

## تعیین قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن با استفاده از شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی (ANFIS)

محمدحسن طرازکار<sup>۱\*</sup>، منصور زیبایی<sup>۱</sup>، غلامرضا سلطانی<sup>۱</sup> و مسعود نوشادی<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۵/۲۳)

### چکیده

امروزه مدیریت منابع آب به‌جای ساخت سیستم‌های جدید عرضه آب، به سمت مدیریت و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های موجود حرکت کرده است. بر این اساس، در این مطالعه قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن در استان فارس، با استفاده از روش‌های مختلف تعیین شد و کاراترین روش انتخاب شد. برای این منظور، ابتدا با استفاده از داده‌های ماهانه یک دوره پانزده ساله (۹۲-۱۳۷۷)، مدل بهره‌برداری بهینه چند هدفه غیر خطی طراحی شد. توابع هدف مدل شامل حداقل‌سازی شاخص کمبود آب در بخش‌های مختلف شامل بخش شهری، صنعت، محیط زیست و کشاورزی در نظر گرفته شد. همچنین به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن، علاوه بر مدل بهره‌برداری بهینه غیر خطی از روش رگرسیونی حداقل مربعات معمولی، سیستم استنتاج فازی و شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی (ANFIS) نیز بهره گرفته شد. به منظور مقایسه روش‌های مختلف از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اعتمادپذیری، حداکثر آسیب‌پذیری، میانگین آسیب‌پذیری، برگشت‌پذیری و پایداری استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد که مدل ANFIS، به دلیل داشتن مقادیر بالای شاخص اعتمادپذیری (۰/۷)، برگشت‌پذیری (۰/۴۲) و مقدار کم شاخص آسیب‌پذیری (۰/۱۳)، دارای بالاترین مقدار شاخص پایداری (۰/۲۶) و بهترین عملکرد است. بر این اساس، می‌توان به‌طور کارا از مدل ANFIS، برای ایجاد قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: منحنی فرمان، سیستم استنتاج فازی، شبکه عصبی فازی، شاخص عملکرد مخزن

۱. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شیراز

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: Tarazkar@shirazu.ac.ir

## مقدمه

سدها یکی از مهم‌ترین منابع تأمین و ذخیره‌سازی آب جهت مصارف شهری، صنعتی، کشاورزی و زیست‌محیطی هستند (۱۰). معمولاً یکی از اولویت‌های اساسی هر سد، بهره‌برداری مناسب و بهینه از مخازن ذخیره است که از طریق کنترل خروجی از مخزن صورت می‌گیرد. میزان رهاسازی آب از مخزن در هر ارتفاع یا حجم ذخیره آب در مخزن، با استفاده از یک راهنما، جدول و یا نمودار صورت می‌گیرد. این جداول و یا نمودارها به‌عنوان دستورالعمل‌های بهره‌برداری از مخازن سدها استفاده می‌شوند و نشان دهنده قواعد بهره‌برداری از مخزن بوده و به منحنی فرمان سد معروف هستند (۶).

وجود عدم قطعیت و عدم دقت در متغیرهای بهره‌برداری از مخازن سدها که در پیچیدگی فرایند بهره‌برداری نقش عمده‌ای دارند و با تئوری‌های احتمال قابل تحلیل نیستند، موجب شده تا از روش‌های مختلفی در برخورد با این مشکلات استفاده شود. یکی از روش‌های در نظر گرفتن عدم قطعیت در مدل‌های بهره‌برداری از مخزن که در مطالعات اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است، تئوری مجموعه‌های فازی است (۴). بعد از گسترش تئوری فازی، محققان سیستم‌های منابع آب دریافتند که این منطق ابزار مناسبی برای مدل‌سازی بهره‌برداری از مخزن است. از این رو بهینه‌سازی فازی (Fuzzy Optimization)، رگرسیون فازی و سیستم استنتاج فازی (Fuzzy Inference System) در بسیاری از مطالعات مختلف در زمینه بهره‌برداری و استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن، مورد استفاده قرار گرفتند (۳).

نتایج مطالعات مختلف نشان داده است که سیستم استنتاج فازی به دلیل لحاظ کردن عدم قطعیت در مدل‌های بهره‌برداری از مخزن، دارای عملکرد بهتری در استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن بوده و با دنیای واقعی تطابق بیشتری دارند. نتایج مطلوب و توانایی بالای سیستم استنتاج فازی در زمینه بهره‌برداری از مخزن و استخراج قواعد بهره‌برداری از آن موجب شده تا ترکیب سیستم استنتاج فازی با شبکه

عصبی مصنوعی (Artificial Neural Network) تحت عنوان شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی (Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)) در مطالعات مختلف در زمینه بهره‌برداری بهینه و استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن سد، مورد استفاده قرار گیرد. مدل ANFIS، از الگوریتم یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور نگاشت غیر خطی بین فضای ورودی و خروجی استفاده می‌کند و در قالب یک سیستم، هر دو مزیت زبانی سیستم استنتاج فازی و توانایی یادگیری شبکه‌های عصبی را دارا است و لذا توانایی بالاتری در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی دارد (۴). موسوی و همکاران روش رگرسیون خطی، رگرسیون فازی و مدل ANFIS را در استخراج منحنی فرمان سد دز مقایسه کردند (۲۱). نتایج مطالعه نشان داد در بلند مدت، مدل ANFIS نسبت به سایر روش‌ها عملکرد بهتری در استخراج قوانین بهره‌برداری از مخزن سد مذکور دارد. مهتا و جین با استفاده از مدل ANFIS قواعد بهره‌برداری بهینه از یک مخزن چندمنظوره در کشور هند شامل تأمین آب شرب خانگی، آب کشاورزی و نیروی برقابی را طراحی کردند (۱۹). نتایج مطالعه نشان داد که مدل ANFIS توانایی بالایی در استخراج منحنی فرمان سد دارد. صفوی و همکاران منحنی فرمان سد زاینده‌رود را با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی پویا، برنامه‌ریزی پویای فازی، سیستم استنتاج فازی و روش ANFIS استخراج و مقایسه کردند (۲۵). نتایج مطالعه نشان داد که مدل ANFIS عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌ها در استخراج منحنی فرمان سد دارد.

سلطانی و همکاران با توجه به مشکلات کیفی و کمی سد ۱۵ خرداد، سیاست بهره‌برداری بهینه از مخزن سد را با تلفیق مدل‌های شبیه‌سازی کیفی و بهینه‌سازی، تدوین کردند (۷). در این مطالعه از مدل ANFIS برای شبیه‌سازی کیفی مخزن استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد که مدل پیشنهادی دارای کارایی مناسب در کاهش زمان اجرا و بهبود کیفیت آب است. نورانی و همکاران (۹) بهره‌برداری بهینه از سیستم دو مخزنه (سد شهریار

مناسب، تخلیه آب از مخزن سد صورت می‌پذیرد. علاوه بر آن تخلیه در ماه‌های آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند کاملاً وابسته به ریزش‌های جوی است و در صورت وجود ریزش‌های مناسب نیازی به تخلیه آب نیست (۲۹). علاوه بر موارد یاد شده، مهم‌ترین منبع تأمین آب دریاچه بختگان، رودخانه کر است، لذا رهاسازی آب از سد درودزن، تأثیر مهمی در میزان جریان آب رودخانه و در نهایت حجم آب دریاچه بختگان دارد. اما متأسفانه در سال‌های اخیر با توجه به کاهش نزولات جوی و در پی کاهش ورودی آب رودخانه کر به دریاچه بختگان به دلیل کاهش میزان رهاسازی از سدهای احداث شده بر روی رودخانه، ورودی آب دریاچه تنها محدود به سیلاب‌های منطقه شده و در نهایت کاهش سطح آب دریاچه و خشک شدن آن را موجب شده است (۸). در شکل (۱)، نمای شماتیک شبکه آبیاری سد درودزن آورده شده است.

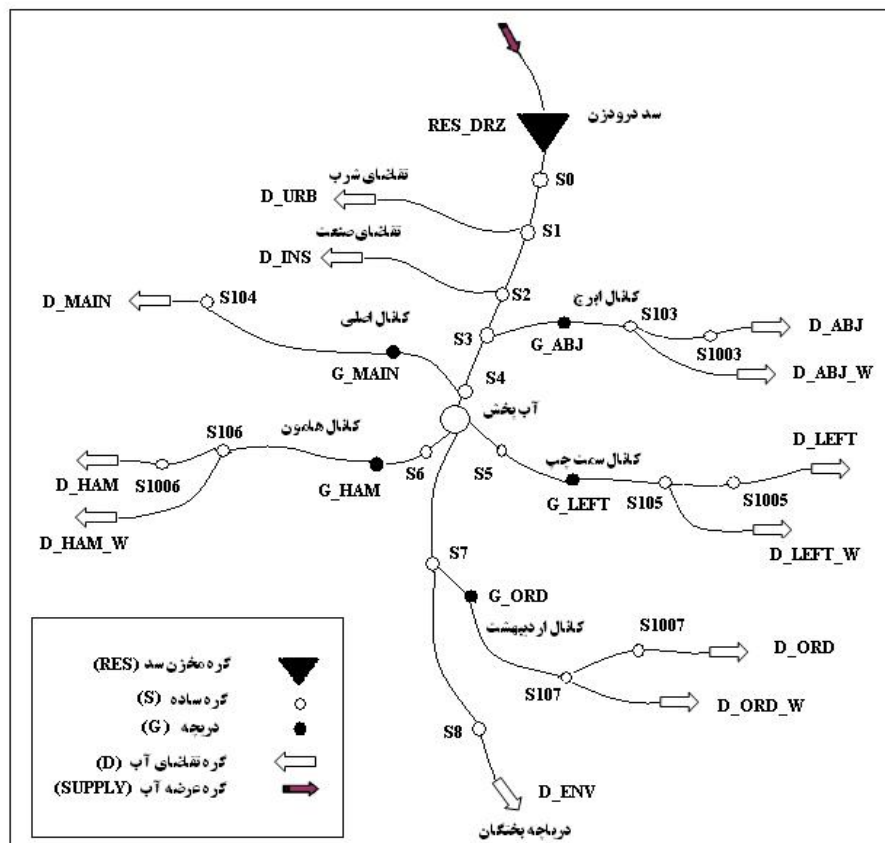
کانال اصلی شبکه آبیاری درودزن از محل خروجی نیروگاه سد آغاز شده و پس از طی مسیری به طول ۲۲ کیلومتر به سازه آب پخش می‌رسد. کانال ابرج و همچنین مصارف شرب و صنعتی نیز قبل از سازه آب پخش، از کانال اصلی منشعب می‌شوند. در محل سازه آب پخش کانال اصلی به سه کانال درجه اول به نام‌های کانال اولیه سمت راست (موسوم به کانال هامون)، کانال سمت چپ و کانال ثانویه سمت چپ (موسوم به اردیبهشت) تقسیم می‌شود. کانال ابرج از جناح چپ کانال اصلی منشعب شده و دارای طولی در حدود پنج کیلومتر است. این کانال ۱۹۳۴ هکتار از اراضی کشاورزی زیردست سد درودزن را تحت پوشش قرار می‌دهد. کانال سمت چپ طولی معادل ۶۷ کیلومتر داشته و در حدود ۲۲۰۹۶ هکتار از اراضی را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. کانال هامون طولی معادل ۳۴ کیلومتر دارد و در حدود ۱۵۹۴۶ هکتار از اراضی را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. کانال اردیبهشت با طولی معادل ۲۲ کیلومتر، ۵۴۳۰ هکتار از اراضی کشاورزی را تحت پوشش خود قرار می‌دهد. کشت غالب منطقه شامل گندم، جو، ذرت و برنج بوده و محصولات دیگری نظیر گوجه‌فرنگی، چغندر قند، کلزا و یونجه

و سد سفیدرود) حوضه آبریز سفیدرود در شمال ایران، با استفاده از مدل برنامه‌ریزی آرمانی با سه هدف مختلف تأمین نیاز آبی پایین‌دست، کنترل سیلاب و استفاده‌های تفریحی، طراحی و سه مدل ایجاد شد. در نهایت برای در نظر گرفتن عدم قطعیت، از مدل ANFIS استفاده شد. نتایج مطالعه نشان داد از سه مدل طراحی شده، مدل دوم که وزن یکسانی را برای اهداف مدل در نظر می‌گیرد، دارای عملکرد بهتری است و اساس طراحی ANFIS قرار گرفت. همچنین مدل ANFIS با تابع عضویت گوسی و پنج تابع عضویت برای هر ورودی، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

در این مطالعه به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن، ابتدا مدل بهره‌برداری بهینه چند هدفه غیر خطی به منظور به دست آوردن حجم بهینه خروجی از مخزن سد درودزن به صورت ماهانه، برای یک دوره پانزده ساله (۱۳۹۲-۱۳۷۷) و شامل ۱۸۰ ماه، طراحی شد. اهداف مدل مذکور به ترتیب شامل حداقل سازی شاخص کمبود آب برای بخش شهری، صنعتی، نیاز زیست محیطی و بخش کشاورزی است. برای حل مدل نیز از روش لکسیکوگرافیک (lexicographic) استفاده شد. پس از بهینه‌سازی میزان رهاسازی آب از مخزن سد درودزن، حجم بهینه آب خروجی از مخزن به‌عنوان متغیر ورودی در روش‌های مختلف استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن، مورد استفاده قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

سد مخزنی درودزن در ۱۰۰ کیلومتری شمال غرب شیراز و بر روی رودخانه کر احداث شده است. منطقه مورد مطالعه بین طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه و ۵۳ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه شمالی واقع شده است. در طول سال، اراضی پایین‌دست سد هم برای کشت‌های پاییزه و هم برای کشت‌های بهاره مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۵) و معمولاً از ۱۵ فروردین لغایت ۱۵ مهر هر سال در صورت وجود شرایط



شکل ۱. نمای شماتیک شبکه آبیاری سد درودزن

حد اقل سازی شاخص کمبود (Shortage Index (SI)) به عنوان هدف، در مدل بهره‌برداری از مخزن سد استفاده شده است (۱۱). این شاخص توسط گروه مهندسان ارتش ایالات متحده آمریکا ارائه شده و به صورت رابطه (۱) است:

$$\text{Min SI} = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t - D_t}{D_t} \right)^2 \quad [1]$$

در رابطه (۱)،  $R_t$ : خروجی از مخزن در زمان  $t$  و  $D_t$ : مجموع نیاز پایین دست سد در دوره  $t$  می‌باشد، که به صورت برونزا و از قبل تعیین شده و  $T$ : تعداد دوره مورد بررسی است. در این مطالعه اهداف مورد استفاده به صورت رابطه (۲) است:

$$\text{Min } Z_1 = \text{SI}_1 = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t^{\text{urb}} - D_t^{\text{urb}}}{D_t^{\text{urb}}} \right)^2$$

$$\text{Min } Z_2 = \text{SI}_2 = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t^{\text{ind}} - D_t^{\text{ind}}}{D_t^{\text{ind}}} \right)^2$$

$$\text{Min } Z_3 = \text{SI}_3 = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t^{\text{env}} - D_t^{\text{env}}}{D_t^{\text{env}}} \right)^2$$

نیز در منطقه مطالعاتی کشت می‌شود (۸).

همان‌طور که بیان شد، طی سه دهه اخیر مسأله بهره‌برداری از مخزن سد های آبی همواره مورد توجه محققین و برنامه‌ریزان در این زمینه بوده است. اما علیرغم پیشرفت‌های اخیر در زمینه علوم کامپیوتری و همچنین روش‌های حل مسأله، استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن سد همچنان مورد چالش باقی مانده است (۱) و مدل‌های متنوعی در این زمینه ارائه شده است. اما در تمام مدل‌های بهره‌برداری بهینه از مخزن سد متغیر تصمیم جهت بهینه‌سازی، متوسط میزان خروجی یا میزان آب رها شده از مخزن است.

با توجه به اینکه، مدل‌های بهینه‌سازی ارائه شده جهت بهره‌برداری از مخازن سدها در حالت کلی تخلیه مطلوب را به صورت تابعی از ذخیره مخزن و جریان ورودی به مخزن نشان می‌دهند، تابع هدف در این مدل‌ها می‌تواند متفاوت باشد، اما در بیشتر مطالعات انجام شده در زمینه بهره‌برداری از مخزن سد،

که در تمام مراحل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن باید موازنه جرمی بین مقادیر ورودی و خروجی و حجم ذخیره مخزن برقرار باشد. این محدودیت برای مخزن سد درودزن، به صورت رابطه (۳) آورده شده است:

$$S(nl, t) = S(nl, t-1) + \sum_{n \in in} In(nl, t) - \sum_{n \in out} R(nl, t) - \sum_{n \in out} Evp(nl, t) - \sum_{n \in out} spill(nl, t) \quad [3]$$

در رابطه (۳)،  $S(nl, t)$ : حجم آب موجود در مخزن در دوره  $t$  ام،  $S(nl, t-1)$ : حجم آب مخزن در دوره  $t-1$  ام،  $In(nl, t)$ : حجم آب وارد شده به مخزن در دوره  $t$  ام،  $R(nl, t)$ : حجم آب رهاشده از مخزن در دوره  $t$  ام،  $Evp(nl, t)$ : میزان تبخیر از سطح مخزن در دوره  $t$  ام و  $Spill(nl, t)$ : میزان سرریز از مخزن سد در دوره  $t$  ام است. در این مطالعه، براساس متوسط حجم آب موجود در مخزن سد درودزن در شهریورماه طی دوره مورد بررسی، حجم اولیه ۳۷۵ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. سایر متغیرهای رابطه (۳)، به صورت ماهانه و از سازمان آب گردآوری شد، همچنین محدودیت دیگری تحت عنوان، محدودیت حجم ذخیره مخزن به مدل اعمال شد. این محدودیت بیان می‌کند که در تمام مراحل بهینه‌سازی و بهره‌برداری از مخزن، حجم ذخیره هر مخزن می‌بایست بین مقادیر حداقل و حداکثر آن مخزن قرار داشته باشد. بر این اساس، محدودیت حجم مخزن به صورت رابطه (۴) منظور شد:

$$S_{Min}(nl, t) \leq S(nl, t) \leq S_{Max}(nl, t) \quad [4]$$

در رابطه (۴)،  $S_{Max}(nl, t)$  و  $S_{Min}(nl, t)$  به ترتیب حجم حداقل (حجم مرده) و حجم حداکثر مخزن هستند. در این مطالعه حجم مرده و حجم حداکثر مخزن سد درودزن به ترتیب ۳۳۳ و ۹۳۳ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. محدودیت سوم، محدودیت خروجی مخزن است. براساس این محدودیت، میزان خروجی بهینه‌سازی شده در هر دوره بایستی علاوه بر اینکه مثبت است، برابر یا کمتر از میزان نیاز پایین دست سد باشد و به صورت رابطه (۵) بیان شده است:

$$0 \leq R(nl, t) \leq D(nl, t) \quad [5]$$

$$\text{Min } Z_f = SI_f = \sum_{t=1}^T \left( \frac{R_t^{agr} - D_t^{agr}}{D_t^{agr}} \right)^2 \quad [2]$$

در رابطه (۲)،  $R_t^{agr}$ ،  $R_t^{urb}$ ،  $R_t^{ind}$  و  $R_t^{env}$  به ترتیب، حجم آب رهاشده برای مصارف شهری، صنعتی، زیست محیطی و کشاورزی در دوره  $t$  ام و  $D_t^{agr}$ ،  $D_t^{urb}$ ،  $D_t^{ind}$  و  $D_t^{env}$  به ترتیب، آب مورد نیاز مصارف شهری، بخش صنعت، زیست محیطی و بخش کشاورزی در دوره  $t$  ام هستند. لازم به ذکر است نیاز مصارف شهری ( $D^{urb}$ ) از سد درودزن با توجه به راه‌اندازی خط دوم انتقال آب به شهر شیراز، ۹۶ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شد. به دلیل محدودیت خط انتقال، نیاز آبی صنعت ( $D^{ind}$ ) ۱۸ میلیون مترمکعب در سال است، همچنین با توجه به حق‌آبه دریاچه بختگان، نیاز زیست محیطی ( $D^{env}$ ) دریاچه ۴۸ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. در خصوص نیاز آب کشاورزی ( $D^{agr}$ )، براساس متوسط الگوی کشت منطقه در سال‌های قبل و برآورد نیاز آبی محصولات، ۴۹۰ میلیون مترمکعب در سال فرض شد که این مقدار با توجه به نیاز آبی محصولات در هر ماه متفاوت است.

برای حل مدل چند هدفه از روش لکسیکوگرافیک استفاده شد. از این روش جهت حل مدل‌های چند هدفه در مواردی استفاده می‌شود که توابع هدف قابلیت رتبه‌بندی داشته باشند. به بیان دیگر اگر مدلی دارای چندین هدف مختلف است که می‌بایست این اهداف به ترتیب تأمین شوند، می‌توان از یک الگوریتم رتبه‌ای، تحت عنوان روش لکسیکوگرافی استفاده کرد (۲۳).

در هر مدل بهینه‌سازی، مقادیر کلیه متغیرهای تصمیم جهت حداکثر یا حداقل سازی تابع هدف تحت مجموعه‌ای از قیود محاسبه می‌شوند. بر این اساس، محدودیت‌های مختلفی در مطالعات مختلف بهره‌برداری از مخزن در نظر گرفته شده‌اند. در مطالعه حاضر محدودیت‌هایی به صورت زیر بر مدل بهره‌برداری بهینه اعمال شد. محدودیت اول معادله پیوستگی (Continuity Equation) مخزن سد است که براساس قانون بقای جرم (Continuity Equation) بوده و بدین مفهوم است

در مخزن در نظر گرفته می‌شود (۲ و ۲۶). برای این منظور حجم ذخیره و آورد به صورت توابع درجه دوم در نظر گرفته می‌شوند. در این مطالعه، منحنی‌های مختلف فرمان، با درجه‌های توانی مختلف از جریان ورودی و حجم ذخیره مخزن، برآورد و مورد مقایسه قرار گرفتند. در حقیقت میزان رهاسازی بهینه که از مدل بهره‌برداری چند هدفه استخراج شده است، در هر دوره با یک سری روابط خطی و غیر خطی، به حجم ذخیره مخزن در دوره قبل و آورد رودخانه در دوره فعلی وابسته است، همچنین برای مقایسه مدل‌های مختلف می‌توان از آماره  $F$ ، ضریب تعیین تعدیل شده  $(\bar{R}^2)$ ، معیارهای تشخیصی آکائیک (ACI) و شوارتز بیزین (SBC) و خطای پیش‌بینی (Root of Mean Square Error) (RMSE) استفاده کرد.

**به‌کارگیری سیستم استنتاج فازی در بهره‌برداری از مخزن سد**  
سیاست بهره‌برداری از مخزن سد، به‌عنوان مجموعه داده‌های ورودی-خروجی جهت واسنجی قواعد فازی در سیستم استنتاج فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۳۲). مدل استنتاج فازی به صورت قواعد اگر-آنگاه فازی ارتباط میان قسمت مقدمه شامل جریان ورودی به مخزن، حجم آب موجود در مخزن و نیاز پایین‌دست را با قسمت نتیجه شامل میزان رهاسازی از مخزن، برقرار می‌کند (۵). بنابراین تصمیم‌گیری در دو مرحله صورت می‌پذیرد. در مرحله اول متغیرهای ورودی و خروجی شامل جریان ورودی به مخزن، حجم آب موجود در مخزن، نیاز پایین‌دست و حجم آب رهاسازی از مخزن (به‌عنوان خروجی مدل) با استفاده از یکی از انواع توابع عضویت مانند توابع مثلثی و یا دوزنقه‌ای، فازی‌سازی می‌شوند. در مرحله دوم متغیرها جهت ایجاد قواعد فازی و با استفاده از عملگر اشتراک "و"، "یا" و "بدون" با وزنی برابر در تمامی قواعد برای متغیرهای ورودی ترکیب می‌شوند.

دو نوع سیستم استنتاج فازی برای نگاشت ورودی به خروجی وجود دارد که شامل مدل فازی سوگینو (Sugeno Fuzzy Model)

محدودیت چهارم محدودیت ظرفیت کانال‌ها است و بیان می‌کند که میزان رهاسازی در هر دوره، نباید از ظرفیت کانال‌های پایین‌دست سد، بیشتر باشد. این محدودیت را می‌توان به صورت رابطه (۶) نشان داد:

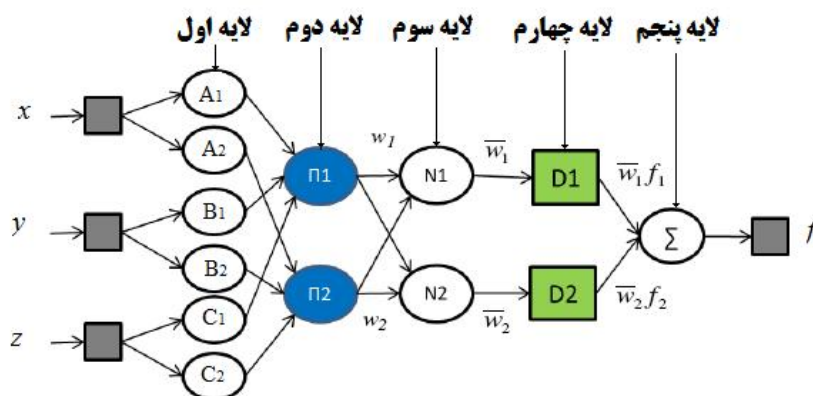
$$R(nl, t) \leq C_{Max} \quad [6]$$

در رابطه (۶)  $C_{Max}$ : حداکثر ظرفیت کانال سد است. با توجه به دبی کانال اصلی سد درودزن (۴۱ مترمکعب در ثانیه)، حداکثر میزان رهاسازی از سد برابر با ۱۰۶ میلیون مترمکعب در هر ماه در نظر گرفته شد. محدودیت دیگر که به صورت رابطه (۶) بیان شده است و به محدودیت یا فرض پایداری (Cary Over) معروف است. این محدودیت تضمین می‌کند که حجم مخزن در دوره اول و در انتهای دوره آخر برابر خواهند بود.

$$S_{Final}(nl, t) = S_{First}(nl, 1) \quad [7]$$

در رابطه (۷)،  $S_{First}(nl, 1)$ : حجم مخزن در ابتدای دوره مورد بررسی ( $t=1$ ) و همان حجم اولیه مخزن بوده و  $S_{Final}(nl, t)$ : حجم مخزن در انتهای دوره مورد بررسی است. با توجه به حجم اولیه، حجم مخزن در انتهای دوره نیز می‌بایست برابر با ۳۷۵ میلیون مترمکعب باشد. در اغلب مخازن دنیا، منحنی فرمان به‌عنوان الگو و قواعد بهره‌برداری از مخازن سدها، تعیین‌کننده میزان رهاسازی آب از مخزن است. این منحنی‌ها میزان تغییرات مقادیر بهینه آب تأمینی یا تحویلی سیستم به‌ازای وضعیت‌های مختلف ذخیره در ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد و می‌تواند شامل چند منحنی با شرایط مختلف باشد (۳۱). یکی از ساده‌ترین روش‌های استنباط قوانین بهره‌برداری از مخازن، روش رگرسیونی است (۳).

معمول‌ترین شکل‌های منحنی فرمان عبارتند از منحنی فرمان خطی که میزان رهاسازی به صورت خطی، با شیب کمتر از یک به آب موجود که حجم ذخیره یا آورد رودخانه و یا مجموع هر دو است، وابسته می‌شود و معمولاً در سدهای چند منظوره استفاده می‌شود (۱۴، ۱۶ و ۲۲). منحنی فرمان غیر خطی که معمولاً به صورت درجه دو بیان شده و میزان رهاسازی به صورت غیر خطی تابعی از حجم آب موجود



شکل ۲. ساختار شماتیک شبکه ANFIS

همان‌طورکه در شکل (۲) مشاهده می‌شود، سه ورودی سیستم  $x$ ،  $y$  و  $z$  بوده (آورد رودخانه به مخزن سد، حجم آب موجود در مخزن و تقاضای آب در پایین دست سد) و خروجی آن (حجم آب رها شده از مخزن سد) با  $f$  نشان داده شده است و دو قانون این سیستم نیز به صورت روابط (۸) و (۹) قابل بیان هستند (۲۷):

$$\text{If } x \text{ is } A_1 \ \& \ y \text{ is } B_1 \ \& \ z \text{ is } C_1 \quad [8]$$

$$\text{then } f = p_1x + q_1y + k_1z + r_1$$

$$\text{If } x \text{ is } A_2 \ \& \ y \text{ is } B_2 \ \& \ z \text{ is } C_2 \quad [9]$$

$$\text{then } f = p_2x + q_2y + k_2z + r_2$$

با توجه به شکل (۲)، ساختار شبکه ANFIS از پنج لایه تشکیل شده است. لایه اول، لایه ورودی بوده و هر گره در این لایه معادل یک مجموعه فازی و خروجی هر گره برابر درجه عضویت متغیر ورودی در این مجموعه فازی است. پارامترهای هر گره، تعیین کننده شکل تابع عضویت مجموعه فازی آن گره هستند. توابع مختلفی شامل مثلثی، ذوزنقه‌ای، زنگوله‌ای و غیره در طراحی شبکه‌های عصبی - فازی مورد استفاده قرار می‌گیرند (۲۸).

در لایه دوم مقادیر ورودی به هر گره در هم ضرب می‌شوند و حاصل که وزن قانون‌ها است، به دست می‌آید. هر گره در لایه دوم درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند و به صورت رابطه (۱۰) نشان داده می‌شود:

$$Q_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad [10]$$

و ممدانی (Mamdani Fuzzy Model) است. مدل استنتاج فازی ممدانی، به صورت اصول فازی با خروجی برخوردار می‌کند. بدین مفهوم که تابع عضویت خروجی نیز مجموعه فازی است (۱۸). در مقابل، در سیستم‌های فازی سوگینو توابع عضویت خروجی خطی و ثابت است. به بیان ساده در روش سوگینو، غیر فازی کردن خروجی به دلیل خطی و ثابت بودن با روش‌های محدودی امکان‌پذیر است (۳۰) و لذا در این مطالعه از سیستم استنتاج فازی ممدانی استفاده شد.

### شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی (ANFIS)

این نوع شبکه‌ها که از تلفیق شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی ایجاد می‌شوند، قوانین فازی را دسته‌بندی و آن را فرا می‌گیرند و منطق فازی نیز پارامترهای نامعین شبکه عصبی مصنوعی را استنتاج می‌کند، لذا در نهایت شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی یا به اختصار ANFIS، از توانایی بالاتری در مقایسه با شبکه‌های عصبی مصنوعی و منطق فازی برخوردار هستند. در واقع سیستم ANFIS پیاده‌سازی یک سیستم فازی نوع سوگینو به صورت یک ساختار شبکه‌ای جلو رونده هستند (۱۳). در شکل (۲) یک سیستم فازی سوگینو با دو ورودی، یک خروجی و دو قانون نشان داده شده است.

استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی و شبیه‌سازی جهت بهره‌برداری از مخازن است. به‌طور معمول، مخازن ذخیره سد برای بهره‌برداری در شرایط نرمال یعنی تأمین تقاضای آب پایین‌دست سد تحت شرایط معمولی، طراحی می‌شوند. اما به‌دلیل بروز دوره‌های خشکسالی شدیدتر از دوره خشکسالی مشاهداتی و یا افزایش تقاضای آب در پایین‌دست، سد بیشتر از پیش‌بینی‌های اولیه طرح، سیستم در مدت بهره‌برداری دچار شکست می‌شود (۹). به‌منظور ارزیابی سیستم تحت شرایط شکست و همچنین ارزیابی قواعد مختلف بهره‌برداری از مخازن، از معیارهای عملکرد مخزن استفاده می‌شود که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

#### شاخص برگشت‌پذیری (Resilience)

توانایی برگشت سیستم از حالت شکست (F) به وضعیت مطلوب و رضایت‌بخش (S)، برگشت‌پذیری نامیده می‌شود. این شاخص بیانگر آن است که یک سیستم با چه سرعتی از وضعیت شکست به وضعیت رضایت‌بخش برمی‌گردد (۱۲):

$$\beta = \frac{\text{Prob}\{X_t \in F \& X_{t+1} \in S\}}{\text{prob}\{X_t \in F\}} \quad [15]$$

#### شاخص اعتمادپذیری (Reliability)

فراوانی نسبی عدم شکست در مقادیر هدف را اعتمادپذیری می‌نامند. به بیان دیگر اعتمادپذیری یا قابلیت اطمینان یعنی احتمال اینکه شکستی در بهره‌برداری از سیستم در مدت زمان مشخص رخ ندهد و بیان می‌کند که سیستم چند بار با عدم شکست روبه‌رو بوده است و به‌صورت رابطه (۱۶) بیان می‌شود:

$$\alpha = \text{Prob}\{X \in S\} \quad [16]$$

مقدار بیشتر این شاخص، نشان‌دهنده برتری قاعده بهره‌برداری از مخزن است.

#### شاخص آسیب‌پذیری (Vulnerability)

مقدار و شدت شکست را آسیب‌پذیری می‌نامند (۲۵). در این

در رابطه (۱۰)،  $\mu_{Ai}(x)$  درجه عضویت  $x$  در مجموعه  $A_i$  و  $\mu_{Bi}(y)$  درجه عضویت  $y$  در مجموعه  $B_i$  است. در لایه سوم، گره‌ها نقش مهمی ایفا می‌کنند. گره‌های این لایه، وزن نسبی قوانین را تعیین می‌کنند. با استفاده از رابطه (۱۱) می‌توان وزن نسبی گره  $i$  ام را نسبت به کل وزن این لایه محاسبه نمود:

$$Q_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2 \quad [11]$$

در رابطه (۱۱)،  $\bar{w}_i$  درجه فعالیت وزنی قانون  $i$  ام است. در لایه چهارم نیز خروجی هر گره به‌صورت رابطه (۱۲) است:

$$Q_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i \cdot (p_i x + q_i y + k_i z + r_i), \quad i = 1, 2 \quad [12]$$

در رابطه (۱۲)  $\{p_i, q_i, r_i\}$  پارامترهای تطبیقی این لایه هستند که به نام پارامترهای نتیجه یا متعاقب (Consequent Parameters) نیز خوانده می‌شوند.

لایه پنجم، لایه خروجی ANFIS است. هر گره در این لایه مقدار خروجی نهایی را به‌صورت رابطه (۱۳) محاسبه می‌کند. در این لایه تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی‌ها است و به‌همین منظور در بیشتر مطالعات برابر با یک است. در این لایه همچنین می‌توان از دو نوع تابع عضویت خطی (Linear) و ثابت (Constant) استفاده کرد:

$$Q_i^5 = \sum \bar{w}_i f_i = \frac{\sum w_i f_i}{\sum w_i} \quad [13]$$

در نهایت می‌توان خروجی کل را به‌صورت ترکیب خطی از پارامترهای نتیجه مطابق رابطه (۱۴) بیان کرد:

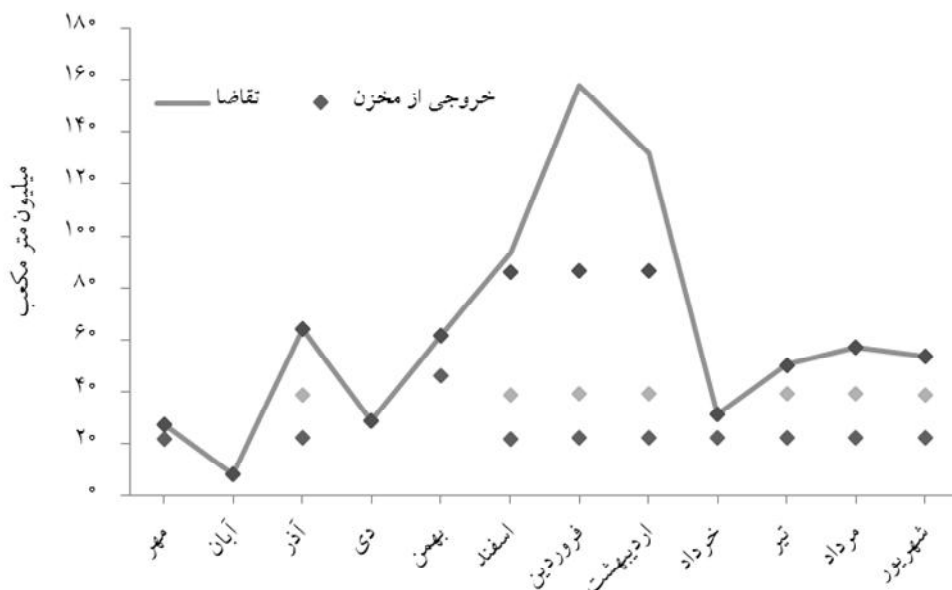
$$f = \sum \bar{w}_i f_i = (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1 z) k_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2 z) k_2 + (\bar{w}_2) r_2$$

معمولاً برای آموزش یک شبکه ANFIS دو الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا (Back Propagation) و روش هیبرید (Hybrid) مرسوم است که در این مطالعه هر دو روش مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن با هم مقایسه شدند.

#### معیارهای ارزیابی قواعد بهره‌برداری

ارزیابی سیاست‌های بهره‌برداری آخرین و مهم‌ترین گام در





شکل ۳. نمودار نیاز ماهانه و حجم آب رها شده از مخزن براساس مدل بهره‌برداری بهینه

$$S = \beta\alpha(1-\lambda) \quad [20]$$

در رابطه (۲۰)،  $S$ : شاخص پایداری،  $\beta$ : شاخص برگشت‌پذیری،  $\alpha$ : شاخص اعتمادپذیری و  $\lambda$ : شاخص آسیب‌پذیری است. مقدار بیشتر این شاخص، نشان‌دهنده برتری قاعده بهره‌برداری از مخزن است (۲۵).

### نتایج

قبل از استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن، به‌منظور تعیین میزان بهینه خروجی از سد، ابتدا میزان رهاسازی آب از مخزن سد درودزن براساس مدل بهره‌برداری چند هدفه غیر خطی بهینه‌یابی شد. در شکل (۳)، نیاز ماهانه و حجم آب رها شده از مخزن، براساس مدل بهره‌برداری بهینه آورده شده است.

همان‌طورکه از نمودار فوق مشخص است، مدل بهره‌برداری بهینه تنها در برخی از ماه‌های سال کل نیاز آبی پایین‌دست سد را تأمین می‌کند. برای نمونه، در مهر، خرداد، تیر، مرداد و شهریورماه، کل نیاز آبی تأمین می‌شود، اما در برخی از ماه‌های سال از جمله اسفند، فروردین و اردیبهشت، نیاز آبی به‌طور کامل تأمین نمی‌شود. لازم به ذکر است در

مطالعه از دو شاخص آسیب‌پذیری حداکثر و آسیب‌پذیری متوسط مطابق روابط ۱۷، ۱۸ و ۱۹ استفاده شد (۲۰):

$$\lambda_{Max} = \text{Max}(\lambda_{Max t}) \quad t = 1, 2, \dots, m \quad [17]$$

$$\lambda_{Max t} = [\text{Max}(D_t - R_{ti}), i = 1, 2, \dots, T] / D_t \quad [18]$$

$$\lambda_{Avg} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_{Max t}}{m} \quad [19]$$

در روابط (۱۷) تا (۱۹)،  $\lambda_{Max}$ : آسیب‌پذیری حداکثر در طول دوره برنامه‌ریزی،  $\lambda_{Max t}$ : آسیب‌پذیری حداکثر در ماه  $t$  که مقدار آن بین صفر و یک است،  $\lambda_{Avg}$ : آسیب‌پذیری متوسط،  $T$ : تعداد کل سال‌های شبیه‌سازی،  $m$ : تعداد ماه‌های سال و برابر با ۱۲ و  $i$ : تعداد سال است. این معیار مقدار بین صفر و یک دارد و مقدار کمتر آن حاکی از برتری قاعده بهره‌برداری نسبت به سایر قواعد است (۲۵).

### شاخص پایداری (Sustainability)

شاخص پایداری ترکیبی از سه شاخص برگشت‌پذیری، اعتمادپذیری و آسیب‌پذیری است که به‌صورت رابطه (۲۰) بیان می‌شود (۱۷):

جدول ۱. قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن با استفاده از روش رگرسیونی

مدل	ضرایب					آماره‌های تشخیص				
	$\alpha$	$\ln_t$	$\ln_t^2$	$S_{t-1}$	$S_{t-1}^2$	AIC	SBC	$\bar{R}^2$	F	RMSE
۱	۰/۴۴***	-	-	-	-	۱۰/۳۵	۱۰/۳۹	۰/۳۷	۱۰۹/۸۱***	۴۳/۳۶
۲	۱۲/۷۴***	۰/۰۸۹***	-۰/۰۰۱***	-	-	۱۰/۲۷	۱۰/۳۳	۰/۴۲	۶۸/۰۱***	۴۰/۵۰
۳	۹۰/۸۴***	-	-	-۰/۶۶***	-	۱۰/۷۶	۱۰/۷۹	۰/۰۶	۱۳/۸۹***	۵۱/۹۶
۴	۱۳۲/۹***	-	-	-۰/۲۶۳***	۰/۰۰۰۲**	۱۰/۷۴	۱۰/۷۹	۰/۰۹	۱۰/۲۸***	۵۱/۰۶
۵	۳۳/۴۱***	۰/۴۳۲***	-	-۰/۰۱	-	۱۰/۳۶	۱۰/۴۲۵	۰/۳۷	۸۴/۵۸***	۴۲/۳۹

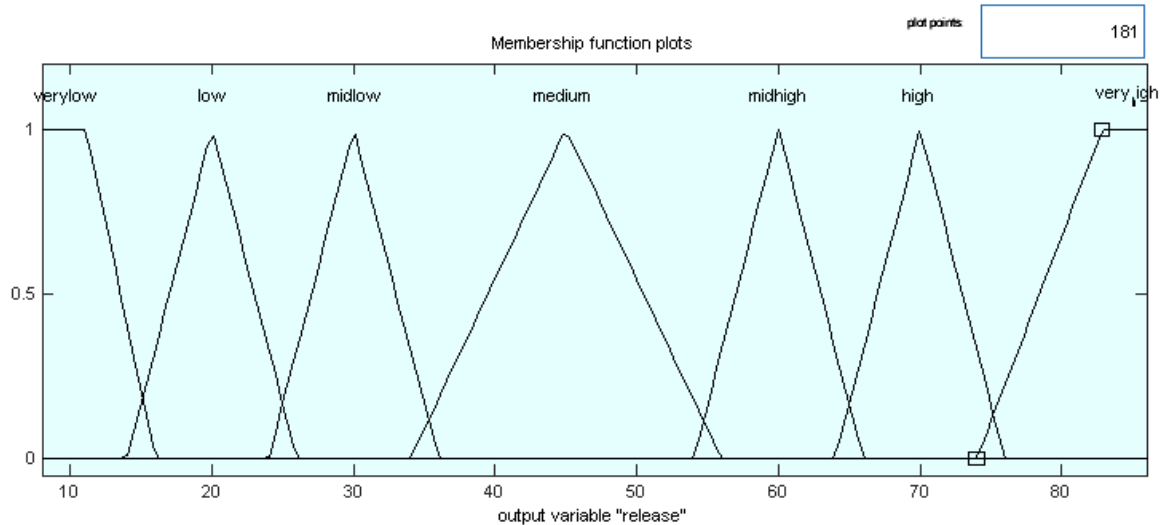
\*\*\*، \*\*، \* : به ترتیب معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۹، ۹۵ و ۹۰ درصد

در خصوص سیستم استنتاج فازی، براساس نتایج مدل بهره‌برداری چند هدفه غیر خطی از سد درودزن، به پیروی از مطالعه صفوی و همکاران (۲۵)، ورودی مدل شامل آورد رودخانه به مخزن سد، حجم آب موجود در مخزن و تقاضای آب در پایین دست سد و نتیجه مدل نیز حجم آب رها شده از مخزن سد، در نظر گرفته شد. برای متغیرهای ورودی آورد رودخانه و حجم مخزن در دوره مورد بررسی (۱۸۰ ماه) پنج تابع عضویت و برای متغیر نتیجه (حجم آب خروجی از مخزن)، هفت تابع عضویت در نظر گرفته شد. حداکثر و حداقل مقدار هر متغیر به عنوان حد بالا و پایین توابع عضویت "بسیار کم" و "بسیار زیاد" در نظر گرفته شد. برای متغیرهای ورودی شامل آورد رودخانه و حجم مخزن نیز، پنج تابع عضویت شامل "بسیار کم"، "بسیار زیاد"، "کم"، "زیاد" و "متوسط" و برای متغیر نتیجه (خروجی از مخزن)، هفت تابع عضویت شامل "بسیار کم"، "بسیار زیاد"، "کم"، "زیاد"، "نسبتاً زیاد"، "نسبتاً کم" و "متوسط" در نظر گرفته شد. شکل (۴)، توابع عضویت را در خصوص متغیر نتیجه تحت شرایط نرمال نشان می‌دهد. در خصوص تقاضای پایین دست سد، سه تابع عضویت شامل "کم"، "زیاد" و "متوسط" در نظر گرفته شد. برای توابع عضویت "کم" و "زیاد"، از تابع عضویت دوزنقه‌ای و برای تابع عضویت "متوسط" از تابع مثلثی استفاده شد.

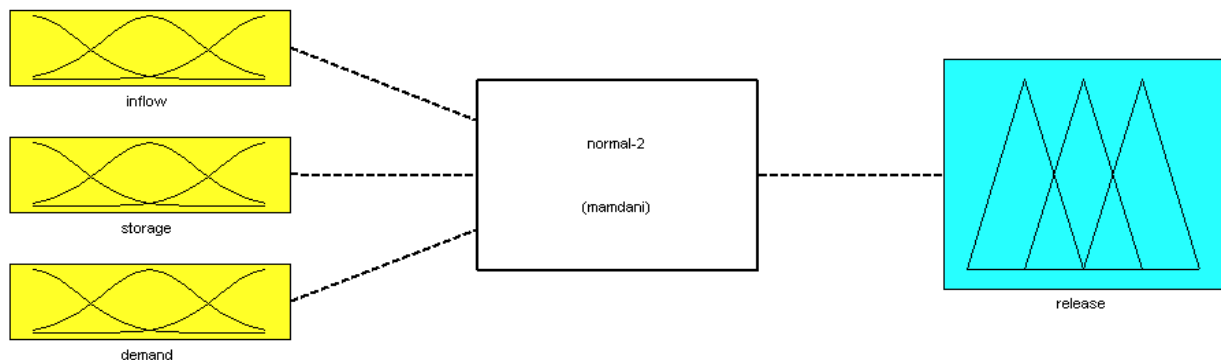
در این مطالعه برای دسته‌بندی توابع مذکور از روش گسسته تکرار مساوی استفاده شد (۳۳)، همچنین برای غیر فازی کردن داده‌ها، از روش مرکز ثقل استفاده شد. با بررسی

مجموع ۷۵ درصد از نیازآبی پایین دست بر اساس مدل بهره‌برداری بهینه از مخزن سد، تأمین می‌شود. با این حال به دلیل آنکه تقاضای آب شهری و صنعت در مدل بهینه در اولویت قرار دارند، نیاز آبی این دو بخش در تمام ماه‌های سال به طور کامل تأمین شده است. در ادامه براساس نتایج مدل بهینه‌یابی، قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن با استفاده از روش رگرسیونی استخراج شد که نتایج آن در جدول (۱) آورده شده است.

با توجه به نتایج جدول (۱)، مدل شماره دو به دلیل معنی‌داری تمام ضرایب، آماره F و بالابودن ضریب تعیین تعدیل شده ( $\bar{R}^2 = 0/42$ ) در مقایسه با سایر مدل‌ها و همچنین پایین تر بودن مقدار خطای آن در پیش‌بینی (Root of Mean Square Error (RMSE))، به عنوان منحنی فرمان سد درودزن، انتخاب شد، همچنین معیارهای تشخیصی آکائیک (ACI) و شوارتز بیزین (SBC) برای مدل دوم دارای کمترین مقدار بوده و تأیید کننده برتری مدل دوم نسبت به سایر مدل‌های رگرسیونی است. لذا مدل دوم به عنوان قاعده بهره‌برداری از سد درودزن تحت شرایط نرمال به روش رگرسیونی انتخاب شد. در این مدل، میزان رهاسازی آب از مخزن سد، تابعی از ورودی به مخزن و توان دوم ورودی به مخزن در همان دوره است. شاخص اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، متوسط آسیب‌پذیری و پایداری مدل دو در روش رگرسیونی به ترتیب برابر با ۰/۶۵، ۰/۴۳، ۰/۳۱ و ۰/۱۹ است.



شکل ۴. توابع عضویت خروجی از مخزن سد درودزن



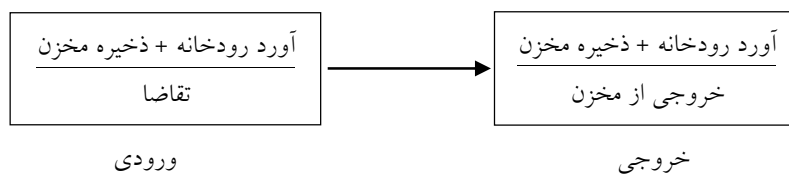
شکل ۵. نمای کلی ساختار منطق فازی مدل دوم

طراحی شد. در این سیستم ورودی و خروجی که ترکیبی از حجم مخزن، آورد رودخانه، تقاضای پایین‌دست و خروجی از مخزن است، به صورت شکل (۶) است.

در این مطالعه حداکثر تعداد تکرارها برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. مقایسه مدل‌های مختلف ANFIS نشان داد که از میان انواع سیستم‌های طراحی شده، ANFIS با یک ورودی و یک خروجی و تابع زنگوله‌ای در ورودی و تابع خطی در خروجی دارای بهترین عملکرد در بهره‌برداری از مخزن سد درودزن است. لازم به ذکر است که در این مطالعه برای هر ماه، یک مدل ANFIS طراحی شد. از مجموع داده‌های ۱۵ ساله موجود ۸۰ درصد برای آموزش و ۲۰ درصد دیگر برای

نتایج مدل بهره‌برداری بهینه مبتنی بر مدل بهره‌برداری غیر خطی چند هدفه، ۴۸ قاعده برای ۱۸۰ ماه (دوره ۱۵ ساله) مورد بررسی، به کار گرفته شد. در شکل (۵)، نمای کلی ساختار منطق فازی مورد استفاده در این مطالعه آورده شده است.

در این مطالعه به منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن تحت، علاوه بر روش‌های فوق، از شبکه عصبی تطبیق‌پذیر مبتنی بر سیستم استنتاج فازی (ANFIS) نیز استفاده شد. شبکه مذکور نیز با استفاده از روش پس‌انتشار خطا آموزش داده شد. به منظور بررسی دقیق‌تر، شبکه‌های مختلفی با ورودی‌های متفاوت طراحی شدند. همچنین با پیروی از مطالعه صفوی و همکاران (۲۵)، سیستم با یک ورودی و یک خروجی



شکل ۶. ورودی و خروجی ANFIS

شاخص بین مدل‌های مختلف به‌جز بهره‌برداری فعلی، بسیار اندک است.

براساس شاخص حداکثر آسیب‌پذیری که در ستون چهارم جدول (۲) آورده شده است، مدل ANFIS نسبت به سایر مدل‌ها از عملکرد بهتری برخوردار بوده است و دارای کمترین مقدار است. پس از مدل فوق، مدل بهره‌برداری چندهدفه در رتبه بعد قرار دارد و ضعیف‌ترین عملکرد مربوط به مدل بهره‌برداری فعلی است، همچنین شاخص متوسط آسیب‌پذیری، که در ستون پنجم جدول (۲) آورده شده است، نشان می‌دهد که مدل بهره‌برداری چند هدفه به‌طور متوسط دارای بهترین عملکرد است و مدل ANFIS در رتبه دوم از نظر متوسط آسیب‌پذیری قرار دارد.

با توجه به نتایج متفاوت حاصل از شاخص‌های مختلف، از شاخص پایداری استفاده شد، زیرا این شاخص ترکیبی از شاخص‌های قبل بوده و در برگیرنده تمام شاخص‌های مورد بررسی است (۱۷ و ۲۵) و شاخص پایداری نشان دهنده برتری مدل ANFIS در مقایسه با سایر مدل‌ها است.

### نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از داده‌های ماهانه یک دوره پانزده ساله، ابتدا یک مدل بهره‌برداری بهینه چند هدفه غیرخطی طراحی شد. توابع هدف مدل شامل حداقل‌سازی شاخص کمبود آب در بخش‌های مختلف از جمله بخش شهری، صنعتی، زیست‌محیطی و کشاورزی در نظر گرفته شد. در ادامه با استفاده از مدل بهره‌برداری بهینه، حجم خروجی از مخزن و حجم ذخیره مخزن به‌دست آمد تا به‌عنوان ورودی سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار گیرد. به‌منظور استخراج قواعد بهره‌برداری از

آزمایش داده‌ها مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین برای طراحی، آموزش و آزمایش ANFIS، بسته نرم‌افزاری Matlab مورد استفاده قرار گرفت.

به‌منظور تحلیل و ارزیابی کارایی مدل‌های ارائه شده در تعیین قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن تحت شرایط آب‌وهوایی نرمال، نتایج این مدل‌ها مقایسه و توانایی آنها نسبت به یکدیگر سنجیده شدند. برای این منظور از شاخص‌های اعتمادپذیری، برگشت‌پذیری، حداکثر آسیب‌پذیری، متوسط آسیب‌پذیری، پایداری و شاخص مجذور شکست استفاده شد که نتایج آن در جدول (۲) آورده شده است.

معیار اعتمادپذیری که در ستون دوم جدول (۲) آورده شده است، نشان می‌دهد مدل بهره‌برداری چند هدفه فازی دارای بیشترین مقدار بوده (۰/۷۴) و از اعتمادپذیری بالایی نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است. مدل ANFIS نیز با مقدار اعتمادپذیری معادل با ۰/۷، در رتبه دوم قرار دارد، همچنین مدل بهره‌برداری فعلی دارای کمترین میزان شاخص اعتمادپذیری (۰/۴۳) است و از نظر اعتمادپذیری، ضعیف‌ترین عملکرد را دارد.

شاخص برگشت‌پذیری که در ستون سوم جدول (۲) آورده شده است، نشان می‌دهد که مدل بهره‌برداری چند هدفه نسبت به سایر مدل‌ها از توانایی بالاتری در برگشت از حالت شکست به حالت عدم شکست داشته و دارای بهترین عملکرد است، زیرا مقدار این شاخص در مدل مذکور، ۰/۴۶ بوده و بیشتر از سایر مدل‌های بهره‌برداری است. مدل بهره‌برداری چند هدفه فازی و روش رگرسیونی، از نظر برگشت‌پذیری در رتبه‌های بعدی قرار دارند، همچنین مدل بهره‌برداری فعلی دارای کمترین مقدار شاخص برگشت‌پذیری (۰/۱۶) است. البته تفاوت این

جدول ۲. نتایج ارزیابی مدل‌های بهره‌برداری از مخزن سد درودزن

مدل	شاخص	اعتمادپذیری	برگشت‌پذیری	حداکثر آسیب‌پذیری	متوسط آسیب‌پذیری	پایداری
بهره‌برداری فعلی	۰/۴۳	۰/۱۶	۰/۹۹	۰/۶۱	۰/۰۲	
بهره‌برداری چند هدفه	۰/۰/۵۷	۰/۴۶	۰/۶۳	۰/۱۰	۰/۲۳	
چند هدفه فازی	۰/۷۴	۰/۴۵	۰/۸۸	۰/۳۵	۰/۲۱	
روش رگرسیونی	۰/۶۵	۰/۴۳	۰/۸۱	۰/۳۱	۰/۱۹	
ANFIS	۰/۷۰	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۱۳	۰/۲۶	

روش‌های مختلف نیز از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل شاخص اعتمادپذیری، شاخص حداکثر آسیب‌پذیری، شاخص میانگین آسیب‌پذیری، شاخص برگشت‌پذیری و شاخص پایداری استفاده شد.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد که براساس شاخص‌های فوق، مدل ANFIS دارای بهترین عملکرد بوده و روش مناسبی برای ساخت قواعد بهره‌برداری از مخزن سد درودزن است. این نتیجه با نتایج مطالعات مشابه از جمله پانینگرهای و موجودمدار (۲۴)، موسوی و همکاران (۲۱)، مهتا و جین (۱۹)، صفوی و همکاران (۲۵)، سلطانی و همکاران (۷)، چکرایبی (۴) و نورانی و همکاران (۹) تطابق دارد. لازم به ذکر است که مدل بهره‌برداری فعلی، دارای کمترین مقدار برای شاخص پایداری (۰/۰۲) است. مقدار به دست آمده، نشان دهنده مبین این موضوع است که در حال حاضر بهره‌برداری از مخزن سد درودزن نامناسب بوده و نیازمند بازنگری و مدیریت جدید است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در زمینه مدیریت منابع آبی، با استفاده از مدل تخصیص پیشنهادی، نسبت به رهاسازی آب از سد درودزن جهت مصارف مختلف اقدام کنند.

مخزن علاوه بر مدل بهره‌برداری بهینه غیرخطی از سیستم استنتاج فازی، روش رگرسیونی در قالب پنچ مدل مجزا و مدل ANFIS بهره گرفته شد.

از میان مدل‌های مختلف رگرسیونی، مدل درجه دوم که در آن میزان رهاسازی آب از مخزن سد، تابعی از ورودی به مخزن و توان دوم ورودی به مخزن در همان دوره است، به عنوان برترین مدل انتخاب شد که با نتایج مطالعات مختلف از سیرینیواس و فیلیپوس (۲۶) و بلوری یزدلی و همکاران (۲) تطابق دارد. در مدل بهره‌برداری فازی مبتنی بر نتایج مدل بهره‌برداری چند هدفه غیرخطی از سد درودزن، به پیروی از مطالعه صفوی و همکاران، ورودی مدل شامل آورد رودخانه به مخزن سد، حجم آب موجود در مخزن، تقاضای آب در پایین دست سد و نتیجه مدل نیز حجم آب رها شده از مخزن سد، در نظر گرفته شد. علاوه بر روش‌های فوق، مدل ANFIS نیز در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. مقایسه مدل‌های مختلف ANFIS نشان داد که از میان انواع سیستم‌های طراحی شده، ANFIS با یک ورودی و یک خروجی و تابع زنگوله‌ای در ورودی و تابع خطی در خروجی، دارای بهترین عملکرد در بهره‌برداری از مخزن سد درودزن است. به منظور مقایسه

### منابع مورد استفاده

- برهانی داریان، ع. و الف. م. مرادی، ۱۳۸۹. الگوریتم مورچگان پیوسته در بهینه سازی بهره‌برداری از سیستم چند مخزنی، مطالعه موردی: مخازن حوزه کرخه، مجله آب و فاضلاب ۴: ۹۱-۸۱.
- بلوری یزدلی، ی. ا. فلاح مهدی پور و ا. بزرگ حداد. ۱۳۸۷. استخراج منحنی فرمان سد دز براساس سیاست جیره‌بندی، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. تهران.

۳. جمالی، س.، ا. ابریشم‌چی و م. تجرشی. ۱۳۸۶. ساخت مدل پیش‌بینی جریان رودخانه و بهره‌برداری از مخزن سد زاینده رود با استفاده از سیستم استنباط فازی، *مجله آب و فاضلاب* ۶۴: ۳۴-۲۵.
۴. چکرای، ا. ۱۳۸۹. بهره‌برداری بهینه از مخزن سد با دیدگاه تلفیقی آب سطحی و زیر زمینی با استفاده از تکنیک‌های فازی، پایان نامه کارشناسی ارشد، مهندسی عمران- آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان.
۵. حسین پور طهرانی، م.، ب. قهرمان، ک. داوری، و ح. انصاری. ۱۳۹۰. بهره‌برداری از مخزن سد با استفاده از سیستم استنتاج فازی خوشه‌بندی (مطالعه موردی: سد ایلانجق)، *مجله پژوهش آب و خاک* ۱۴: ۱۲۴-۱۰۳.
۶. ساعی، و.، م. منتصری و پ. فتحی. ۱۳۸۸. روش ماتریس احتمالی در تعیین منحنی فرمان بهره‌برداری مخازن سدها و مقایسه آن با روش SPA، *مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی* ۶۹: ۲۳۰-۲۲۱.
۷. سلطانی، ف.، ر. کراچیان و م. کارآموز. ۱۳۸۸. بهره‌برداری کمی-کیفی از مخازن سدها با کاربرد مدل‌های استنتاج تطبیقی فازی-عصبی (Anfis) و مدل بهینه سازی الگوریتم ژنتیک، *مجله علمی پژوهشی شریف* ۵۱: ۱۰-۳.
۸. طرازکار، م.، م. زیبایی و غ. سلطانی. ۱۳۹۵. بهره‌برداری بهینه از مخزن سد درودزن با تاکید بر بهره‌وری آب کشاورزی، *فصلنامه اقتصاد کشاورزی و توسعه* ۹۶: ۵۵-۲۵.
۹. نورانی، و.، ن. ابوالواسط و ک. صالحی. ۱۳۹۱. ترکیب مدل برنامه ریزی آرمانی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در بهره‌برداری بهینه چند هدفه از یک سیستم دو مخزنی، *تحقیقات منابع آب* ۲: ۱۱-۱.
۱۰. نوشادی، م. و م. ع. صادق نژاد. ۱۳۸۸. اندازه‌گیری و شبیه‌سازی نیتروژن نیتراتی و ارتوفسفات در مخزن سد درودزن به وسیله مدل های HEC-5Q و WASP7، *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران* ۷: ۵۴-۴۳.
11. Chang, F. J., L.Chen and L. C. Chang. 2005. Optimizing the reservoir operating rule curves by genetic algorithms, *Hydrological Processes* 19: 2277-2289.
12. Hashimoto, T., J. R. Stedinger and D. P. Loucks. 1982. Reliability, esilience, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation, *Water Resources Research* 18: 14 - 20.
13. Jang, J. R. and C. Sun. 1993. Predicting chaotic time series with fuzzy if-then rules, *In: Proceeding of the IEEE Conference on Fuzzy System*, San Francisco. PP: 1079:1084.
14. Karamouz, M., M. H. Houck and J. W. Delleur. 1992. Optimization and simulation of multiple reservoir systems *Journal of Water Resources Planning and Management* 118: 71-81.
15. Keshavarzi, A. and S. H. Nabavi. 2007. Dominant discharge in the Kor river, upstream of Dorodzan dam, Fars Province, Iran, *Trends in Applied Sciences Research* 2: 158-164.
16. Liu, P., SH. Guo, X. Xu and J. Chen. 2011. Derivation of aggregation-based joint operating rule curves for cascade hydropower reservoirs, *Water Resources Management* 25: 3177-3200.
17. Louks, D. P. 1997. Quantifying trend in system sustainability, *Hydrological Sciences Journal* 42:513-530.
18. Mamdani, E. H. 1997. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic system, *Fuzzy Sets and Systems* 26: 1182 -1191.
19. Mehta, R. and S. K. Jain. 2009. Optimal operation of a multi-purpose reservoir using neuro-fuzzy technique, *Water Resources Management* 23: 509-529.
20. Milutin, D. and J. J. Bogardi. 1995. Reliability criteria in the assessment of a multiple - reservoir operational strategy under Mediterranean conditions, *Water resources management under drought or water shortage conditions. In: Proceedings of the EWRA 95 Symposium*, Nicosia, Cyprus.
21. Mousavi, S. J., K. Ponnambalam and F. Karray. 2007. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS, *Fuzz. Fuzzy Sets and Systems* 158: 1064-1082.
22. Nikoo, M. R., A. Karimi, R. Kerachiyani, H. Poorsepahy-Samian and F. Daneshmand. 2013. Rules for optimal operation of reservoir-river-groundwater systems considering water quality targets: application of M5P model, *Water Resources Management* 27:2771-2784.
23. Ojha, A. K. and K. K. Biswal. 2009. Lexicographic multi-objective geometric programming problem, *International Journal of Computer Science Issues* 4(2): 20-24.
24. Panigrahi, D. P. and P. P. Mujumdar. 2000. Reservoir operation modeling with fuzzy logic, *Water Resources Management* 14:89-109.

25. Safavi, H. R., I. Chakraei, A. Kabiri-Samani and M. H. Golmohammadi. 2013. Optimal reservoir operation base on conjunctive use of surface water and groundwater using Neuro-fuzzy system, *Water Resources Management* 27: 4259-4275.
26. Srinivasan, K. and M. C. Philipose. 1996. Evaluation and selection of hedging policies using stochastic reservoir simulation. *Water Resources Management* 10: 163-188.
27. Takagi, T. and M. Sugeno. 1983. Derivation of fuzzy control rules from human operator's control action, *In: Proceeding of the International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium Knowledge Representation and Decision Analysis*, PP. 55-60.
28. Tarazkar, M. H. and A. Esmaili. 2011. A neuro-fuzzy model for Prediction of agricultural commodity price: the case of corn price in Iran. *In: Proceeding of the World Congress of International Fuzzy Systems Association 2011 and Asia Fuzzy Systems Society International Conference 2011, Surabaya-Bali, Indonesia*,
29. Tarazkar, M. H., G. R. Soltani and M. Zibaei. 2015. Optimal operation of multi-reservoir system of Bakhtegan basin, Fars province, Iran. *In: Proceeding of the International Conference on Management, Economics and Accounting, Istanbul, Turkey*.
30. Tilmant, A., P. Fortemps and M. Vanclooster. 2002. Effect of averaging operator in fuzzy optimization of reservoir operation, *Water Resources Management* 16: 1-22.
31. Votruba, L. and V. Broza. 1989. Function in reservoirs, *Water Management in Reservoirs* 33: 343-367.
32. Wang, L., L. Fanf and K. W. Hipel. 2008. Basin-wide cooperative water resource allocation, *Europ. European Journal of Operational Research* 190: 798-817.
33. Yang, Y. and G. I. Web. 2009. A Comparative Study of Discretization Methods for Naive-Bayes Classifiers, *Machine Learning* 74: 39-74.

## Determining the Operating Rules Of Doroodzan Reservoir Using the Adaptive Network Fuzzy Inference System (ANFIS)

M. H. Tarazkar<sup>1\*</sup>, M. Zibaei<sup>1</sup>, G. R. Soltani<sup>1</sup> and M. Noshadi<sup>2</sup>

(Received: December 31-2016 ; Accepted: August 14-2017)

### Abstract

Nowadays, water resource management has been shifted from the construction of new water supply systems to the management and the optimal utilization of the existing ones. In this study, the reservoir operating rules of Doroodzan dam reservoir, located in Fars province, were determined using different methods and the most efficient model was selected. For this purpose, a monthly nonlinear multi-objective optimization model was designed using the monthly data of a fifteen-year period (2002-2017). Objective functions were considered as minimizing water scarcity index in municipal, industrial, environmental and agricultural sectors. In order to determine the operating rule curves of reservoir, in addition to the nonlinear multi-objective optimization model, the methods of ordinary least-squares regression (OLS), fuzzy inference system and adaptive network fuzzy inference system (ANFIS) were used. Also, the reliability, resiliency, vulnerability and sustainability criteria were used to compare the different methods of reservoir performance rules. The results showed that ANFIS model had the higher sustainability criterion (0.26) due to its greater reliability (0.7) and resilience (0.42), as well as its lower vulnerability (0.13), thereby showing the best performance. Therefore, ANFIS model could be effectively used for the creation of Doroodzan reservoir operation rules.

**Keywords:** Rule Curve, Fuzzy Inference System, Neuro-Fuzzy Network, Reservoir Operation Index

---

1. Department of Agricultural Economics, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

2. Department of Water Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: Tarazkar@shirazu.ac.ir