع فاصله اقلیدسی استفاده می‌شود. مقدار این شعاع در ابتدا بزرگ و معمولاً برابر با شعاع جدول است، ولی با هر گام زمانی کوچکتر می‌گردد. هر گره در این شعاع به عنوان همسایه گره برنده در نظر گرفته می‌شود.

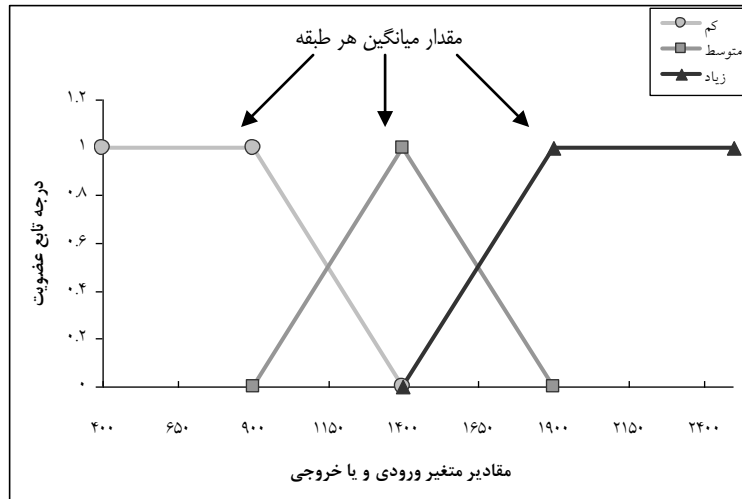
د) اوزان هر گره همسایه (حاصل از مرحله قبل)، برای شباهت بیشتر به بردارهای ورودی، تصحیح می‌شود. هرچه یک گره به گره برنده نزدیکتر باشد، در معرض تغییر وزن بیشتری خواهد بود.

ه) مرحله ب به تعداد مشاهدات ورودی تکرار می‌شود.

پس از طبقه‌بندی داده‌ها، میانگین هر طبقه از ورودی و خروجی‌های مدل محاسبه شده و برای میانگین هر طبقه، باند اطمینان $1-\alpha$ (در این تحقیق باند اطمینان ۹۵٪ در نظر گرفته شده است) تعریف می‌گردد (Chen and Mynett, 2003):

$$CI_{Mean} = Mean \pm (t_{\alpha,df} \times SD) \quad (10)$$

در رابطه بالا CI_{Mean} حد بالا و پایین باند اطمینان $1-\alpha$ درصد، Mean مقدار میانگین هر طبقه، $t_{\alpha,df}$ مقدار توزیع T-Student در سطح اطمینان α درصد و df درجه آزادی (مقدار



شکل ۳ - نمونه‌ای از توابع عضویت حاصل از روش SOFM

پایگاهی از قواعد اگر- آنگاه فازی ایجاد نماید. تعداد انجام مراحل آموزش را کاربر تعیین کرده و در هر مرحله خطا کمتر شده و در انتهای مراحل آموزش، پایگاه قواعد فازی با کمترین خطا بدست می‌آید. شرح بیشتر این روش در راهنمای نرم‌افزار Fuzzy Tech در دسترس می‌باشد.

۲-۴-۲- استخراج قوانین با استفاده از BFRT

برای تولید قوانین به کمک این روش نرم‌افزار خاصی یافت نشد و در محیط نرم‌افزار Matlab، برنامه‌ای برای آن تهیه گردید. از این رو شرح این روش با جزئیات بیشتری ارائه می‌گردد (Krone and Taeger, 2001).

یک قانون فازی را می‌توان به صورت عبارت زیر نمایش داد:

$$\text{If } S \text{ Then } C \quad (10)$$

که S نشان دهنده موقعیت متغیر ورودی مدل و C نمایانگر موقعیت متغیر خروجی مدل است. در صورتی که n نمونه از داده‌های ورودی و خروجی مدل فازی موجود باشد، می‌توان k امین نمونه از جفت داده‌های ورودی و خروجی را به صورت زیر نشان داد به گونه‌ای که $x(k)$ نماینده متغیرهای ورودی و $y(k)$ نماینده متغیرهای خروجی است و k از ۱ تا n تغییر می‌کند:

$$d_k = (x_1(k), x_2(k), \dots, y(k)) \quad (11)$$

احتمال به وقوع پیوستن C و S به صورت زیر قابل تعریف است:

$$P(C) = E[\mu_C(X)] \quad (12)$$

$$P(S) = E[\mu_S(X)] \quad (13)$$

۲-۴-۳- استخراج قوانین فازی

برای این بخش تمام قوانین ممکن (حاصل ضرب تعداد توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی) با توجه به توابع عضویت تعریف شده، ساخته می‌شود. سپس با استفاده از دو روش آزمون BFRT و FAM تک‌تک قوانین مورد بررسی قرار گرفته و قوانین مناسب از میان آنان استخراج می‌شود. در ادامه با اعمال نظر کارشناسی و حذف قوانین متناقض، قواعد نهایی حاصل می‌گردد. به این روش که به بررسی تک‌تک قوانین می‌پردازد، استدلال موردی (CR^{13}) اطلاق می‌گردد (Chen et al., 1992; Abe and Lan, 1995; Wang and Mendel, 1992). در مقابل این روش، استدلال ترکیبی (FR^{14}) وجود دارد که در آن متغیرهای ورودی و خروجی مدل با هم خوشه‌بندی شده و هر خوشه نماینده یک قانون خواهد بود (Kohonen, 1982; 1994; Chen and Mynett, 2003; Filev and Yager, 2003). در ادامه شرح روش‌های FAM و BFRT بیان می‌گردد.

۲-۴-۱- استخراج قوانین با استفاده از روش FAM

روش FAM پیوندی بین شبکه‌های عصبی و سیستم‌های فازی و ترکیبی از توانایی یادگیری شبکه عصبی و قوانین زبانی فازی می‌باشد. در این روش در هر مرحله از آموزش به هر یک از قوانین ممکن، وزنی نسبت داده شده که مناسب با نقش آنها در نزدیکی نتایج محاسبات با مشاهدات است. این وزن از صفر تا ۱ در تغییر خواهد بود. برای بکارگیری روش FAM از نرم‌افزار Fuzzy Tech استفاده شده که برای شرح بیشتر مرجع (Anonymous, 1999) قابل مراجعه می‌باشد. این نرم‌افزار این قابلیت را دارد که با بکارگیری روش نروفازی^{۱۵} و آموزش^{۱۶} مجموعه زوج‌های ورودی و خروجی،

$$(\widehat{p}^{*(1)}, \dots, \widehat{p}^{*(w)}) \text{ کوچکترین } g_u \text{ امین مقدار از} \quad (19)$$

$$p^o = \widehat{p}^{*(g_o)}$$

$$(\widehat{p}^{*(1)}, \dots, \widehat{p}^{*(w)}) \text{ کوچکترین } g_o \text{ امین مقدار از} \quad (20)$$

$$p_\lambda^u = \widehat{p}_\lambda^{*(g_{\lambda u})}$$

$$(\widehat{p}_\lambda^{*(1)}, \dots, \widehat{p}_\lambda^{*(w)}) \text{ کوچکترین } g_{\lambda u} \text{ امین مقدار از} \quad (21)$$

$$p_\lambda^o = \widehat{p}_\lambda^{*(g_{\lambda o})}$$

$$(\widehat{p}_\lambda^{*(1)}, \dots, \widehat{p}_\lambda^{*(w)}) \text{ کوچکترین } g_{\lambda o} \text{ امین مقدار از} \quad (22)$$

که در آن p^o و p^u به ترتیب باند اطمینان بالا و پایین \widehat{p} ، و p_λ^o و p_λ^u باند اطمینان بالا و پایین \widehat{p}_λ هستند. مقادیر g_u ، g_o ، $g_{\lambda u}$ و $g_{\lambda o}$ از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$g_u := \text{trunc}(\beta_u(w+1)) \quad (23)$$

$$g_o := \text{trunc}(\beta_o(w+1)) \quad (24)$$

$$g_{\lambda u} := \text{trunc}(\beta_{\lambda u}(w+1)) \quad (25)$$

$$g_{\lambda o} := \text{trunc}(\beta_{\lambda o}(w+1)) \quad (26)$$

و مقدار β بوسیله تابع توزیع Φ از توزیع نرمال استاندارد محاسبه می‌گردد:

$$\beta_u = \Phi\left(\bar{z}_0 + \frac{\bar{z}_0 + z^{(\alpha)}}{1 - \bar{a}(\bar{z}_0 + z^{(\alpha)})}\right) \quad (27)$$

$$\beta_o = \Phi\left(\bar{z}_0 + \frac{\bar{z}_0 + z^{(1-\alpha)}}{1 - \bar{a}(\bar{z}_0 + z^{(1-\alpha)})}\right) \quad (28)$$

$$\beta_{\lambda u} = \Phi\left(\bar{z}_{\lambda 0} + \frac{\bar{z}_{\lambda 0} + z^{(\alpha)}}{1 - \bar{a}_\lambda(\bar{z}_{\lambda 0} + z^{(\alpha)})}\right) \quad (29)$$

$$\beta_{\lambda o} = \Phi\left(\bar{z}_{\lambda 0} + \frac{\bar{z}_{\lambda 0} + z^{(1-\alpha)}}{1 - \bar{a}_\lambda(\bar{z}_{\lambda 0} + z^{(1-\alpha)})}\right) \quad (30)$$

در روابط بالا $z^{(\alpha)}$ و $z^{(1-\alpha)}$ مقدار تابع توزیع نرمال استاندارد برای ضرایب اطمینان α و $1-\alpha$ درصد هستند (در این تحقیق مقدار α ، 0.5 در نظر گرفته شده است). \bar{z}_0 و $\bar{z}_{\lambda 0}$ نیز پارامترهای اریب^{۱۷} \bar{a} و \bar{a}_λ پارامترهای شتاب^{۱۸} می‌باشند:

$$\bar{z}_0 = z \left(\frac{r}{w}\right) \quad (31)$$

$$\bar{z}_{\lambda 0} = z \left(\frac{r_\lambda}{w}\right) \quad (32)$$

که r شماره‌ی ردیف $\widehat{p}^{(*)}$ در w نمونه بوت‌استرپ مرتب شده صعودی است که کمتر از مقدار \widehat{p} باشد و r_λ شماره‌ی $\widehat{p}_\lambda^{(*)}$ در

که $E[\mu_C(X)]$ امید ریاضی مقادیر تابع عضویت C به ازای Y و $E[\mu_S(X)]$ امید ریاضی مقادیر تابع عضویت S به ازای X می‌باشد. مقدار احتمال به وقوع پیوستن C به شرط S را نیز می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$P(C|S) = \frac{P(C \cap S)}{P(S)} = \frac{E[\mu_{C \cap S}(Y, X)]}{E[\mu_S(X)]} = \frac{E[\mu_C(Y) \wedge \mu_S(X)]}{E[\mu_S(X)]} \neq 0. \quad (14)$$

که عبارت \wedge می‌تواند تابع حداقل و یا ضرب جبری باشد. احتمال وقوع $P(C)$ با \widehat{p} و احتمال وقوع $P(C|S)$ با \widehat{p}_λ نشان داده می‌شود:

$$\widehat{p} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_C(Y(k)) = \frac{m}{n} \quad (15)$$

$$\widehat{p}_\lambda = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_C(Y(k)) \wedge \mu_S(X(k)))}{\sum_{k=1}^n (\mu_S(X(k)))} = \frac{m_\lambda}{n_\lambda} \quad (16)$$

در ادامه برای هر دو پارامتر \widehat{p} و \widehat{p}_λ متعلق به هر قانون، باند اطمینان محاسبه می‌گردد. در روش BFRT از n نمونه داده $d_k = (x_1(k), x_2(k), \dots, y(k))$ که به صورت $(d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_n)$ نمایش داده می‌شود، تعداد w نمونه تصادفی با اندازه n (نمونه‌های بوت‌استرپ نامیده می‌شوند) تهیه می‌گردد؛ توصیه شده است که اندازه w حداقل ۱۰۰۰ باشد (Krone and Taeger, 2001)

$$\begin{aligned} & (d_1^{*(1)}, d_2^{*(1)}, \dots, d_n^{*(1)}) \\ & (d_1^{*(2)}, d_2^{*(2)}, \dots, d_n^{*(2)}) \\ & \vdots \\ & (d_1^{*(w)}, d_2^{*(w)}, \dots, d_n^{*(w)}) \end{aligned} \quad (17)$$

برای هر نمونه بوت‌استرپ دو پارامتر \widehat{p} و \widehat{p}_λ مطابق زیر محاسبه می‌گردد:

$$\begin{aligned} & \widehat{p}^{*(1)}, \widehat{p}_\lambda^{*(1)} \\ & \widehat{p}^{*(2)}, \widehat{p}_\lambda^{*(2)} \\ & \vdots \\ & \widehat{p}^{*(w)}, \widehat{p}_\lambda^{*(w)} \end{aligned} \quad (18)$$

در ادامه برای محاسبه باند بالا و پایین پارامترهای \widehat{p} و \widehat{p}_λ ، ابتدا مقادیر $\widehat{p}^{*(1)}, \dots, \widehat{p}^{*(w)}$ و $\widehat{p}_\lambda^{*(1)}, \dots, \widehat{p}_\lambda^{*(w)}$ به طور صعودی مرتب شده و باند اطمینان یک طرفه از روابط زیر محاسبه می‌گردد:

$$p^u = \widehat{p}^{*(g_u)}$$

۳- نتایج و بحث

در این بخش نتایج حاصل از تعیین توابع عضویت با استفاده از روش SOFM و نیز قوانین حاصل از روش BFRT و FAM آورده شده و پس از بررسی کارشناسی، قوانین نهایی انتخاب شده است که شرح آن در ادامه ارائه خواهد شد.

۳-۱- تعیین توابع عضویت

با استفاده از روش طبقه‌بندی SOFM برای هر یک از متغیرهای ورودی (حجم آورد سالانه رودخانه و موجودی حجم مخزن در ابتدای هر سال) مشخصات تابع عضویت مربوط (کم، متوسط و زیاد) تعیین شد. برای متغیر خروجی نیز (حجم آب خروجی از مخزن) به همین ترتیب عمل شد با این تفاوت که بنا به توصیه‌های محققین (Von Altrock, 1995; Czogala and Leski, 2000) تابع ۵ (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) در نظر گرفته شد. مقدار میانگین و حد بالا و پایین باند اطمینان ۹۵٪ هر طبقه، برحسب میلیون متر مکعب برای تعریف تابع عضویت هر یک از متغیرهای ورودی و خروجی نیز در جدول ۱ آمده است که فواصل اطمینان طبقات در باند اطمینان ۹۵٪ از لحاظ آماری همپوشانی ندارند. شکل ۴ توابع عضویت تعریف شده برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل را نشان می‌دهد.

۳-۲- تعیین قوانین فازی

همان‌گونه که بیان شد برای استخراج قوانین از دو روش FAM و BFRT استفاده گردید. قوانین تولیدی از دو منظر بررسی شدند، اول آنکه تناقض بین آنها وجود نداشته باشد. یعنی بخش "اگر" آنها به "آنگاه" متفاوت منجر نشده باشد. همچنین قانون حاصل نیز با فیزیک فرآیند تطبیق داشته باشد.

نمونه بوت‌استرپ مرتب شده صعودی است که کمتر از \hat{p}_λ است. همچنین پارامترهای شتاب به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\hat{a} = \frac{\sum_{l=1}^n (\hat{p}^{(-)} - \hat{p}^{(l)})^3}{6 \times [\sum_{l=1}^n (\hat{p}^{(-)} - \hat{p}^{(l)})^2]^{3/2}} \quad (33)$$

$$\hat{a}_\lambda = \frac{\sum_{l=1}^n (\hat{p}_\lambda^{(-)} - \hat{p}_\lambda^{(l)})^3}{6 \times [\sum_{l=1}^n (\hat{p}_\lambda^{(-)} - \hat{p}_\lambda^{(l)})^2]^{3/2}} \quad (34)$$

در روابط بالا $\hat{p}^{(l)}$ و $\hat{p}_\lambda^{(l)}$ تخمین‌گرهایی بر پایه l امین نمونه بوت‌استرپ $(d_1, \dots, d_{l-1}, d_{l+1}, \dots, d_n)$ می‌باشند و $\hat{p}^{(-)}$ و $\hat{p}_\lambda^{(-)}$ برابر هستند با:

$$\hat{p}^{(-)} := \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \hat{p}^l \quad (35)$$

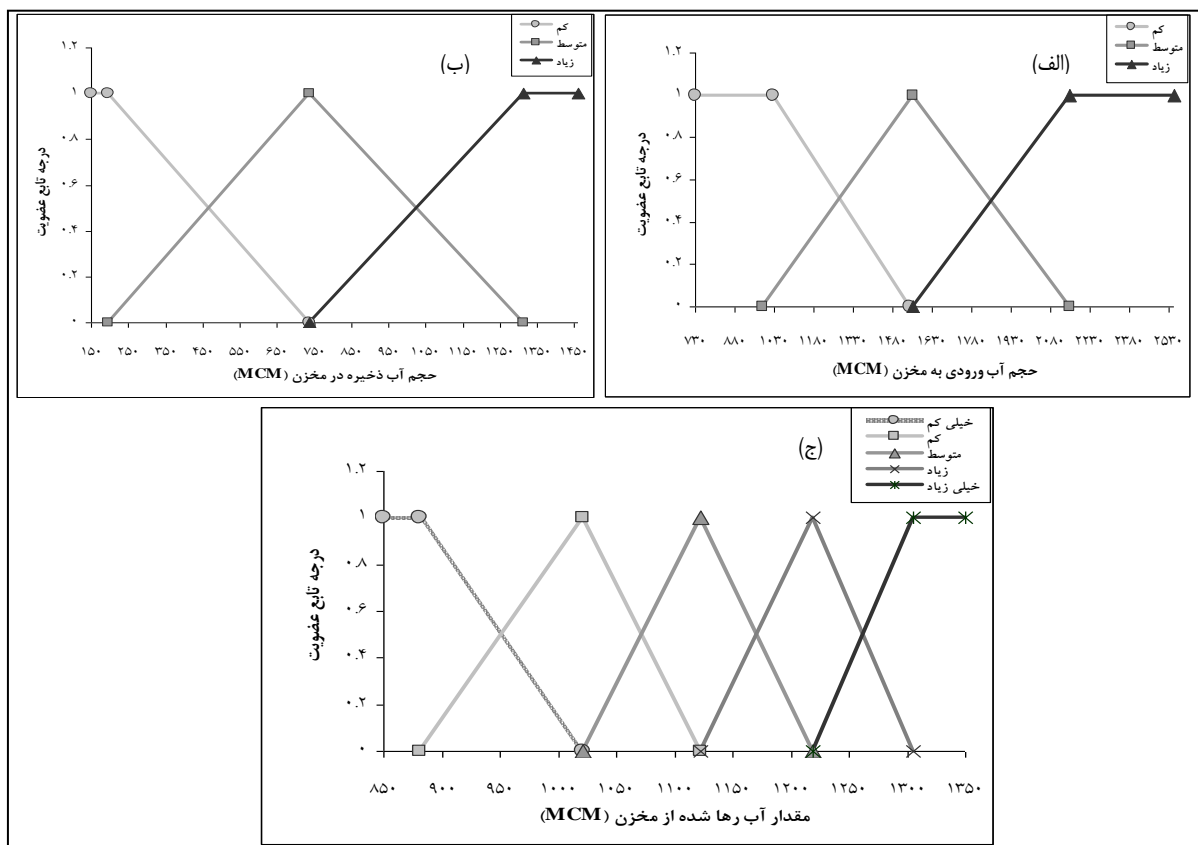
$$\hat{p}_\lambda^{(-)} := \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \hat{p}_\lambda^l \quad (36)$$

برای ارزیابی مناسب بودن هر قانون، میزان همپوشانی باند اطمینان دو پارامتر \hat{p} و \hat{p}_λ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در صورتی که مقدار \hat{p} از \hat{p}_λ کوچکتر باشد، باید باند اطمینان بالای \hat{p} از باند اطمینان پایین \hat{p}_λ کوچکتر باشد. به عبارت دیگر دو مقدار P^o و P_λ^o با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند تا قانون مورد نظر رد نشود. در مقابل اگر مقدار \hat{p} از \hat{p}_λ بزرگتر باشد، قانون مورد بررسی مردود است، مگر آنکه مقدار باند اطمینان پایین \hat{p} (P^o) از باند اطمینان بالای \hat{p}_λ (P_λ^o) بزرگتر باشد، در این صورت حالت منفی قانون قابل قبول است:

$$\text{If } S \text{ Then Not } C \quad (37)$$

جدول ۱- مقدار میانگین و حد بالا و پایین باند اطمینان ۹۵٪ هر طبقه (برحسب MCM) برای تعریف توابع عضویت

متغیرها	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
میانگین ورودی به مخزن حدبالا	-	۹۸۷ ۸۷۵/۲ ۱۰۹۹/۰	۱۵۵۵ ۱۵۱۶/۳ ۱۵۹۳/۱	۲۱۵۲ ۱۸۹۸/۳ ۲۴۰۴/۸	-
میانگین ذخیره مخزن حدبالا	-	۱۹۶ ۱۲۶/۱ ۲۶۵/۸	۷۳۸ ۶۲۹/۹ ۸۴۶/۸	۱۳۱۲ ۱۱۹۰/۶ ۱۴۳۲/۸	-
میانگین حجم آب رها شده حدبالا	۸۸۱ ۸۷۱/۶ ۸۹۱/۱	۱۰۲۱ ۹۹۵/۱ ۱۰۴۷/۷	۱۱۲۲ ۱۰۷۵/۴ ۱۱۶۹/۵	۱۲۱۹ ۱۱۹۸/۵ ۱۲۳۹	۱۳۰۵ ۱۲۸۱/۷ ۱۳۲۷/۸



شکل ۴- توابع عضویت متغیرهای ورودی (حجم آورد رودخانه (الف) و ذخیره مخزن (ب) و خروجی مدل (حجم آب رها شده از مخزن) (ج)).

$$M(B) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x\mu_B(x)dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mu_B(x)dx} \quad (39)$$

که $\mu_B(x)$ تابع عضویت مجموعه فازی B روی متغیر x است.

پس از محاسبه مقدار آب خروجی از مخزن توسط مدل، مقادیر محاسباتی و بهینه‌سازی مقایسه گردید که برای این منظور از دو پارامتر R^2 و $RMSE^2$ استفاده شد. مقدار R^2 برابر با ۰/۶۲ و مقدار پارامتر $RMSE$ برابر با ۱۱۱/۰ بدست آمد (شکل ۵).

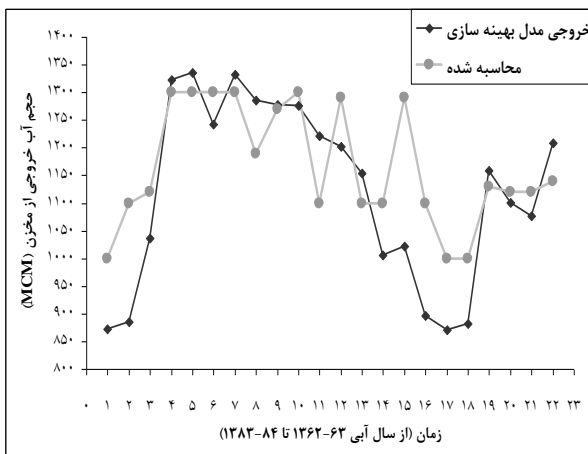
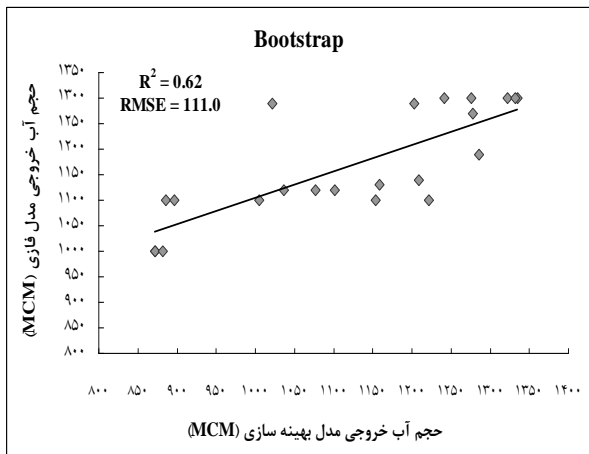
جدول ۲- قوانین بدست آمده از روش BFRT

شماره قانون	حجم آب ورودی به مخزن	ذخیره مخزن	حجم آب رها شده
۱	کم	متوسط	کم
۲	متوسط	کم	متوسط
۳	متوسط	متوسط	خیلی زیاد
۴	زیاد	کم	خیلی زیاد
۵	زیاد	متوسط	خیلی زیاد

روش BFRT با شرحی که آمد، مقدار α برای محاسبه باند اطمینان دو پارامتر \bar{p} و \bar{p} برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است. حد بالا و پایین این دو پارامتر نیز می‌بایست در سطح اطمینان ۹۵٪ با یکدیگر همپوشانی نداشته باشند. لازم به ذکر است که مقدار α در نظر گرفته شده در روش BFRT باید با مقدار α در بررسی همپوشانی طبقات حاصل از روش SOFM، برابر باشد (Chen and Mynett, 2004). بدین ترتیب ۵ قانون بدست آمد که فهرست آنها در جدول ۲ آمده است. در مجموع قوانین توجیه‌پذیر بودند، اما قواعد منفی (رابطه ۳۷) برای مسئله مورد بررسی این تحقیق ایجاد تناقض می‌کردند که از این رو حذف شدند. برای محاسبه خروجی مدل از غیرفازی‌ساز مرکز سطح^{۱۹} استفاده شد:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^I \omega_i v_i M(B_i)}{\sum_{i=1}^I \omega_i v_i} \quad (38)$$

که D مقدار عددی خروجی مدل، ω_i وزن قانون i ام، v_i درجه قانون i ام و $M(B_i)$ برابر است با:



شکل ۵- مقایسه حجم آب خروجی مدل بهینه‌سازی و مدل شده با روش BFRT

بخش آنگاه متفاوتی (حجم آب رها شده، "خیلی زیاد"، "زیاد"، "کم" و "خیلی کم") را ارائه می‌داد (جدول ۳) که از این بین تنها (حجم آب رها شده، "زیاد") پذیرفته شد. قانون ۵ نیز با همین روش ارزیابی شد.

روش FAM: در مرحله بعد با استفاده از روش FAM، این بار ۱۱ قانون استخراج گردید که در جدول ۳ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۶ ملاحظه می‌گردد عملکرد این روش بسیار بهتر بوده به طوری که مقدار R^2 را به ۰/۹۱ ارتقا داده است.

نتایج این ارزیابی و اجرای مدل فازی با قوانین نهایی، در شکل ۷ ارائه شده است که مقادیر R^2 و RMSE را برابر ۰/۸۶ و ۶۳/۴ به همراه داشته است. نتایج داده‌های خروجی در مدل‌سازی جدید، تقریباً از روندی مشابه با داده‌های مشاهده‌ای پیروی کرده و تنها در یک مورد حجم آب خروجی مشاهده‌ای و مدل شده اختلاف زیادی دارند.

اما بررسی قوانین نشان می‌دهد که آنها متناقض و بعضاً توجیه منطقی هم ندارد. برای مثال قوانین ۴، ۵، ۶ و ۷ بخش "اگر" یکسان داشته (حجم آورد رودخانه، "متوسط" و ذخیره مخزن، "زیاد")، اما قسمت "آنگاه" (حجم آب رها شده، "خیلی زیاد"، "زیاد"، "کم" و "خیلی کم") آنها متفاوت است. این مورد در باره قوانین ۹ و ۱۰ نیز صدق می‌کند. همچنین برخی قوانین به مانند قانون ۹ توجیه فیزیکی نیز ندارند.

جدول ۳- قوانین بدست آمده از FAM

شماره قوانین	حجم آب ورودی به مخزن	ذخیره مخزن	حجم آب رها شده
۱	کم	زیاد	خیلی کم
۲	کم	کم	خیلی کم
۳	متوسط	متوسط	خیلی زیاد
۴	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
۵	متوسط	زیاد	زیاد
۶	متوسط	زیاد	کم
۷	متوسط	زیاد	خیلی کم
۸	متوسط	کم	متوسط
۹	زیاد	زیاد	خیلی کم
۱۰	زیاد	زیاد	زیاد
۱۱	زیاد	کم	خیلی زیاد

در این روش هم برای محاسبه خروجی مدل از غیرفازی‌ساز مرکز سطح استفاده شده و در کل مدل حجم آب رها شده از مخزن را بسیار خوب محاسبه می‌کند. مقدار RMSE برابر با ۴۹/۹ بدست آمده و حجم خروجی محاسبه شده و خروجی مدل بهینه‌سازی تقریباً از روند یکسانی پیروی می‌کنند (شکل ۶).

جمع‌بندی قوانین با استفاده از نظر کارشناسی: در این بخش با بررسی قوانین حاصل از روش‌های BFRT، FAM و با ملاحظه مجموعه داده‌های ورودی و خروجی سد، قوانین حاصل از بخش‌های قبل بررسی و قوانین نهایی استخراج گردید که در جدول ۴ نشان داده شده‌اند. قوانین شماره ۱، ۲ و ۳ در هر دو روش مشترک بودند و قوانین ۴ تا ۷ نیز از روش FAM حاصل شده‌اند. در مورد قوانین ۴ و ۵ همان‌گونه که در بخش قبل بیان گردید، FAM قوانینی با بخش "اگر" حجم آورد رودخانه، "متوسط" و ذخیره مخزن، "زیاد" و

۴- نتیجه گیری

تحقیق حاضر تلاشی بود برای بررسی امکان استفاده از روش‌های خودکار برای ساخت توابع عضویت و قوانین فازی که تعیین خروجی سد زاینده‌رود برای بخش کشاورزی به عنوان منطقه مطالعاتی آن در نظر گرفته شد. نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه است:

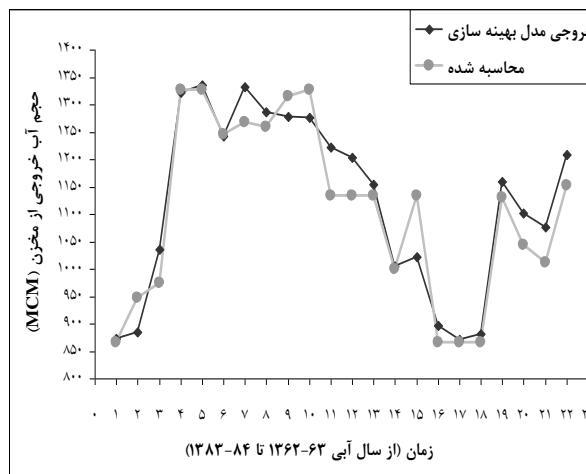
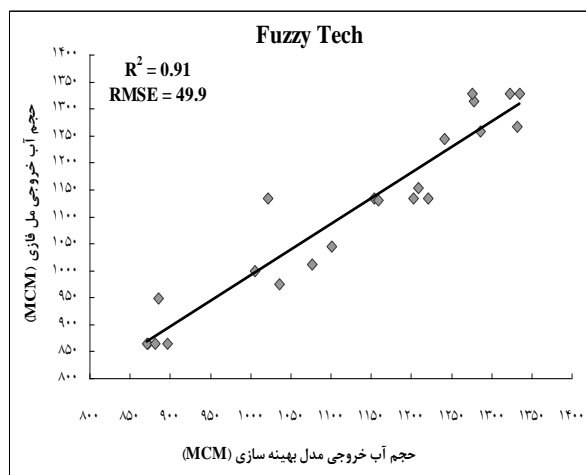
- طبقه‌بندی متغیرهای ورودی و خروجی با استفاده از روش SOFM که توابع عضویت فازی بر اساس آنها تولید شد، نتایج مناسبی را بدنبال داشت که استفاده از آن را قابل توصیه می‌سازد.

- بر قوانین منتج از روش FAM اشکالاتی وارد بود، مانند: تعداد قوانین بالنسبه بالا، عدم توجه فیزیکی و تطابق با مشاهدات برای بعضی از قوانین و تناقض بین آنها، هر چند این مجموعه، عملکرد بسیار بالایی را برای مدل فازی به همراه داشت (همبستگی ۰/۹۱).

می‌توان گفت که این روش از منطق فازی و ایده اصلی که برای آن مد نظر بود فاصله گرفته و بیشتر به یک مدل جعبه سیاه نزدیک می‌گردد.

- قوانین حاصل از روش BFRT مشکلات قوانین FAM را نداشتند، ولی به تنهایی نتوانستند عملکرد مناسبی را در مدل فازی ایجاد نمایند.

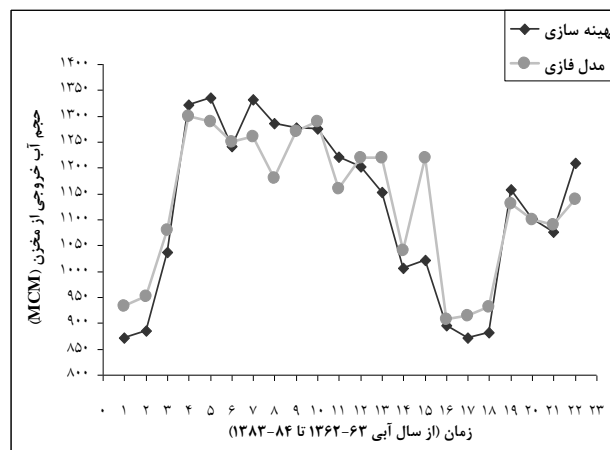
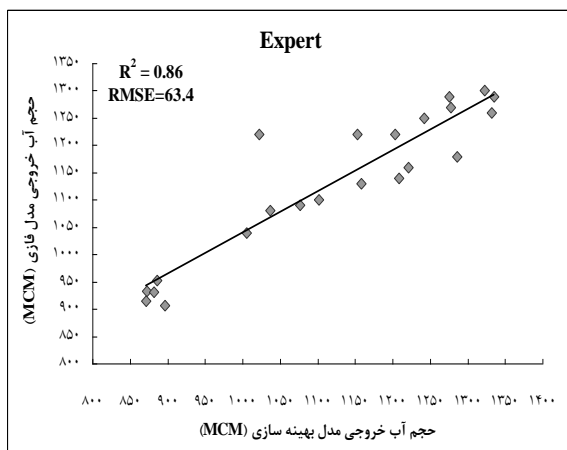
- با ملاحظه قوانین دو روش BFRT و FAM و اعمال نظرات کارشناسی در ارزیابی آنها همراه با مشاهده داده‌های ورودی و خروجی، می‌توان امیدوار بود که قوانینی مناسبی را در حداقل زمان ممکن استخراج نمود مانند نتایج این تحقیق که با هفت قانون پذیرفته شده نتایج مناسبی (ضریب همبستگی ۰/۸۶) بدست آمد.



شکل ۶- مقایسه حجم آب خروجی مدل بهینه‌سازی و مدل شده با FAM

جدول ۴- قوانین بدست آمده از روش کارشناسی

شماره قوانین	حجم آب ورودی به مخزن	ذخیره مخزن	حجم آب رها شده	روش مورد استفاده
۱	متوسط	کم	متوسط	FAM & BFRT
۲	متوسط	متوسط	خیلی زیاد	FAM & BFRT
۳	زیاد	کم	خیلی زیاد	FAM & BFRT
۴	متوسط	زیاد	زیاد	FAM
۵	زیاد	زیاد	زیاد	FAM
۶	کم	زیاد	خیلی کم	FAM
۷	کم	کم	خیلی کم	FAM



شکل ۷- مقایسه حجم آب خروجی مدل بهینه‌سازی و مدل شده با روش کارشناسی

مجله تحقیقات منابع آب ایران، سال اول، شماره ۲، تابستان ۸۴

عراقی‌نژاد، ش. (۱۳۸۴)، "مدیریت منابع آب برپایه تحلیل‌های اقلیمی"، رساله دکتری دانشگاه امیرکبیر.

مقدسی، م.، مرید، س. و عراقی‌نژاد، ش. (۱۳۸۷)، "بهینه‌سازی تخصیص آب در شرایط کم‌آبی با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی غیرخطی، هوش جمعی و الگوریتم ژنتیک (مطالعه موردی: خشکسالی سال‌های ۷۸-۱۳۷۷ تا ۸۰-۱۳۷۹ در شبکه‌های آبیاری حوضه زاینده رود اصفهان)", برای چاپ در مجله تحقیقات منابع آب ایران.

Abe, S. and Lan, M. (1995), "A method for fuzzy rules extraction directly from numerical data and its application to pattern classification", *IEEE Trans. Fuzzy System.* 3, pp. 18-28.

Anonymous. (1999). Fuzzy Tech 5.3, User Manual.

Chen, Q. and Mynett, A.E. (2003), "Integration of data mining techniques with heuristic knowledge in a fuzzy logic modelling of eutrophication in Taihu Lake", *Ecological Modelling.* 162, pp. 55-67.

Chen, Q., and Mynett, A. (2004), "A robust fuzzy logic approach to modeling algae biomass", *Journal of Hydraulic Research.* 42(3): pp. 303-309.

Chen, Q., Mynett, A.E. and Blauw, A.N. (2002), "Fuzzy logic and artificial neural network modelling phaeocystis in the North Sea", In: Falconer, R.A., Lin, B., Harries, E.L. and Wilson, C.A.M.E. (EDS), *Proceeding of Hydroinformatics 2002*, Cardiff, UK, pp. 722-728.

Czogala, E. and Leski, J. (2000), "Fuzzy and neuro-fuzzy intelligence systems", *Physica-Verlag*, SBN: 3-7908-1289-7.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Self Organizing Feature Maps
- 2- Fuzzy Associative Maps
- 3- Bootstrap Fuzzy Relevance Test
- 4- Total Inorganic Nitrogen
- 5- Total Inorganic Phosphorus
- 6- Fuzzy Relevance Test
- 7- Associative Memory
- 8- Particle Swarm Optimization
- 9- Kohonen Maps
- 10- Euclidean Distance
- 11- Link Distance
- 12- Manhattan Distance
- 13- Case Reasoning
- 14- Feature Reasoning
- 15- Neuro-Fuzzy
- 16- Training
- 17- Bias Parameters
- 18- Acceleration Parameters
- 19- Centroid of Area (Center of Gravity)
- 20- Root Mean Square Error

۵- مراجع

جمالی، س.، ابریشم چی، الف. و تجریشی، م. (۱۳۸۴)، "ساخت مدل‌های پیش‌بینی جریان رودخانه و بهره‌برداری از مخازن با استفاده از سیستم استنباط فازی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی شریف.

طوسی، ر.، ل. (۱۳۸۵)، "ارزیابی پروژه‌های انتقال آب بین حوضه‌ای با استفاده از روش فازی؛ مطالعه موردی کارون بزرگ"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تربیت مدرس.

عراقی‌نژاد، ش.، کارآموز، م. (۱۳۸۴)، "پیش‌بینی بلندمدت رواناب با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی"،

- spline networks”, *Journal of computing in civil engineering*. 14(3), pp. 183-189.
- Moghaddasi, M., Morid, S., Araghinejad, S. and Agha Alikhani, M. (2008), “Assessment of irrigation water allocation based on optimization and equitable water reduction approaches to reduce agricultural drought losses: The 1999 drought in the Zayandeh Rud irrigation system (Iran)”, Accepted in *Journal of Irrigation and Drainage*.
- Shrestha, B. P., Duckstein, L., and Stakhiv, E. Z. (1996), “Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation”, *ASCE, Journal of Water Resources Planning and Management*. 122(4): pp. 262-269.
- Von Altrock, C. (1995), *Fuzzy Logic and Neurofuzzy Applications Explained*, Prentice Hall, ISBN: 0-13-368465-2.
- Wang, L. and Mendel, J.M. (1992), “Generating fuzzy rules by learning from examples”, *IEEE Trans. Syst. Man. Cybernet.* 22, pp. 1414–1427.
- Dubrovic, T., Jolma, A., and Turunen, E. (2002), “Fuzzy model for real-time reservoir operation”, *Journal of Water Resources Planning and Management*. 128:1(66) pp. 66-73.
- Filev, D.P. and Yager, R.R. (1994), “Generation of fuzzy rules by mountain clustering”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2, pp. 209–219.
- Halide, H. and Ridd, p. (2000), “Modeling inter-annual variation of a local rainfall data using a fuzzy logic technique”, *International Research Institute for Climate Prediction*, USA, April 2000.
- Kohonen, T. (1982), “Self organized formation of topological correct feature maps”, *Biol. Cybern.* 43, pp. 59–69.
- Kohonen, T. (2001), *Self-Organizing Maps* (2nd edition ed.). Germany: Springer.
- Krone, A. and Taeger, H. (2001), “Data-based fuzzy rule test for fuzzy modelling”, *Fuzzy Sets and Systems*. 123, pp. 343–358.
- Maier, H. R., Sayed, T. and Lence B. J. (2000), “Forecasting cyanobacterial concentrations using B-