

## Development of Flexible Rule Curve for Reservoir Operation via Fuzzy Approach

S. Haghbin<sup>1</sup> and S. Alimohammadi<sup>2\*</sup>

### Abstract

This study tries to introduce the flexibility to the yield model using fuzzy approach in order to insert the hydrologic uncertainties and improve the system performance. This purpose attained through artificial time series and applying fuzzy membership function which converts the rule curve into rule band in the yield model. To evaluate the improved rule curve, further artificial time series are generated and the results of reservoir's simulating via new model and classic model are compared with each other for downstream demands. Performance criterions have been hired for model evaluation. The results for Karaj Dam reservoir in 50 models shows that the average reliability of the systems for firm yield are equal in both classic and new fuzzy model (approximately 98%). The second yield founds around 82% and 55% in the classic and fuzzy model, respectively. The reliability averages for the third yield were 48% for classic model and 31% for fuzzy model. Vulnerability for classic and fuzzy models achieved 28% and 22%, respectively for the firm yield. It found 98% and 45% for the second yield in classic and fuzzy models. For the third yield this criteria was equal to 100% for all series in the classic model, but 82% in average for the fuzzy model.

**Keywords:** Yield Model, Optimization, Rule Curve, Fuzzy Approach, Reservoir Simulation.

Received: August 9, 2017

Accepted: June 22, 2017

## توسعه منحنی فرمان انعطاف پذیر با رویکرد فازی در بهره برداری از مخزن

سارا حق بین<sup>۱</sup> و سعید علیمحمدی<sup>۲\*</sup>

### چکیده

هدف از انجام این پژوهش، ایجاد خاصیت انعطاف پذیری در مدل آبدهی (Yield Model) به منظور وارد کردن عدم قطعیت هیدرولوژیکی و در نتیجه بهبود عملکرد سیستم می باشد. بدین منظور با ایجاد سری های زمانی مصنوعی و استفاده از مفهوم تابع عضویت فازی، منحنی فرمان در مدل کلاسیک به یک باند منحنی در مدل آبدهی فازی تبدیل می گردد. برای ارزیابی منحنی فرمان توسعه یافته، سری های زمانی دیگری تولید می شوند و با شبیه سازی سیستم مخزن برای تأمین نیازهای پایین دست بر مبنای مدل های آبدهی کلاسیک و فازی نتایج به دست آمده مقایسه می گردند. سپس، برای ارزیابی نتایج مدل ها از معیارهای ارزیابی کارایی سیستم استفاده می شود. نتایج استفاده از مدل ارائه شده برای سیستم تک مخزنی سد کرج در پنجاه شبیه سازی نشان می دهد که در مدل آبدهی کلاسیک و فازی اعتماد پذیری نیاز با اولویت نخست با یکدیگر برابر و به طور متوسط به میزان ۹۸ درصد است. بعلاوه، برای نیاز با اولویت دوم، این معیار در مدل کلاسیک دارای متوسط ۸۱ درصد بوده و در مدل فازی ۵۵ درصد می گردد. برای نیاز با اولویت سوم، متوسط اعتماد پذیری مدل کلاسیک ۴۷ درصد بوده و در مدل فازی ۳۴ درصد می باشد. تغییرات برگشت پذیری نیز کمابیش مانند اعتماد پذیری است. آسیب پذیری برای نیاز با اولویت نخست، در مدل کلاسیک دارای متوسط ۲۸ درصد و در مدل فازی ۲۲ درصد می باشد. بعلاوه، برای نیاز با اولویت دوم، مدل کلاسیک دارای متوسط ۹۸ درصد و مدل فازی به میزان ۴۵ درصد نتیجه می دهد. برای نیاز با اولویت سوم، این معیار در مدل کلاسیک برای همه دوره های شبیه سازی برابر ۱۰۰ درصد بوده ولی در مدل فازی ۸۲ درصد می باشد.

**کلمات کلیدی:** مدل آبدهی، بهینه سازی، منحنی فرمان، رویکرد فازی، شبیه سازی مخزن.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۴/۱

1- Master in Civil Engineering, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Associate Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. Email: s\_alimohammadi@sbu.ac.ir

\*- Corresponding Author

۱- کارشناس ارشد مهندسی عمران- آب، دانشکده مهندسی عمران آب و محیط زیست-

دانشگاه شهید بهشتی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست- دانشگاه شهید بهشتی

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان خرداد ۱۳۹۷ امکان پذیر است.

نسبت به مدل آبدی کامل بوده؛ اما قابلیت دریافت دوره زمانی طولانی‌تری را نسبت به آن داشته و مدت زمان حل مدل نیز کاهش یافته است. (Alimohammadi 1997) به تشریح مدل‌های بهره‌برداری از مخازن چندمنظوره و مزایا و معایب آن‌ها پرداخت و سپس با استفاده از مهم‌ترین این مدل‌ها شامل سیاست بهره‌برداری استاندارد (SOP)<sup>۵</sup>، برنامه‌ریزی پویای قطعی (DP)<sup>۶</sup>، برنامه‌ریزی پویای استوکستیک (SDP)<sup>۷</sup> و مدل آبدی، بهینه‌سازی مخزن سد کرج را انجام داد. نتایج نشان داد مدل‌های آبدی و SDP دارای عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشد. (Sinha et al. 1999) بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن را جهت تأمین نیاز کشاورزی و نیروگاه انجام داد. هدف از این مطالعات تعیین حجم مخزن بهینه برای کاهش هزینه‌های سیستم بوده است. (Dahe and Serivastava 2002) به ارائه مدلی با استفاده از توسعه مدل آبدی برای سیستم‌های چند مخزنی و چند منظوره پرداختند؛ به‌گونه‌ای که با در نظر گرفتن کمبود سالانه مجاز برای سیستم، اعتمادپذیری مطلوب سالانه تعیین می‌گردد. (Mousavi et al. 2004) منطق فازی را به منظور کنترل عدم قطعیت‌ها در مدل SDP مورد استفاده قرار داده و مدل برنامه‌ریزی پویای استوکستیک فازی (FSDP)<sup>۸</sup> را ارائه دادند. برای آزمایش مدل حاصل از یک مدل شبیه‌سازی فازی با استفاده از سیاست‌های بهینه مدل FSDP استفاده کردند. نتایج بدست آمده نشان دهنده نتایج بهتر مدل ارائه شده بوده است. (Adib and Mohammadi Majd 2009) به ارائه مدلی جهت بهینه‌سازی حجم مخزن با استفاده از مدل آبدی پرداختند. (Serivastava et al. 2009) مدل لانه‌ای (nest model) را ارائه دادند که در آن از مدل آبدی، برنامه‌ریزی پویا، شبکه عصبی مصنوعی<sup>۹</sup>، جیره‌بندی<sup>۱۰</sup> و شبیه‌سازی استفاده شده است. هدف از این مطالعات بهینه‌سازی طراحی سیستم‌های چندمخزنی جهت تأمین نیاز کشاورزی بوده که با استفاده از جریان ورودی ماهانه و حجم ذخیره اولیه مخزن، مدل به تخمین بیش‌ترین رهاسازی آب می‌پردازد. (Pattewar et al. 2013) یک مدل آبدی برای سیستم‌های چند مخزنی توسعه دادند. در این مطالعات تابع هدف حداکثر نمودن آبدی سالانه است و هدف دستیابی به اعتمادپذیری مطلوب کشاورزی و ایجاد کمبودهای مجاز در طول دوره کشاورزی می‌باشد. (Ahmadifar et al. 2016) به فازی‌سازی منحنی جیره‌بندی برای مواجه شدن با شرایط خشکسالی در یک سیستم سه مخزنی پرداخته است. در این مطالعات، فاکتور جیره‌بندی با استفاده از توابع فازی انعطاف‌پذیر شده است. به منظور بهینه‌کردن پارامترهای منحنی جیره‌بندی جدید از الگوریتم اجتماع پرندگان چندمعیاره استفاده شده است. نتایج بدست آمده از مدل نشان دهنده تسکین یافتن کمبودها در دوره‌های خشکسالی می‌باشد. هدف

بهره‌برداری از مخزن عبارت است از تعیین سیاستی برای تأمین نیازهای آبی، به گونه‌ای که معیارهای ارزیابی کارایی سیستم را در سطح معقولی تأمین نماید. برای طرح‌های توسعه منابع آب و به خصوص سدها که به منظور ذخیره‌سازی آب‌های جاری مازاد و مصرف آن در زمان کمبود ساخته شده‌اند، سیاست بهره‌برداری معمولاً بر اساس سری زمانی جریان تاریخی تعیین می‌شود. مبنای استفاده از این سری‌ها، فرض ثابت بودن آماره‌های آن (میانگین، انحراف معیار و ...) در طول زمان و به عبارت دیگر ایستای بودن سری زمانی می‌باشد. حال آنکه در زمان بهره‌برداری از مخزن، حتی اگر تغییر اقلیم را در نظر نگیریم، جریان ورودی به مخزن با آنچه در گذشته روی داده است متفاوت خواهد بود. به همین دلیل ممکن است سیاست بهره‌برداری از مخزن رضایت‌بخش نبوده و عملکرد مناسبی نداشته باشند. بی‌توجهی به این موارد که با عنوان عدم قطعیت هیدرولوژیکی مطرح می‌شود باعث به وجود آمدن مشکلاتی در تأمین آب مورد نیاز می‌گردد. برای حل این معضل می‌توان با استفاده از مفهوم مجموعه‌های فازی در بهره‌برداری از مخزن شرایط را به واقعیت نزدیک‌تر نمود. رویکرد فازی را می‌توان در مدل‌های مختلف شناخته‌شده برای بهره‌برداری از مخزن از جمله برنامه‌ریزی خطی استوکستیک<sup>۱</sup>، برنامه‌ریزی پویای استوکستیک<sup>۲</sup> و مدل آبدی (YM)<sup>۳</sup> بکار گرفت.

روش‌های بهینه‌سازی در بهره‌برداری از مخازن سدها، در طول شش دهه گذشته پیشرفت قابل ملاحظه‌ای داشته‌اند. Deform در سال ۱۹۶۲ برای نخستین بار از برنامه‌ریزی خطی برای طراحی و بهره‌برداری از یک مخزن تأمین آب استفاده نمود. (Revelle et al. 1969) به وسیله برنامه‌ریزی خطی و به کمک قاعده تصمیم‌گیری خطی (LDR)<sup>۴</sup> اقدام به تهیه مدلی برای طراحی و مدیریت مخزن نمودند. (Loucks et al. 1976) مفهوم YM را ارائه داد. این مدل یک مدل استوکستیک ضمنی است که دارای دو بخش درون‌سالی و برون‌سالی می‌باشد. (Stedinger et al. 1983) به مقایسه مدل‌های قطعی، استوکستیک ضمنی و استوکستیک صریح برای طراحی و بهره‌برداری مخازن پرداخت. نتایج به دست آمده از تحقیقات آن‌ها و (Locks et al. 1981) نشان داد مدل آبدی ظرفیت مخزن مناسبی را نتیجه می‌دهد به‌گونه‌ای که اعتمادپذیری مناسب و نزدیک به هدف سیستم ایجاد می‌گردد. (Dandy et al. 1997) مقایسه بین ۴ روش مختلف را برای آبدی سیستم‌های چندمخزنی انجام داد. این روش‌ها شامل شبیه‌سازی، ترکیب مدل شبیه‌سازی و بهینه‌سازی (WATHNET)، مدل بهینه‌سازی کامل و مدل بهینه‌سازی تقریبی بوده است. در این مقایسه با وجود اینکه مدل آبدی دارای حل تقریبی

بدست آمده، یک مدل شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد بر پایه منحنی فرمان فازی و کلاسیک تهیه شده و با وارد نمودن سناریوهای جریان یکسان به هر دو مدل نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه می‌شود. یکی از مزایای مدل فازی تهیه منحنی فرمان آن از روی سناریوهای جریان می‌باشد؛ زیرا می‌توان با تبدیل سناریوها به سناریوهای تغییر اقلیم و با انجام اصلاحات مورد نیاز در مدل اصلی، منحنی فرمان را برای شرایط تغییر اقلیم به دست آورد (این محاسبات می‌تواند در تحقیقاتی جداگانه انجام گیرد). شکل ۱ روند انجام مطالعات را نمایش می‌دهد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- مدل آینده

انواع مختلفی از مدل‌های طراحی و بهره‌برداری از مخازن بر پایه مقدار آینده و اعتبار آن در ارتباط با یکسری جریان ورودی قرار دارند. مدلی که این پژوهش بر پایه آن انجام گرفته، مدل آینده کلاسیک، ارائه شده توسط لاکس و همکاران است (Loucks et al. (1981). با توجه به اینکه هدف مطالعات حاضر بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سدهای احداث شده می‌باشد؛ جهت توسعه مدل آینده تغییراتی در تابع هدف و قیدهای آن صورت گرفته و مدلی با عنوان مدل آینده فازی به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن حاصل گردیده است.

از انجام این پژوهش بهبود عملکرد مدل آینده کلاسیک (Loucks et al. (1981) با در نظر گرفتن عدم قطعیت هیدرولوژیکی بوده است. در این راستا یک مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن بر پایه مدل آینده کلاسیک در نرم‌افزار LINGO\_15 تهیه شده است. به طور معمول آمار ایستگاه‌های هیدرومتری که همان جریان‌های تاریخی‌اند برای مدل‌سازی سیستم مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرند ولی از آنجایی که طبیعت جریان رودخانه‌ها یک فرآیند تصادفی است، استفاده از مدل‌های استوکستیک به جای مدل‌های قطعی، به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت هیدرولوژیکی منطقی‌تر و مناسب‌تر است. به طور معمول دو روش برای لحاظ عدم قطعیت در مدل‌ها وجود دارد. روش اول ورود آن در ساختار مدل و توسعه یک مدل استوکستیک است (مانند SLP یا SDP)، و روش دوم استفاده از مدل قطعی و اجرای متعدد آن بر اساس سناریوهای محتمل، ارزیابی خروجی‌ها و محاسبه توزیع‌های احتمالاتی خروجی‌های مدل می‌باشد. در این مطالعات رویکرد دوم مورد استفاده قرار گرفته است. در این رویکرد فرض می‌گردد جریان رودخانه از یک فرآیند مارکوف مرتبه اول تبعیت می‌کند. سپس، به تولید سری‌های زمانی مصنوعی بر پایه سری زمانی تاریخی با استفاده از نرم‌افزار ITSM<sup>۱۱</sup> پرداخته شده است (سناریوهای جریان). در ادامه، بر پایه مدل آینده و با استفاده از رویکرد توابع عضویت فازی، یک منحنی فرمان انعطاف‌پذیر (مدل یا منحنی فرمان آینده فازی) تهیه شده است. به منظور ارزیابی منحنی فرمان فازی

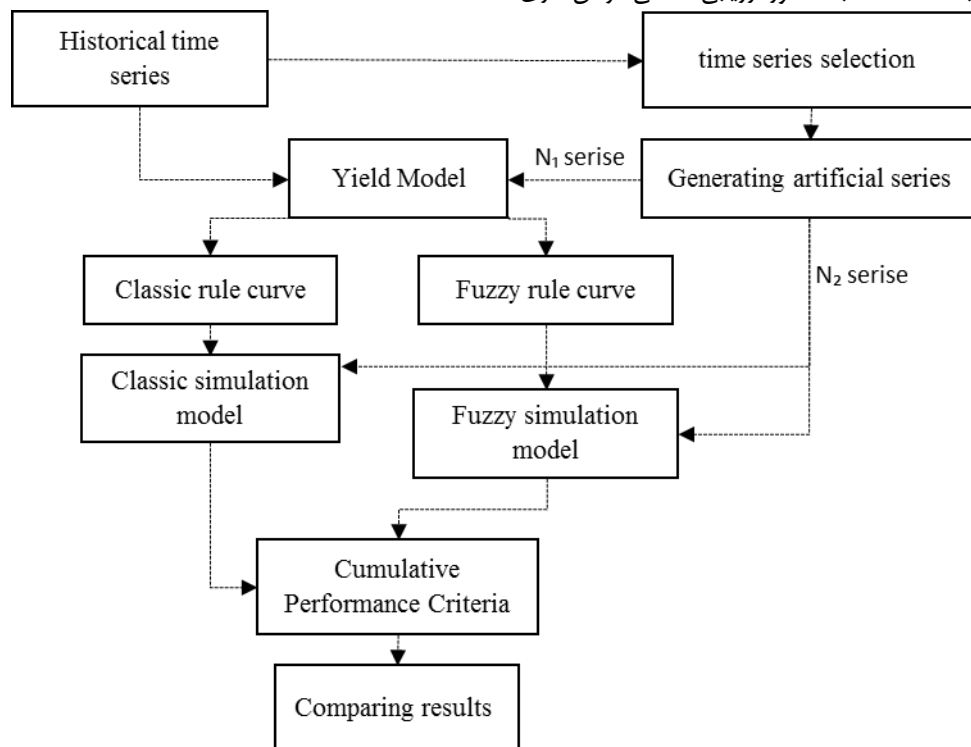


Fig. 1- Investigation flowchart

شکل ۱- نمای کلی روند مطالعات

گونه‌ای حاصل شده‌اند تا یک روال منطقی برای اعتمادپذیری‌ها بدست آید. به طوری که اعتمادپذیری نیاز قطعی بیشتر از نیاز ثانویه و آن هم بیشتر از نیاز سوم باشد. این مدل محدودیت‌هایی به شرح زیر دارد:

$$S_y(y+1) = S_y(y) + Q_y(y) - R_y(y) - E_y(y) \quad y = 1, 2, 3, \dots, N \quad (4)$$

$$S_y(N+1) = S_y(1) \quad (5)$$

$S_y(y)$  حجم ذخیره ابتدای دوره در سال  $y$  و  $S_y(y+1)$  حجم ذخیره ابتدای دوره در سال  $y+1$  است که برای ایجاد تعادل در مدل این دو حجم با هم برابر در نظر گرفته می‌شوند.  $Q_y$  حجم جریان سالانه ورودی به مخزن،  $E_y$  حجم تبخیر از سطح مخزن و  $R_y$  خروجی سالانه مخزن است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_y(y) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^T Z_i(y) \times Y_i(y) + Ex_y(y) \quad (6)$$

$Y_i(y)$  برابر است با نیاز سالانه با اولویت  $i$   $Ex_y(y)$  سرریز از مخزن در سال  $y$  و  $Z_i(y)$  متغیر باینری (صفر و یک) متناسب با تأمین یا عدم تأمین نیاز در سال  $y$ ، به طوری که برای کلیه سال‌هایی که آب مورد نیاز تأمین شده برابر یک و در سایر سال‌ها صفر می‌باشد. یکی دیگر از نوآوری‌های این پژوهش اصلاحی است که در فرمول‌بندی مدل آبدهی صورت گرفته تا مدل به طور خودکار دوره بحرانی (سال‌های با  $Z_i(y) = 0$ ) را مشخص نماید.

محدودیت ظرفیت ذخیره فعال برون‌سالی  $(K_a^0)$  برای هر سال  $y$ :

$$S_y(y) \leq K_a^0 \quad (7)$$

پیوستگی ذخیره درون‌سالی<sup>۱۳</sup> برای هر دوره  $m$ :

نوشتن محدودیت‌های پیوستگی درون‌سالی نیازمند تعیین سال بحرانی و جریان ورودی به مخزن در آن سال است. چنانچه در سال بحرانی بجای جریان ورودی، اجزای مناسبی از نیاز کل سالانه، به صورت  $\beta_m$  در هر دوره درون‌سالی  $m$  قرار دهیم، معمولاً نتایج مفیدی حاصل می‌گردد ( $\sum_{m=1}^M \beta(m) = 1$ ).

در این مدل به منظور کاهش خسارت وارده به سیستم در صورت عدم تأمین نیازها در شرایط خشکسالی با توجه به متنوع بودن نیازها (شرب، صنعت، کشاورزی، و زیست‌محیطی) اولویت‌بندی آن‌ها صورت گرفته است.

$$D_i(m) = a_i \times D_{env}(m) + b_i \times D_{dom}(m) + c_i \times D_{ind}(m) + d_i \times D_{agri}(m) \quad (1)$$

در رابطه بالا  $D_i(m)$  نشان دهنده نیاز با اولویت تعیین شده (قطعی، دوم، سوم و...) در ماه  $m$ ، نیاز زیست‌محیطی،  $D_{dom}$  نیاز شهری،  $D_{ind}$  نیاز صنعتی،  $D_{agri}$  نیاز کشاورزی، و  $a_i, b_i, c_i, d_i$  ضرایب تعیین کننده کسری از هر نیاز در اولویت  $i$  می‌باشد و مجموع این ضرایب برای هر اولویت برابر ۱ خواهد بود.

$$\sum_i a_i = 1, \sum_i b_i = 1, \sum_i c_i = 1, \sum_i d_i = 1 \quad (2)$$

در این مطالعات هر نیاز به سه اولویت تقسیم‌بندی شده است. مجموع نیازها با اولویت یک ( $\sum_{i=1}^3 D_1(m)$ ) آبدهی قطعی، با اولویت دو ( $\sum_{i=1}^3 D_2(m)$ ) آبدهی ثانویه و با اولویت سه ( $\sum_{i=1}^3 D_3(m)$ ) آبدهی سوم را حاصل می‌نماید.

با در نظر گرفتن سیستم تک مخزنی مطابق شکل ۲، تابع هدف و قیدهای مدل در این تحقیق به شرح زیر آورده شده است. یکی از اصلاحات صورت گرفته در این مدل تغییر تابع هدف به دلیل معلوم بودن ظرفیت مخزن می‌باشد. در این مدل تابع هدف بجای مینیمم حجم مخزن، ماکزیمم اعتمادپذیری تأمین نیازها با معلوم بودن مقادیرشان در نظر گرفته شده است.

$$\text{Objective Function:} \quad \text{Max } Z = k_1 \times \text{Rel}f + k_2 \times \text{Rel}s + k_3 \times \text{Rel}3 \quad (3)$$

$\text{Rel}f$  اعتمادپذیری نیاز قطعی،  $\text{Rel}s$  اعتمادپذیری نیاز ثانویه و  $\text{Rel}3$  اعتمادپذیری نیاز سوم می‌باشد. ضرایب  $k_1, k_2$  و  $k_3$  ضرایب اعتمادپذیری نیازها می‌باشند و با توجه به اهمیت و اولویت نیازها به

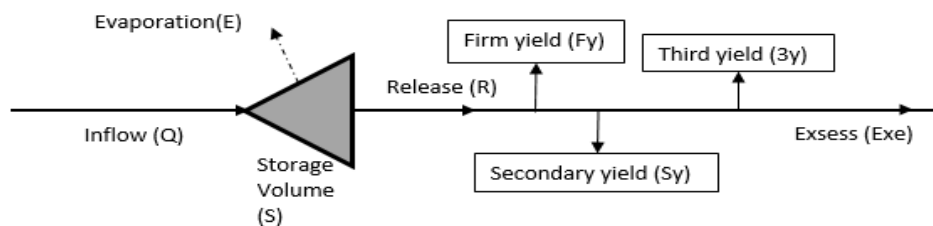


Fig. 2- Single reservoir system  
شکل ۲- نمایش سیستم تک مخزنی

$a_0$  و  $a$  حجم ذخیره برون سالی،  $S_y$  ارتفاع تبخیر ماهانه،  $e(m)$  ضرایب ثابت رابطه بین سطح و حجم مخزن هستند که با استفاده از نمودار سطح حجم مخزن تعیین می‌شوند.  $E(y,m)$  تخمینی از ارتفاع تبخیر در سال  $y$  و دوره  $m$  و  $E_m(m)$  ارتفاع تبخیر در دوره  $m$  از سال بحرانی و  $N$  تعداد دوره‌های سالانه سری زمانی تاریخی می‌باشد. برای محاسبه تبخیر سالانه نیز از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$E_y(y) = \sum_{m=1}^M E(y,m); \quad y = 1, 2, \dots, N; \quad (16)$$

## ۲-۲- منحنی فرمان

منحنی فرمان مخزن راهنمایی برای کنترل ذخیره و خروجی مخزن در هر دوره بوده که نشان دهنده ناحیه ذخیره برای رهاسازی آب مورد نیاز با اعتمادپذیری تعیین شده می‌باشد. مقادیر منحنی فرمان برای هر دوره را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$SRule(m) = K_d + K_a^o + S_m(m) \quad (17)$$

در این رابطه  $K_a^o$  حجم ذخیره برون سالی و  $S_m(m)$  حجم ذخیره درون سالی و  $SRule(m)$  نشان دهنده مقدار عددی منحنی فرمان در هر دوره درون سالی  $m$  است. این منحنی فرمان، منحنی فرمان کلاسیک نامیده می‌شود (شکل ۳).

برای اصلاح منحنی فرمان کلاسیک، می‌توان به جای مرز شکننده<sup>۱۴</sup> تعیین کننده تأمین نیاز قطعی و ثانویه با ایجاد یک باند، گذر از نیاز قطعی به ثانویه را تدریجی نمود. سیاست تخصیص فازی به منظور بهبود مدل کلاسیک توسعه یافته و در همین راستا منطق صفر و یک موجود در مدل آبدهی کلاسیک را از بین می‌برد.

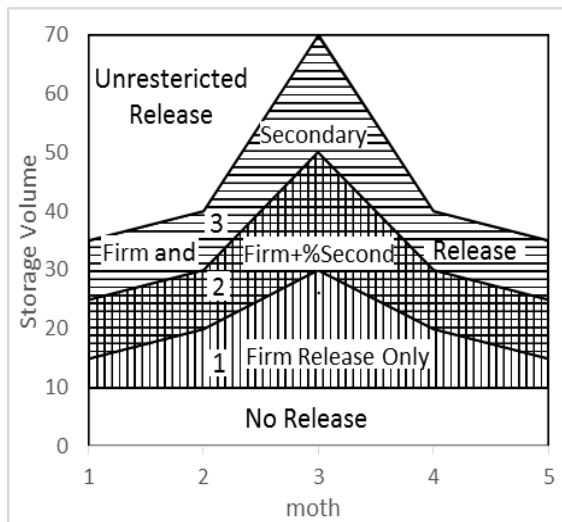


Fig. 4- Rule curve with fuzzy approach

شکل ۴- منحنی فرمان با رویکرد فازی

یک انتخاب مناسب جهت تخمین مقادیر  $\beta_m$  عبارت است از توزیع جریان میانگین ماهانه (Loucks and vanBeek, 2005). اگر  $M$  آخرین دوره در سال باشد  $1 \rightarrow M+1$ :

$$S_m(m+1) = S_m(m) + \beta(m) \times (ANT + ANE) - R_m(m) - Ex_m(m) - E_m(m) \quad (9)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

$$S_m(M+1) = S_m(1) \quad (10)$$

$S_m(m)$  و  $S_m(m+1)$  برابر با حجم مخزن ابتدا و انتهای دوره،  $ANT$  کل نیاز سالانه،  $ANE$  میانگین تبخیر سالانه از مخزن،  $E_m(m)$  تبخیر ماهانه،  $Ex_m(m)$  سرریز از مخزن و  $R_m(m)$  خروجی سالانه مخزن می‌باشد. مجموع نیازهای درون سالی می‌بایست با نیازهای برون سالی مربوطه خود برابر باشند.

$$ANT = \sum_{i=1}^3 Y_i(y) \quad (11)$$

بیشترین حجم به دست آمده از رابطه پیوستگی ذخیره درون سالی به عنوان ظرفیت درون سالی مخزن  $K_a^w$  در نظر گرفته می‌شود. مجموع ظرفیت برون سالی، درون سالی و حجم مرده ( $K_d$ ) ظرفیت کل مخزن ( $K$ ) را نمایش می‌دهد.

$$S_m(m) \leq K_a^w \quad (12)$$

$$K_a^o + K_a^w + K_d = K \quad (13)$$

تخمین افت حاصل از تبخیر برای هر دوره درون سالی  $m$ :

$$m = 1, 2, \dots, M \quad (14)$$

$$E(y,m) = [a_0 + a \times (S_y(y) + \frac{S_m(m) + S_m(m+1)}{2})] \times e(m)$$

$$E_m(m) = \frac{\sum_{y=1}^N E(y,m)}{N}; \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (15)$$

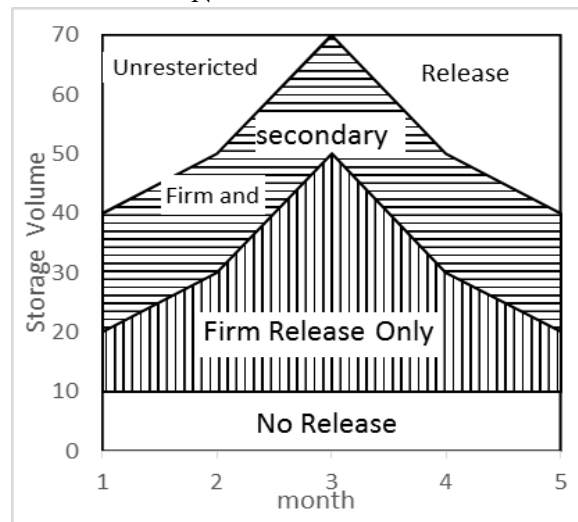


Fig. 3- Classic rule curve

شکل ۳- منحنی فرمان کلاسیک

و پس از آن نیاز ثانویه شروع به تأمین می‌گردد و در نهایت نیاز سوم تأمین می‌شود.

### ۲-۳- شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن که به نوعی صحت‌سنجی مدل‌ها نیز خواهد بود بر پایه منحنی‌های فرمان فازی و کلاسیک در نرم‌افزار Excel تهیه شده و با وارد نمودن سناریوهای جریان یکسان به هر دو مدل (N<sub>2</sub> سری) نتایج به‌دست آمده مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. به‌منظور ارزیابی مدل‌ها معیارهای ارزیابی کارایی سیستم برای هر سناریو محاسبه شده است. معیارهای مورد استفاده در این پژوهش عبارت‌اند از اعتمادپذیری<sup>۱۵</sup>، برگشت‌پذیری<sup>۱۶</sup> و آسیب‌پذیری<sup>۱۷</sup>. معادلات حاکم بر این معیارها توسط Hashimoto (1982) ارائه شده است. علاوه بر معیارهای ذکر شده دو معیار دیگر شامل، درصد تأمین نیاز و تابع تجمعی تخصیص (cdf)<sup>۱۸</sup> برای هر سناریو محاسبه شده است. برای نمایش تابع تجمعی تخصیص حجم آب رهاسازی شده به منظور تأمین هر نیاز از حجم آب تقاضا شده آن نیاز کسر شده و نتایج به صورت نزولی مرتب و نمودار آن ترسیم شده است.

در این پژوهش برای ایجاد یک باند مناسب، این ایده حاصل شده است که از سری‌های زمانی مصنوعی (سناریوهای جریان) استفاده گردد (شکل ۴). به‌منظور فازی‌سازی توابع مختلفی وجود دارد. تابع S شکل متقارن و نامتقارن از توابع پرکاربرد در فازی‌سازی داده‌ها می‌باشد که در این مطالعات مورد استفاده قرار گرفته است. مهم‌ترین بخش در تبدیل منحنی فرمان کلاسیک به منحنی فرمان فازی، ایجاد روشی برای تعیین درصد تأمین نیازها در باند حاصل می‌باشد. بدین منظور پس از اجرای مدل برای سناریوهای مختلف (N<sub>1</sub> سناریو) در هر دوره زمانی N<sub>1</sub> نقطه، متناظر با N<sub>1</sub> منحنی فرمان حاصله به‌دست می‌آید (شکل ۵). در هر دوره با استفاده از برازش توابع عضویت فازی به نقاط موجود مناسب‌ترین تابع با کمترین خطا به عنوان تابع عضویت فازی آن دوره انتخاب می‌گردد.

یکی از تفاوت‌های اساسی به وجود آمده در منحنی فرمان فازی، ایجاد همپوشانی باندهای منحنی‌های فرمان در بعضی از دوره‌ها می‌باشد. در این شرایط قبل از تأمین کامل نیاز ثانویه درصدی از نیاز سوم نیز تأمین می‌گردد (شکل ۶). به‌طور مثال در مدل فازی ممکن است نیاز قطعی ۱۰۰ درصد، نیاز ثانویه ۹۰ درصد و نیاز سوم ۱۰ درصد تأمین گردد، درحالی‌که در مدل کلاسیک ابتدا نیاز قطعی به‌طور کامل تأمین شده

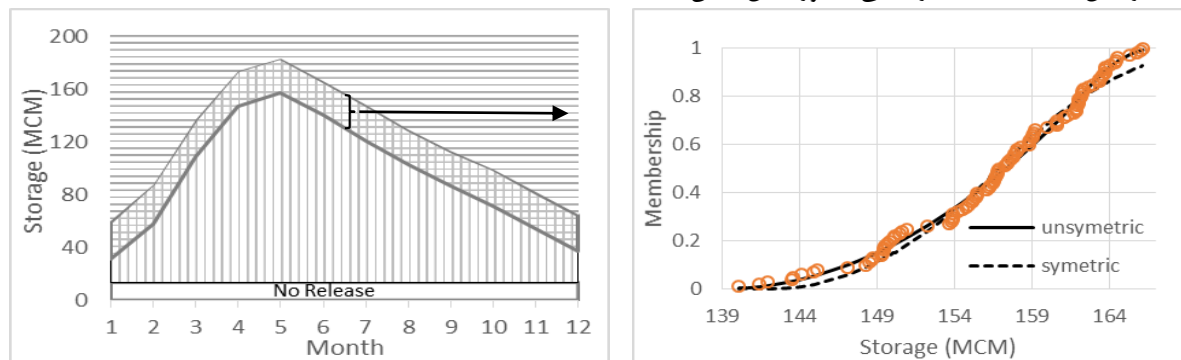


Fig. 5- Rule curve's boundary for artificial series

شکل ۵- باند منحنی فرمان سری‌های مصنوعی

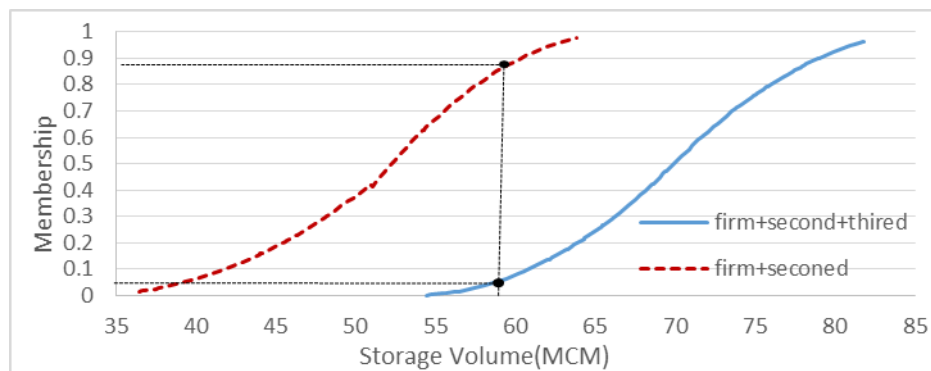


Fig. 6- Determining demands supply percentage using fuzzy membership functions

شکل ۶- تعیین درصد تأمین نیازها با استفاده از توابع عضویت فازی

ورودی به مخزن سد ۴۸ ساله، در دوره زمانی ۳۸-۱۳۳۷ تا ۸۵-۱۳۸۴، می‌باشد (شکل ۷). با توجه به اینکه میانگین جریان ورودی به سد کمتر از مجموع نیازهای پایاب است سد کرج از این لحاظ به شدت تحت تنش و فشار ناشی از بهره‌برداری بوده و با کمبود منابع روبه‌رو است.

جهت تولید سری‌های زمانی مصنوعی، از جریان ماهانه تاریخی ورودی به سد و برآزش مدل ARMA در نرم‌افزار ITSM استفاده شده است. پس از آماده‌سازی داده‌های سری جریان، جهت انتخاب مدلی که علاوه بر حفظ آماره‌های مهم سری تاریخی دارای حداقل تعداد پارامترها باشد (اصل امساک) از معیار آکایک اصلاح شده (AICC) استفاده شده (Salas (1980) و با بررسی مدل‌های مختلف در نهایت مدل ARMA(1,1) به عنوان مدل منتخب در نظر گرفته شده است. در کل ۱۵۰ سری زمانی تهیه شده، ۱۰۰ سری ( $N_1=100$ ) در تشکیل منحنی فرمان فازی و ۵۰ سری ( $N_2=50$ ) در شبیه‌سازی بهره‌برداری از مخزن استفاده شده است.

برای تهیه مدل آینده سیستم موجود مطابق با روابط ذکر شده در قسمت مدل‌سازی از نرم‌افزار Lingo.15 استفاده شده است. گام زمانی در مدل‌سازی ماهانه است. نیازها به سه اولویت تقسیم‌بندی شده و تبخیر سالانه و نیازهای سالانه ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

$$D_1(m) = 0.7 \times D_{dom} + 0.1 \times D_{Agri}(m) \quad (21)$$

$$D_2(m) = 0.2 \times D_{dom} + 0.4 \times D_{Agri}(m) \quad (22)$$

$$D_3(m) = 0.1 \times D_{dom} + 0.5 \times D_{Agri}(m) \quad (23)$$

تابع هدف نیز برای تعیین مقادیر اعتمادپذیری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(24)$$

$$\text{Max } Z = k_1 \times \text{Rel}f + k_2 \times \text{Rel}s + k_3 \times \text{Rel}l3$$

اعتمادپذیری: نشان‌دهنده احتمال تأمین نیاز است و در آن  $X_t$  آب خروجی از مخزن،  $X^T$  نیاز سالانه،  $m$  تعداد دوره‌هایی است که  $X_t \geq X^T$  و  $n$  تعداد کل دوره است.

$$\text{Reliability}[X] = \frac{m}{n} \quad (18)$$

برگشت‌پذیری: سرعت بازگشت یک سیستم از حالت شکست به حالت عادی را نشان می‌دهد. اگر در نظر گرفته شود که  $W_t$  دلالت بر انتقال سیستم از یک حالت نارضایت‌بخش ( $F$ ) به یک حالت رضایت‌بخش ( $S$ ) نماید و  $mn$  تعداد دوره‌هایی که در آن کمبود در تأمین وجود دارد باشد آنگاه:

$$\text{if } X_{t+1} \in S \ \& \ X_t \in F \rightarrow W_t = 1 \\ \text{else } W_t = 0$$

$$\text{Resiliency}[X] = \frac{W_t}{mn} \quad (19)$$

آسیب‌پذیری: نشان‌دهنده اختلاف بین مقدار آستانه و مقادیر غیر رضایت‌بخش سری زمانی است و در آن،  $mv$  مجموعه مقادیر مثبت  $(X^T - X_t)$  و  $nn$  تعداد دوره‌هایی است که در آن‌ها کمبود در تأمین وجود دارد:

$$\text{Vulnerability}[X] = \frac{mv}{nn} \quad (20)$$

#### ۴-۲- مطالعه موردی

سد کرج (امیرکبیر) در ۲۳ کیلومتری شمال شهر کرج، بر روی رودخانه کرج واقع شده است. ظرفیت سد ۲۰۵ میلیون مترمکعب بوده و با تعیین نیاز زیست‌محیطی رودخانه کرج و آبدهی میان حوضه سد مشخص شد که میان حوضه برای تأمین نیاز زیست‌محیطی کافی است. نیازهای سد مجموعاً شامل ۴۴۵/۵ میلیون مترمکعب در سال است و از این مقدار ۳۲۱ میلیون مترمکعب نیاز سالانه شهر تهران و ۱۲۴/۵ میلیون مترمکعب نیاز سالانه کشاورزی کرج می‌باشد. سری زمانی جریان

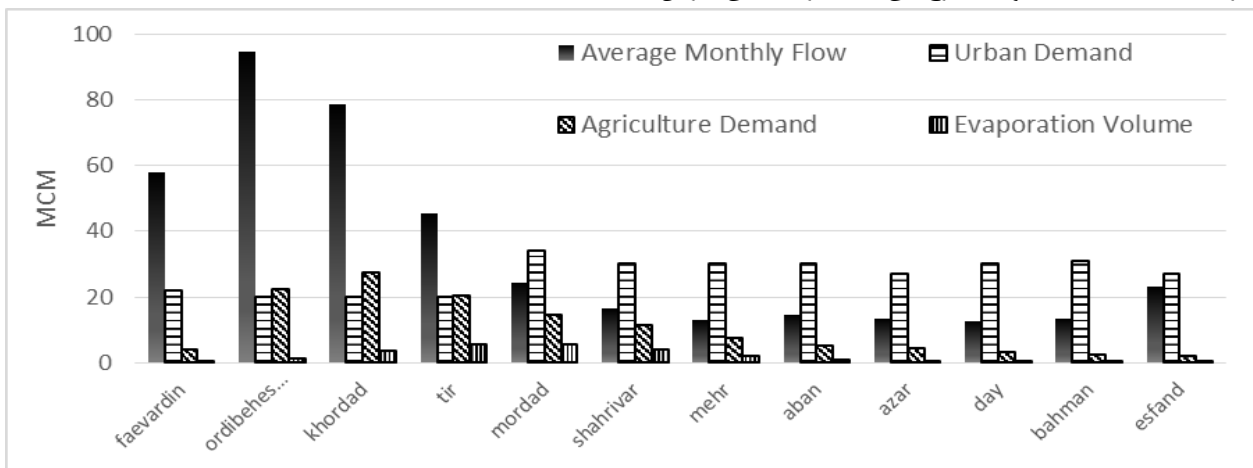


Fig. 7- Distribution of monthly flow, demands, and evaporation for Karaj Dam

شکل ۷- توزیع جریان ورودی، نیازها و حجم تبخیر سد کرج

۹۸ درصد می‌باشد. میانگین اعتمادپذیری نیاز ثانویه در مدل کلاسیک و فازی به ترتیب ۸۱ و ۵۵ درصد و برای نیاز سوم ۴۷ و ۳۴ درصد به دست آمده است. مطابق شکل ۱۰ متوسط برگشت‌پذیری نیاز قطعی برای مدل کلاسیک ۶۰ درصد و مدل فازی ۵۲ درصد می‌باشد. متوسط برگشت‌پذیری نیاز ثانویه مدل کلاسیک و فازی به ترتیب برابر با ۳۵ و ۱۲ درصد و برای نیاز سوم در مدل کلاسیک برابر با ۳/۹ درصد و فازی ۵/۷ درصد به دست آمده است. با توجه به شکل ۱۱ متوسط آسیب‌پذیری نیاز قطعی در مدل کلاسیک ۲۸ درصد و در مدل فازی ۲۲ درصد می‌باشد. متوسط آسیب‌پذیری نیاز ثانویه مدل کلاسیک و فازی به ترتیب برابر ۹۸ درصد و ۴۴ درصد بوده و در تأمین نیاز سوم در مدل کلاسیک دارای مقدار ثابت ۱۰۰ درصد بوده که در مدل فازی به ۸۲ درصد کاهش یافته است.

ضرائب به‌گونه‌ای حاصل شده تا یک روال منطقی برای اعتمادپذیری‌ها بدست آید. بر این اساس این ضرائب برابر با  $k_3=1, k_2=10, k_1=100$  در نظر گرفته شده است. با حل مدل به ازای سری تاریخی جریان ورودی به سد، منحنی فرمان کلاسیک حاصل می‌گردد. منحنی فرمان فازی سد در شکل ۸ نمایش داده شده است.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

نتایج شبیه‌سازی با منحنی فرمان کلاسیک و فازی با استفاده از معیارهای ارزیابی کارایی سیستم نشان داده شده است. شکل ۹ نمودارهای اعتمادپذیری ماهانه را نمایش می‌دهد. این شاخص برای نیاز قطعی در دو مدل کلاسیک و فازی تقریباً برابر و دارای میانگین

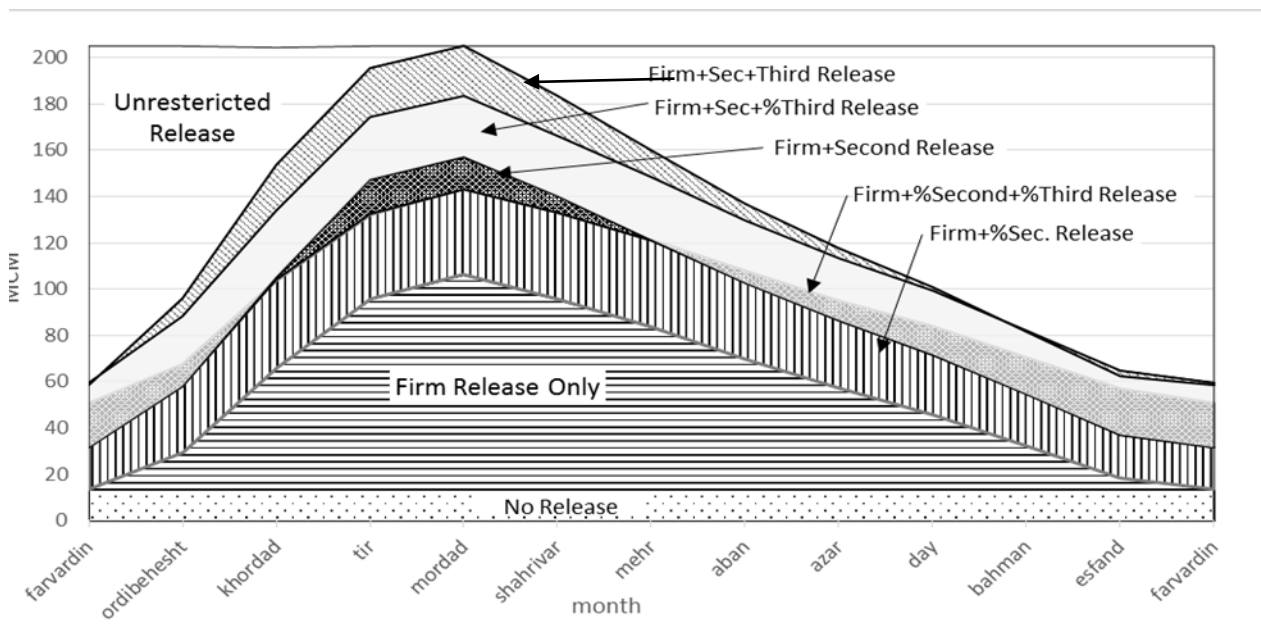


Fig. 8- Karaj Dam fuzzy rule curves  
شکل ۸- منحنی‌های فرمان فازی سد کرج

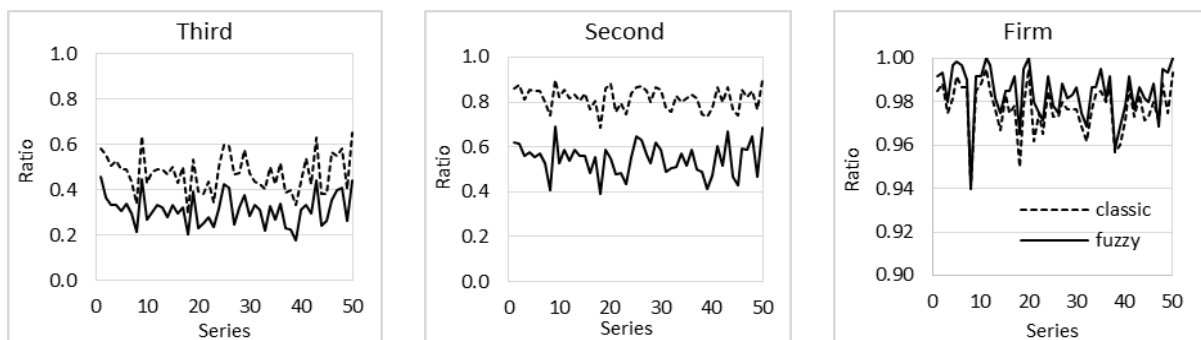
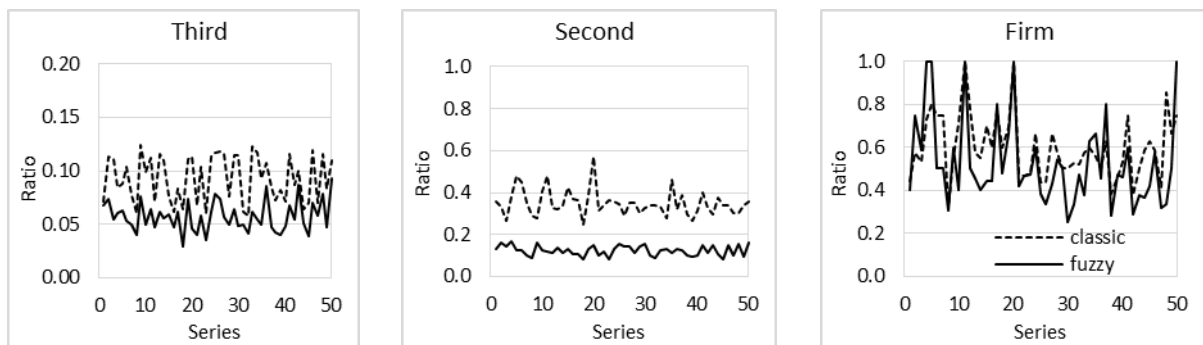
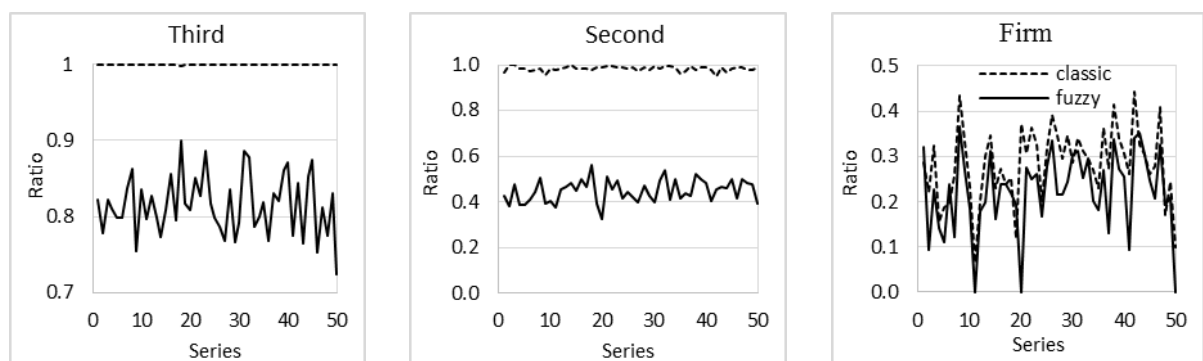


Fig. 9- Comparing demand supply reliability for classic and fuzzy models  
شکل ۹- مقایسه اعتمادپذیری تأمین نیازها در دو مدل بهره‌برداری کلاسیک و فازی





**Fig. 10- Comparing demand supply resiliency for classic and fuzzy models**  
 شکل ۱۰ - مقایسه بازگشت پذیری تأمین نیازها در دو مدل بهره برداری کلاسیک و فازی

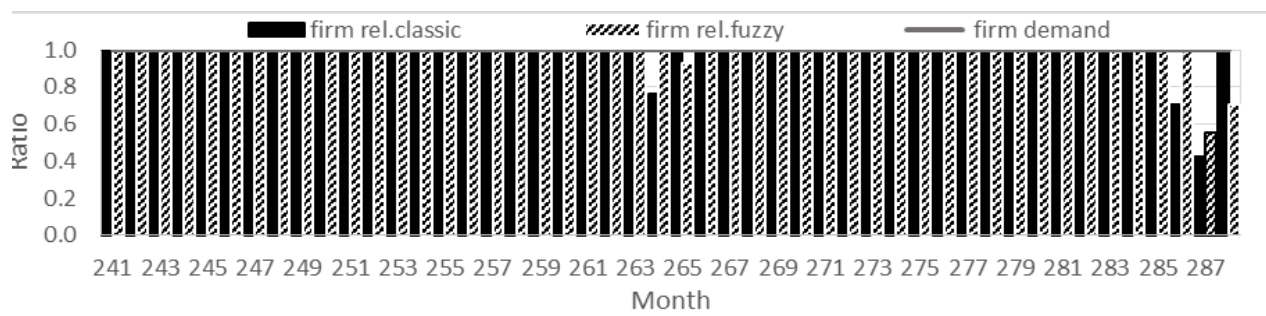


**Fig. 11- Comparing demand supply vulnerability for classic and fuzzy models**  
 شکل ۱۱ - مقایسه آسیب پذیری تأمین نیازها در دو مدل بهره برداری کلاسیک و فازی

درصد ماه‌های موجود و محور عمودی نسبت حجم نیاز تأمین شده به کل نیاز در هر ماه می‌باشد (شکل ۱۵). با توجه به نتایج نمودارها مدل کلاسیک در ۹۷ درصد ماه‌ها و مدل فازی در ۹۸ درصد ماه‌های موجود نیاز قطعی را به‌طور کامل تأمین کرده است. در تأمین نیاز ثانویه، مدل کلاسیک در ۸۲ درصد از ماه‌ها نیاز را به‌طور کامل تأمین کرده و در ۱۸ درصد تأمین نیاز صفر بوده است، این در حالی است که مدل فازی در ۵۷ درصد از ماه‌ها نیاز به‌طور کامل تأمین شده و تنها در ۵ درصد ماه‌ها نیاز اصلاً تأمین نشده است.

معیار دیگر، تأمین نیاز در دوره خشکسالی می‌باشد. بدین منظور با انتخاب یک دوره خشکسالی آبدهی در دو مدل مقایسه شده است (شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴). با توجه به شکل‌ها در تأمین نیاز ثانویه مدل فازی به جای تأمین کامل نیاز، حدود ۰/۷ تا ۰/۸ از نیاز را تأمین نموده و حجم آب باقی‌مانده در مخزن در ماه‌هایی که سیستم با کمبود مواجه می‌شود مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شاخص دیگری که برای مقایسه دو مدل به کار رفته، تابع توزیع تجمعی تخصیص‌ها (cdf) می‌باشد که در نمودارهای آن محور افقی



**Fig. 12- Comparing firm demand supply in drought condition for classic and fuzzy models**  
 شکل ۱۲ - مقایسه تأمین نیاز قطعی در دوره خشکسالی برای مدل کلاسیک و فازی

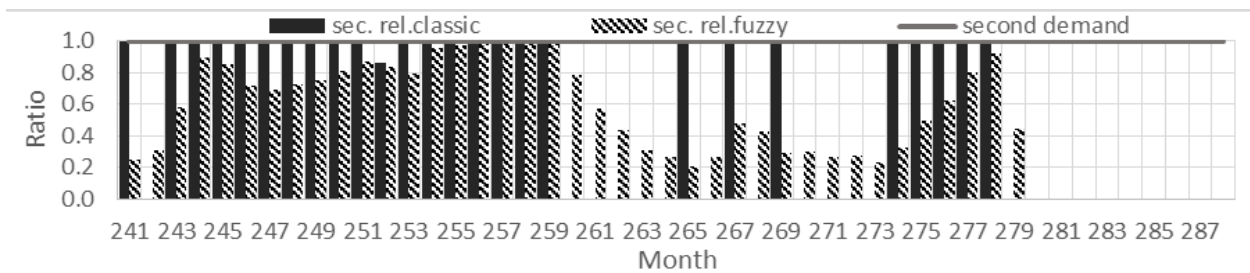


Fig. 13- Comparing second demand supply in drought condition for classic and fuzzy models

شکل ۱۳- مقایسه تأمین نیاز ثانویه در دوره خشک‌سالی برای مدل کلاسیک و فازی

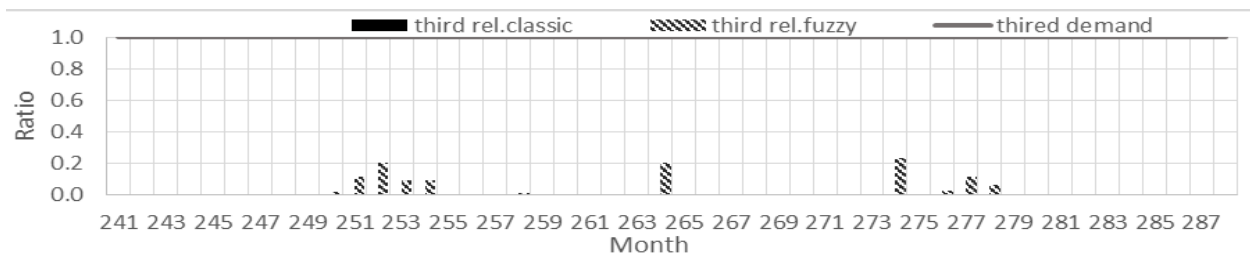


Fig. 14- Comparing third demand supply in drought condition for classic and fuzzy models

شکل ۱۴- مقایسه تأمین نیاز سوم در دوره خشک‌سالی برای مدل کلاسیک و فازی

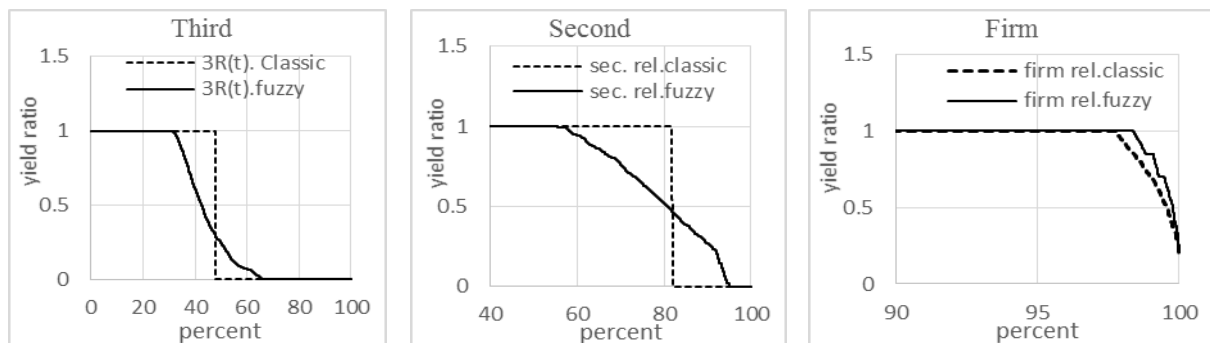


Fig. 15- Cumulative demand function for classic and fuzzy models

شکل ۱۵- تابع تجمعی تخصیص در دو مدل بهره‌برداری کلاسیک و فازی

تغییر تابع هدف، تعیین دوره بحرانی توسط مدل، اولویت‌بندی نیازها و در نهایت تبدیل منحنی فرمان مدل آبدهی به منحنی فرمان فازی به بهبود عملکرد مدل آبدهی پرداخته است. به‌منظور ارزیابی مدل، شبیه‌سازی آبدهی مخزن در یک دوره ۴۸ ساله بر پایه مدل‌های کلاسیک و فازی صورت گرفته و نتایج بدست آمده از آن مورد تحلیل و مقایسه قرار گرفته است. یافته‌های این پژوهش در مدل‌سازی سد مخزنی کرج به شرح زیر می‌باشد:

– میانگین اعتمادپذیری نیاز قطعی در مدل‌های فازی و کلاسیک با یکدیگر برابر بوده و در تأمین نیاز ثانویه و سوم اعتمادپذیری مدل فازی به ترتیب ۲۶ درصد و ۱۳ درصد نسبت به مدل کلاسیک کاهش یافته است. این کاهش به علت احتمال تأمین نیاز در هر دوره به میزانی

بدین ترتیب مدل فازی تعداد ماه‌هایی که نیاز در آن‌ها اصلاً تأمین نمی‌شود را از ۱۸ درصد به ۵ درصد کاهش داده است. همچنین در تأمین نیاز سوم، مدل کلاسیک ۴۸ درصد ماه‌ها نیاز را به‌طور کامل تأمین کرده و در ۵۲ درصد از مواقع تأمین نیاز صفر است، درحالی‌که در مدل فازی در ۳۲ درصد از مواقع تأمین کامل نیاز صورت می‌گیرد و ۱۱ درصد از مواقع تأمین بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد بوده و در ۳۵ درصد تأمین نیاز صفر می‌گردد. به این ترتیب مدل فازی در تأمین نیاز سوم نیز با کاهش تعداد ماه‌های تأمین صفر از ۵۲ درصد به ۳۵ درصد باعث بهبود عملکرد سیستم می‌گردد.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

این پژوهش بر پایه مدل آبدهی بوده و با ایجاد تغییراتی در مدل شامل

- 12- Over-Year Storage
- 13- Within-Year Storage
- 14- Crisp Border
- 15- Reliability
- 16- Resiliency
- 17- Vulnerability
- 18- Cumulative Demand Function

## ۵- مراجع

- Ahmadianfar I, Adib A, Taghian M (2016) Determination of optimization hedging rule using fuzzy set theory for multi-reservoir operation. *International Journal Of of Optimization In in Civil Engineering* 6(1):27-42
- Alimohammadi S (1997) Stochastic models for operation of multiobjective reservoirs. In: iranian hydraulic conference, May, K. N. Toosi University of Technology, Tehran (in Persian)
- Adib A, MohammadiMajd A (2009) Optimization of reservoir volume by yield model and simulation of it by dynamic programming and markov chain method. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences* 5(6):796-803
- Dahe PD, Serivastava DK (2002) Multireservoir multiyield model with allowable deficit in annual yield. *Journal of Water Resources Planning and Management* 128(6):406-4014
- Dandy GC, Connarty MC, Loucks DP (1997) Compersion of methods for yield assessment of multiple reservoir systems. *Journal of Water Resources Planning and Management* 123(6):350-358
- Hashimoto T, Loucks DP, Stedinger JR (1982) Robustness of water resources systems. *Journal of Water Resources Research* 18(1):21-26
- Mousavi J, Karamouz M, Menhadj M, (2004) Fuzzy-state stochastic dynamic programing for reservoir operation. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(6):460-470
- Loucks DP, Stedinger JR, Haith DA (1981) *Water resource systems planning and analysis*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 559 P
- Loucks DP, vanBeek E (2005) *Water resources systems planning and management and applications*. UNESCO, Paris, France, 680 P
- Loucks DP (1976a) Stochastic models for reservoir design,; in stochastic. approach Approach to Water Resources., H. W. Shen, Fort Collins, Colo., .440p
- Loucks DP (1976b) Surface water quantity management,; in system. aApproach to Water Management, McGraw-Hill, New York, 445p

کمتر از ۱۰۰ درصد بوده که در محاسبه میانگین اعتمادپذیری معادل صفر در نظر گرفته می‌شود.

- ارزیابی معیار برگشت‌پذیری نشان داد استفاده از مدل فازی به جای مدل کلاسیک، باعث کاهش ۸ درصدی میانگین برگشت‌پذیری در نیاز قطعی، ۲۳ درصدی در نیاز ثانویه و ۱/۸ درصدی در نیاز سوم نسبت به مدل کلاسیک شده است.

- بررسی آسیب‌پذیری نشان می‌دهد مدل فازی با کاهش میانگین ۶ درصد در تأمین نیاز قطعی، ۵۴ درصد نیاز ثانویه و ۱۸ درصد نیاز سوم باعث بهبود عملکرد سیستم شده است.

- یکی از تفاوت‌های عمده مدل فازی با مدل کلاسیک تأمین نیاز در باند فازی است که نتایج آن در محاسبه معیارهای ارزیابی مانند اعتمادپذیری و بازگشت‌پذیری تأثیرگذار می‌باشد. در مدل کلاسیک تأمین نیاز دارای یک بازه گسسته بوده در نتیجه درصد اعتمادپذیری به‌دست آمده نشان می‌دهد چند درصد احتمال دارد نیاز به طور کامل تأمین شود، درحالی‌که در مدل فازی تأمین نیاز به صورت یک بازه پیوسته بین ۰ تا ۱۰۰ درصد می‌باشد؛ ولی در محاسبه معیار اعتمادپذیری و بازگشت‌پذیری با توجه به فرمول‌های موجود برای این دو معیار، تأمین نیاز زمانی که کمتر از ۱۰۰ درصد باشد، صفر در نظر گرفته می‌شود.

- توزیع احتمالاتی تخصیص در تأمین نیاز ثانویه نشان می‌دهد، مدل فازی نسبت به مدل کلاسیک، تعداد ماه‌های تأمین صفر را از ۱۸ درصد به ۵ درصد و در تأمین نیاز سوم از ۵۲ درصد به ۳۵ درصد کاهش داده است.

- در مجموع ملاحظه شد که منحنی فرمان فازی عملکرد مناسب‌تری نسبت به منحنی فرمان کلاسیک از خود نشان می‌دهد.

## پی‌نوشت‌ها

- 1- Stochastic Linear Programming (SLP)
- 2- Stochastic Dynamic Programming (SDP)
- 3- Yield Model
- 4- Linear Decision Rule (LDR)
- 5- Standard Operating Procedure (SOP)
- 6- Dynamic Programming (DP)
- 7- Stochastic Dynamic Programming (SDP)
- 8- Fuzzy Stochastic Dynamic Programming (FSDP)
- 9- Artificial Neural Network (ANN)
- 10- Hedging Rules (HRs)
- 11- Interactive Time Series Modelling

- Sinha AK, Rao BV, Laii U (1999) Yield model for screening multipurpose reservoir systems. *Journal of ASCE (WRPM)*, 125(6):325-332
- Srivastava DK, Awchi TA (2009) Storage-yield evaluation and operation of mula reservoir india. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6):414-425
- Stedinger JR , Slue BF, and Pei D (1983) Multiple reservoir system screeninig model. *Journal of Water Resoures Research*, 19(6):1383-1393
- Revelle C (1969) The linear decision rule in reservoir management and design, development of the stochastic model. *Journal of Water Resources Research*, 5(4):767-777
- Pattewar D, Sharma K, Dahe, P (2013) Yield estimation for a single purpose multi-reservoir system using LP based yield model. *Journal of Water Resource and Protection*, 5(7):28-34
- Salas JD, Delleur JW, Yevjevich V, Lane WL (1980) *Applied modeling of hydrologic time series*. Littleton, Colorado, 484 p