



دانشگاه محمدتقی میرزا گلپایگان

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک  
جلد هجدهم، شماره چهارم، ۱۳۹۰  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## بهره‌برداری از مخزن سد با استفاده از سیستم استنتاج فازی و خوشه‌بندی (مطالعه موردی: سد ایلانجق)

مینا حسین پورطهرانی<sup>۱</sup>، \*بیژن قهرمان<sup>۲</sup>، کامران داوری<sup>۳</sup> و حسین انصاری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup>دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد،  
<sup>۲</sup>مشهد، <sup>۳</sup>دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، <sup>۴</sup>استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد  
تاریخ دریافت: ۸۹/۱/۱۷؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱۰

### چکیده

در این مطالعه مدل منطق فازی با استفاده از برنامه‌ریزی غیرخطی برای ایجاد مجموعه‌ای بهینه برای تولید پایگاه داده فازی به منظور بهره‌برداری بهینه از مخزن سد ایلانجق با هدف آبیاری سه محصول کشاورزی (گندم، جو، سورگوم) در درگز واقع در شمال شرق ایران پیشنهاد شده است. مدل منطق فازی به دست آمده می‌تواند ویژگی‌های مهمی از سیستم از مجموعه جفت داده‌های ورودی-خروجی که از مدل غیرخطی به دست می‌آید را استخراج کرده و به عنوان قواعد بهره‌برداری عمومی در سال‌های آتی مورد استفاده قرار دهد. اما افزایش اعضاء مجموعه‌های فازی و متعاقباً افزایش تعداد قواعد، تصمیم‌گیری در این فضا را مشکل کرده و بنابراین نقطه ضعفی جدی برای این مدل‌ها محسوب می‌شود. بر این اساس، راه حلی بر پایه خوشه‌بندی جهت تولید تعداد محدودی قاعده، با حداکثر اهمیت پیشنهاد شده است. مدل توسعه یافته فازی که با استفاده از روش خوشه‌بندی در این مطالعه پیشنهاد شده، از دو لحاظ دارای اهمیت است. این مدل نه تنها از نظر آسان‌تر و قابل فهم کردن سیستم استنتاج فازی اهمیت دارد، بلکه با استفاده از تعداد قواعد محدودتر، قواعد بهره‌برداری معنادارتری را در اختیار بهره‌بردار قرار می‌دهد. مدل ارائه شده به طور سالانه و با گام‌های زمانی ماهانه و حجم اولیه مخزن در ابتدای سال زراعی طرح‌ریزی شده است. نتایج نشان داد که تغییرات رهاسازی

\*مسئول مکاتبه: [bijangh@um.ac.ir](mailto:bijangh@um.ac.ir)

در هر دو مدل مشابه است به گونه‌ای که در طول یک دوره ۱۲ ماهه،  $R^2=0/97$  بوده و در هر دو مدل تغییرات رهاسازی از ماه مهر تا ماه اردیبهشت به تدریج افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. اما به‌طورکلی میزان آب رهاسازی شده در مدل فازی تقریباً کمتر از مدل غیرخطی به دست آمده است، به‌خصوص در ماه‌های پر رقابت اردیبهشت و خردادماه که میان سه گیاه کاشته شده رقابت بر سر آب به حداکثر خود می‌رسد، درصد کاهش آب به متوسط درصد کاهش سالانه به ترتیب برابر  $0/57$  و  $0/81$  در مرحله آموزش و  $0/93$  و  $1/145$  در مرحله آزمون می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بهره‌برداری مخزن، برنامه‌ریزی غیرخطی، مدل فازی، خوشه‌بندی، رهاسازی

#### مقدمه

کمبود آب و رشد نیاز آبی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک، یکی از مسائل مهم و مورد بحث در سراسر دنیا محسوب می‌شود. بنابراین توجه به مدیریت منابع محدود آبی در سیاست‌های بهره‌برداری مخزن به‌منظور افزایش تولید محصول لازم و ضروری می‌باشد. برای اختصاص بهینه آب آبیاری، روش‌های مختلفی بر اساس تقسیم‌بندی روش‌های بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی پویا و غیرخطی توسعه یافته است. هرکدام از این روش‌ها، در محیط قطعی و غیرقطعی و با اهداف برنامه‌ریزی و بهره‌برداری در محیط واقعی به‌کار گرفته می‌شوند. بنابراین هر روش خواص و ویژگی‌های مخصوص به‌خود را دارد که آن‌را از بقیه متمایز می‌کند. هرچند ویژگی‌های مشترکی در تمامی آن‌ها موجود است (سیمونوویچ، ۱۹۹۲). به‌عنوان مثال، برای برنامه‌ریزی بهره‌برداری مخزن با اهداف کشاورزی با استفاده از یک گیاه، دادلی و همکاران (۱۹۷۱)، دادلی و بورت (۱۹۷۳)، براس و کوردوا (۱۹۸۱) و با کاشت چندین محصول، راثو و همکاران (۱۹۹۰)، ودولا و موجومدار (۱۹۹۲) از مدل برنامه‌ریزی پویای دومرحله‌ای DP-SDP (ساده در مرحله اول و استوکاستیک در مرحله دوم) به منظور سیاست‌های بهره‌برداری مخزن بهینه پایدار استفاده کردند (ودولا و کومار، ۱۹۹۶).

استفاده از برنامه‌ریزی خطی دومرحله‌ای که برای هر محصول بیلان رطوبتی خاک را به‌طور مستقل در نظر گرفته و به کمک آن تبخیر- تعرق واقعی هر گیاه را ردیابی می‌کند نیز در منابع وجود دارد (ردی و کومار، ۲۰۰۷). این نکته نیز قابل توجه است که در مدل‌های بهره‌برداری سالانه (کوتاه‌مدت) مخزن، روش‌هایی بر اساس SDP در افزایش سود بلندمدت از سیستم‌های آبیاری و مدل‌های

برنامه‌ریزی خطی، دارای محدودیت‌هایی است، زیرا تمامی روابط میان متغیرها به‌طور خطی فرض می‌شود که در شرایط واقعی این‌گونه نمی‌باشد (ردی و کومار، ۲۰۰۷). از میان روش‌های یاد شده بالا، روش غیرخطی نسبت به سایر روش‌های یاد شده، از فرمول ریاضی کلی‌تری در مسائل مخزن برخوردار است (سیمونوویچ، ۱۹۹۲). قهرمان و سپاسخواه (۲۰۰۲) مدل دو مرحله‌ای NLP-SDP را با هدف حداکثر کردن درآمد کل مزرعه در یک فصل در مرحله اول و در مرحله دوم سیاست‌های بهره‌برداری عمومی برای فصل‌های آینده در طول سال ارائه کردند. ردی و کومار (۲۰۰۸) همچنین مدل چندهدفه تکاملی را برای سیستم‌های مخازن آبیاری چند محصولی پیشنهاد دادند. در این مدل آن‌ها به این نتیجه رسیدند که به‌دلیل تأثیر قابل ملاحظه شرایط هیدرولوژیکی در سود خالص و الگوی کشت استفاده از این مدل می‌تواند برای برنامه‌ریزی آبیاری و سیاست‌های مخزن برای انتخاب بهترین راه‌حل ممکن مفید باشد. مدل‌های شبیه‌سازی معمولاً به‌عنوان نماینده سیستم‌های فیزیکی به منظور پیش‌بینی پاسخ سیستم تحت مجموعه‌ای از شرایط شناخته می‌شوند. با آنکه مدل‌های شبیه‌سازی، قادر به ایجاد راه‌حل‌های بهینه در مسائل مخزن به‌طور مستقیم نیستند، با چندین بار اجرای یک مدل، با سیاست‌های تصمیم‌گیری جایگزین، می‌توان به راه‌حلی بهینه و نزدیک به مقدار بهینه رسید (سیمونوویچ، ۱۹۹۲). استفاده از مفاهیم منطق فازی در مدل‌های با متغیرهای کنترل یک خروجی و چند ورودی در مدل‌های استوکاستیکی رو به گسترش است (موسوی و همکاران، ۲۰۰۷). روش‌های مختلفی برای استخراج قواعد از مشاهدات در بهره‌برداری از مخزن برای ایجاد پایگاه قواعد فازی وجود دارد. در تحقیقات اخیر دانش خبره همراه با مدل‌های استوکاستیک (ضمنی یا غیرضمنی) استفاده می‌شود (موسوی و همکاران، ۲۰۰۵).

به جهت پیچیدگی مدل‌های بهینه‌سازی و میزان انحرافی که نتایج آن‌ها از مدل‌های واقعی دارند، این مدل‌ها همراه با مدل‌های شبیه‌سازی نتایج بهتری را در مسائل با پیچیدگی‌های فیزیکی، اقتصادی و اجتماعی در سیستم‌های مخزن ارائه می‌کنند. مدل‌های شبیه‌سازی امکان فهم بهتر و قواعد بهره‌بردارانه منعطف‌تری را در اختیار بهره‌بردار مخزن می‌گذارد (دپیک و سیمونوویچ، ۲۰۰۰). موسوی و همکاران (۲۰۰۷) پایگاه قواعد فازی را برای ایجاد قواعد بهره‌برداری در مسائل بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن مورد آزمایش قرار دادند. این مدل، مدل بهینه‌سازی استوکاستیکی ضمنی با جریان‌های تولید شده مصنوعی سالانه می‌باشد. این مدل بر این اساس است که چه میزان آب باید از مخزن در هر دوره زمانی رهاسازی شود، به گونه‌ای که مجموع انحراف کل رهاسازی از رهاسازی مطلوب به کم‌ترین

مقدار برسد بنابراین مجموعه بهینه به دست آمده از مدل موسوی، در ایجاد قواعد بهره‌برداری با استفاده از پایگاه قواعد فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. رانی و موریرا (۲۰۱۰) روش‌های مختلفی برای مدل‌های شبیه‌سازی و بهینه‌سازی در سیستم‌های بهره‌برداری مخزن ارائه کردند. آن‌ها مقالات مختلفی را درباره کاربرد مدل‌های شبیه‌سازی مانند محاسبات تکاملی، تئوری مجموعه فازی و شبکه‌های عصبی مصنوعی، روش‌های بهینه‌سازی کلاسیک و مدل‌های ترکیبی بهینه‌سازی و شبیه‌سازی مورد مطالعه قرار دادند. این مطالعه در راستای تحقیقات آینده به منظور تصمیم‌گیری بر روی بهترین روش در کاربرد سیستم‌ها موثر است.

در طول چند دهه اخیر در بهره‌برداری بهینه از مخازن، راه‌حل‌های سیستمی به‌طور گسترده‌ای جایگزین روش‌هایی شده‌اند که به‌طور مستقیم از روش‌های ریاضی و مدل‌های شبیه‌سازی بهره می‌برند. با وجود موفقیت‌های زیادی که در زمینه بهره‌برداری از مخازن به دست آمده، انطباق تکنیک‌های بهینه‌سازی جهت بهره‌برداری در گام‌های زمانی مورد نظر در برنامه‌ریزی بهره‌برداری با مشکلات زیادی مواجه شده است. در بهره‌برداری از مخزن در زمان واقعی (که بهره‌بردار زمانی کوتاهی برای تصمیم‌گیری جهت رهاسازی دارد)، طبق یافته‌های یه (۱۹۸۵) برای ایجاد مدل تصمیم و تکنیک مورد استفاده، تنها سیاست‌های بهینه تقریبی در جهت بهبود راه‌حل‌های عملی به کار گرفته می‌شود و آنچه یک راه‌حل را از دیگر راه‌حل‌ها متمایز می‌کند تفاوت‌ها در سرعت هم‌گرایی، محدودیت‌ها و لوازم مورد نیاز محاسباتی است. همچنین مشاهده شده است که گرچه بسیاری از کاربردهای موفقیت‌آمیز رویکردهای سیستم‌ها در تحقیقات گذشته به دست آمده است، اما بهره‌برداران مخازن در تطابق این تکنیک‌های بهینه‌سازی جهت بهره‌برداری روزانه به اطمینان کامل نرسیده‌اند (لبادی، ۲۰۰۴). بنابراین تلاش در جهت بهبود و ساده کردن عملیات محاسباتی به تنهایی نمی‌تواند کارا باشد و قابلیت سازگاری و پذیرش آن توسط بهره‌بردار مخزن نیز باید مدنظر قرار گیرد. در سال‌های اخیر، روش‌های منطق فازی، به‌عنوان نوعی از مدل‌های شبیه‌سازی به‌صورت قواعد اگر-آن‌گاه نقش موثری در ساده کردن مدل‌های توابع غیرخطی با انواع ساده‌تر آن پیدا کرده‌اند (شرستا و همکاران، ۱۹۹۶؛ راشل و کمپل، ۱۹۹۶؛ حسابی و ناگایام، ۲۰۰۲؛ پانیگراهی و موجومدار، ۲۰۰۰؛ دوبروین و همکاران، ۲۰۰۲). با آنکه در سال‌های اخیر تکنیک‌های منطق فازی، با تشکیل قواعد اگر-آن‌گاه فازی (با توجه به شباهت دانش بشر به متغیر زبانی به کار رفته در منطق فازی) سهم به‌سزایی در ساده کردن توابع پیچیده غیرخطی و جایگزینی آن‌ها با مدل‌های ساده‌تر داشته‌اند و گام‌های موثری در

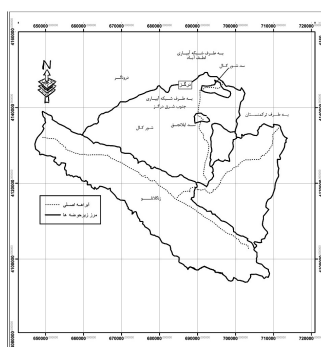
ارایه راه‌حل‌های روشن‌تر برداشته‌اند اما قابلیت سازگاری آن‌ها با فهم و درک بهره‌بردار چندان مورد توجه قرار نگرفته است. همچنین با وجود پیشرفت‌های زیادی که در زمینه بهره‌برداری با استفاده از سیستم‌های استنتاج فازی به‌دست آمده، اما حجم زیاد قواعد فازی از نقاط ضعف آن به شمار می‌آید (سیواپراگاسام و همکاران، ۲۰۰۷). با این حال هنوز هم استخراج قواعد فازی به‌دلیل گستردگی قواعد آن، دشوار است و با دشواری‌های فراوانی همراه می‌باشد و بنابراین یک خلاء تحقیقاتی وجود دارد. براساس مطالعه سیواپراگاسام و همکاران (۲۰۰۷) یک راه موثر جهت کاهش قواعد استفاده از تعداد کم‌تری مجموعه فازی با تقسیم مجموعه داده‌های آموزش داده شده به تعداد خوشه‌هاست، به‌گونه‌ای که در هر خوشه تقسیم‌بندی به‌گونه‌ای صورت گیرد که داده‌های ورودی مشابه در یک گروه قرار گیرند.

هدف این مقاله که بر اساس مطالعه سیواپراگاسام و همکاران (۲۰۰۷) طرح‌ریزی شده است، استفاده از تابع عضویت مثلثی ساده همراه با تکنیک خوشه‌بندی به‌منظور کاهش و متراکم کردن قابل ملاحظه قواعد می‌باشد، با این تفاوت که در این مطالعه ساختار خوشه‌بندی بر اساس خوشه اصلی و زیر خوشه‌ها و توسط الگوریتم خوشه‌بندی K-mean بنا شده است. هدف از این مطالعه ترکیب دو مدل به‌دست آمده از مدل قهرمان و سپاسخواه (۲۰۰۴) در تولید تابع هدف در سطح مزرعه و مدل فازی با استفاده از مدل موسوی و همکاران (۲۰۰۵) در سطح مخزن می‌باشد. مدل بهره‌برداری مخزن بر اساس مدل فازی به‌وسیله برنامه‌ریزی غیرخطی به‌منظور به‌دست آوردن مجموعه‌ای بهینه از چندین محصول استفاده شده است. در این مطالعه سری داده‌های تولید شده هیدرولوژیکی، حجم مخزن و نیازهای پایین‌دست مخزن سد به‌صورت ماهانه به‌عنوان ورودی‌های برنامه بهینه‌سازی غیرخطی و رهاسازی ماهانه از مخزن سد، به‌عنوان خروجی از برنامه بهینه‌سازی غیرخطی به‌صورت جفت داده‌های ورودی- خروجی وارد مدل خوشه‌بندی شده و متعاقباً قواعد فازی به‌طور جداگانه برای هر خوشه تولید می‌گردد. متغیرهای ورودی- خروجی به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی غیرخطی، در هر خوشه با یک تابع عضویت منفرد مثلثی تعریف می‌گردند.

## مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** ایلانجق، مخزن تک منظوره در استان خراسان به‌عنوان گزینه مورد مطالعه انتخاب شده است. حوضه آبریز دشت درگز به وسعت ۳۱۲۹ کیلومترمربع در شمال ارتفاعات الله اکبر قرار

گرفته است. رودخانه زنگلانلو از کوه‌های جنوب شرقی ناحیه درگز سرچشمه گرفته و پس از عبور از قسمت شرقی ناحیه درگز در شمال روستای شمسی‌خان وارد ترکمنستان می‌شود. سد ایلانجق به عنوان مطالعه موردی در این پژوهش موردنظر است و به منظور تأمین آب کشاورزی طراحی گردیده است. شکل ۱ پیکربندی شماتیک سیستم منابع آب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- پیکربندی شماتیک سیستم منابع آب در محدوده طرح با احتساب رودخانه درونگر.

داده‌های کوتاه‌مدت برای دوره آموزش و آزمون: سیصد نمونه داده‌های ماهانه جریان ورودی که به‌طور مصنوعی با استفاده از روش فرگمنت تولید شده (سریکانتان و همکاران، ۲۰۰۶) به‌عنوان داده‌های ورودی در برنامه‌ریزی غیرخطی مورد توجه قرار گرفته است. در گام اول، با شبیه‌سازی داده‌های بارندگی استوکاستیکی سالانه و ماهانه به‌گونه‌ای که داده‌های تولید شده از تابع توزیع یکسانی با داده‌های تاریخی برخوردار باشد. بارندگی ماهانه و سالانه موجود در ایستگاه درگز با ۱۵ سال داده‌های آماری، با استفاده از روش ذکر شده شبیه‌سازی شده‌اند. مدل مارکف نوع اول برای داده‌های سالانه و روش فرگمنت برای داده‌های ماهانه مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین، ۵ حالت حجم اولیه مختلف مخزن (خالی، پر و ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ برابر حجم مخزن) در ابتدای فصل زراعی (اول مهرماه) مورد نظر است و بنابراین با ۵ حالت حجم اولیه مخزن و ۳۰۰ سال داده تولید شده، ۱۵۰۰ داده در برنامه‌ریزی بهره‌برداری از مخزن در مطالعه حاضر مورد توجه می‌باشد. به‌منظور ارزیابی میزان آب که باید از مخزن سد با هدف کشاورزی به‌طور ماهانه رهاسازی شود، میزان آب رهاسازی ماهانه از مدل غیرخطی (قهرمان و سپاسخواه، ۲۰۰۲) به‌عنوان داده‌های خروجی استخراج می‌شود. بنابراین،

جریان ورودی، نیاز و حجم اولیه مخزن به عنوان متغیرهای مستقل (ورودی) و رهاسازی استخراج شده از مدل غیرخطی به عنوان متغیر وابسته (خروجی) در نظر گرفته می شوند. مجموعه بهینه به دست آمده از روش غیرخطی، در ایجاد قواعد عمومی بهره برداری با استفاده از منطق فازی، هرکدام با افق برنامه ریزی ۳۰۰ ساله به کار می رود. این داده های به دست آمده از روش غیرخطی به دو قسمت تقسیم می شوند. از میان ۱۵۰۰ سال جفت داده ورودی-خروجی، نیمی از آن در آموزش داده ها استفاده شده، در حالی که نیمه دوم آن در آزمون مدل فازی کاربرد دارد.

استفاده از برنامه ریزی غیرخطی به عنوان ابزار بهینه سازی: در این پژوهش از یک مدل بهینه سازی حداکثر سود خالص اراضی پایاب در بهره برداری از یک سد استفاده شده است. بیلان آب در خاک ردیابی نمی شود و نسبت تبخیر-تعرق واقعی به تبخیر-تعرق پتانسیل را با نسبت مقدار آب داده شده به آب مورد نیاز تقریب می زنیم. متعاقباً درجه حساسیت به آب سه گیاه زراعی مورد نظر در مراحل مختلف رشد با استناد به تحقیقات گذشته (قهرمان و سپاسخواه، ۱۹۹۹؛ دورنباس و کسام، ۱۹۷۹)، در مقیاس ماهانه محاسبه می شود. حداکثر کردن سود خالص ناشی از کاشت تمامی گیاهان در یک الگوی کشت انتخابی با مساحت زیر کاشت مورد نظر، هدف اصلی می باشد (قهرمان، سپاسخواه، ۲۰۰۴).

$$MAX : \sum_{k=1}^f \sum_c A_c [B_c (Y_a/Y_p) - C_c] \quad (1)$$

که در آن  $f$  تعداد مزارع (که در مطالعه حاضر یک در نظر گرفته شده است)،  $A_c$ ،  $C_c$  و  $B_c$  به ترتیب مساحت های تحت کشت سه گیاه گندم، جو و سورگوم به ترتیب درآمد و هزینه در واحد سطح گیاه مورد نظر (ریال در هکتار)،  $Y_a$  و  $Y_p$  به ترتیب عملکرد محصول واقعی و محصول پتانسیل (کیلوگرم در هکتار)،  $Y_a/Y_p$  عملکرد محصول تولیدی نسبی (تابع تولید محصول از آب - بدون بعد) است. در این رابطه تنها متغیر  $Y_a$  مجهول است و بقیه متغیرها قابل اندازه گیری ( $A_c$ ،  $C_c$  و  $B_c$ ) یا قابل محاسبه ( $Y_p$ ) می باشند. برای محاسبه تابع عملکرد نسبی، درجه حساسیت محصولات کاشته شده به آب با استفاده از مدل تعمیم یافته دورنباس و کسام (۱۹۷۹) و تبدیل آن به مقیاس ماهانه و به صورت زیر تعریف شده است:

$$\frac{y_a}{y_p} = \prod_{i=1}^N \left[ 1 - K_{yi} \left( 1 - \frac{ET_a}{ET_p} \right) \right] \quad (2)$$

رابطه بالا به تابع عملکرد محصول معروف بوده که در آن  $i$  مراحل مختلف رشد،  $N$  تعداد مراحل رشد در نظر گرفته شده،  $K_{yi}$  ضریب فاکتور رشد در مرحله  $i$  و  $ET_a$  و  $ET_p$  به ترتیب تبخیر و تعرق واقعی و حداکثر است. با توجه به چگونگی رشد گیاهان، سال به دو فصل نامساوی خواب و بیداری تقسیم می‌شود. در فصل خواب هیچ گیاه تابستانه‌ای در زمین وجود ندارد و کلیه گیاهان زمستانی در خواب‌اند ولی در فصل بیداری امکان رشد کلیه گیاهان وجود دارد. فصل خواب در منطقه مورد مطالعه از اول آذر تا آخر بهمن است و برنامه‌ریزی جهت رهاسازی در این سه ماه انجام نمی‌گیرد. سه گیاه پیشنهادی در منطقه جنوب شرق درگز، گندم و جو (گیاهان زمستانه) و سورگوم (گیاه تابستانه) می‌باشد. رقابت برای آب بین گیاهان زمستانه گندم و جو و گیاه تابستانه سورگوم از یک سو و رقابت کلی میان این سه گیاه در حوالی زمان‌های کاشت گندم و جو و برداشت سورگوم از سوی دیگر نیاز به برنامه‌ریزی آبیاری دقیق‌تری را می‌طلبد. استفاده از شیوه کم‌آبیاری جهت حداکثر کردن نسبت محصول تولیدی با در نظر گرفتن کاهش محصول ناشی از عدم تأمین آب کافی گیاهان از موارد در نظر گرفته شده در مسأله است.

بیان آب در مخزن بر اساس معادله پیوستگی زیر استوار می‌باشد:

$$V_{t+1} = V_t + Q_t + REL_t - EVP_t - OVF_t + RAIN_t \quad (3)$$

که در آن  $V_t$  و  $V_{t+1}$  حجم ذخیره آب در مخزن (مترمکعب) به ترتیب در ابتدا و انتهای دوره زمانی  $t$ ،  $Q_t$  حجم جریان ورودی به مخزن (مترمکعب) در دوره زمانی  $t$ ،  $REL_t$  حجم آب خروجی از مخزن برای آبیاری (مترمکعب) در این دوره زمانی،  $OVF_t$  حجم آب سرریز شده (مترمکعب) در دوره زمانی  $t$ ، مقدار بارندگی باریده شده بر سطح مخزن (مترمکعب)، و  $ETP_t$  حجم آب تبخیر شده از مخزن مقادیر معلوم مساله هستند و سایر متغیرها مجهول‌اند. حجم آب باقی‌مانده در مخزن سد در هر دوره زمانی محدود به دو مقدار حداکثر مخزن و حجم مرده مخزن می‌باشد:

$$V_{dead} \leq V_t \leq V_{max} \quad (4)$$

راندمان انتقال ( $E_c$ ) که از خصوصیات محلی کانال‌های انتقال بر آورد می‌شود  $0.9$  در نظر گرفته شده است، حجم آب خروجی از مخزن،  $REL_t$  را به مجموع آب قابل تخصیص برای گیاهان،  $IR_t$  تبدیل می‌کند:

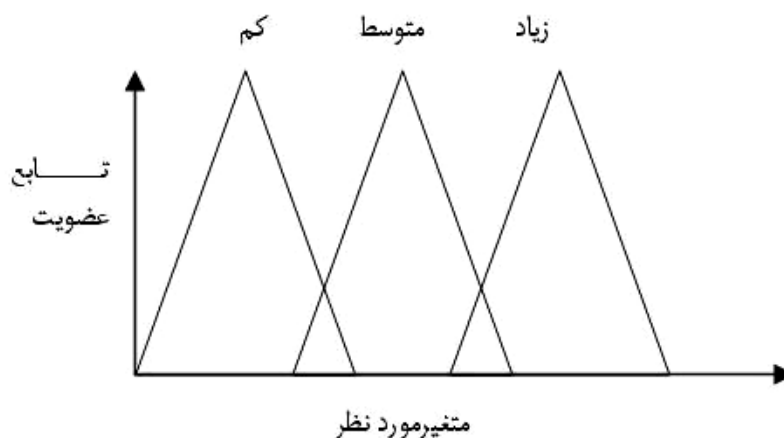
$$IR_t = E_c REL_t \quad (5)$$



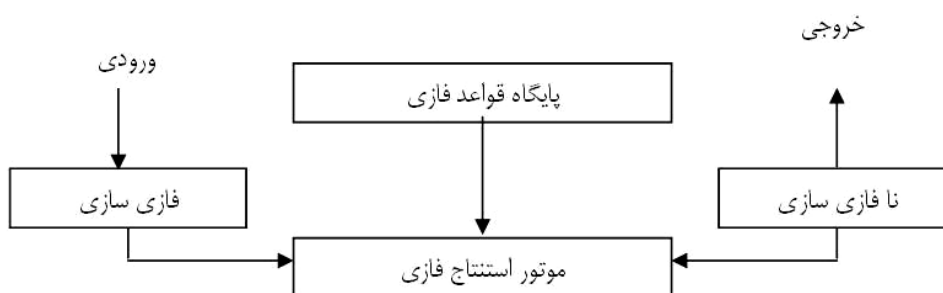
کل آب تخصیص یافته برای گیاهان،  $IR_t$ ، باید به طور کامل بین گیاهان زراعی پایین دست تقسیم شود:

$$\sum_c IR_{c,t} AREA_c = IR_t \quad (6)$$

اجرای مدل برنامه ریزی غیرخطی با در نظر گرفتن حجم های اولیه مختلف مخزن: سناریوهای مختلفی به منظور تطبیق با مدل غیرخطی مورد آزمایش قرار گرفت زیرا حجم های مختلفی از آب در مخزن در ابتدای سال امکان دارد اتفاق بیفتد. از میان سناریوهای مختلف، ۵ گزینه حجم اولیه مخزن به صورت زیر بیان شده است: مخزن خالی (حجم مرده)، پر، ۰/۲۵، ۰/۵ و ۰/۷۵ برابر حجم پر مخزن. به کارگیری مدل منطق فازی در بهره برداری بهینه از مخزن: سیاست های بهره برداری بهینه مخزن که با استفاده از بهینه سازی غیرخطی به دست می آیند، به عنوان مجموعه داده های ورودی - خروجی جهت واسنجی قواعد فازی در سیستم استنتاج فازی ممدانی مورد استفاده قرار می گیرند (وانگ و ژین، ۱۹۹۷). مدل های استنتاج فازی به صورت قواعد اگر - آنگاه فازی ارتباط میان قسمت مقدمه (جریان ورودی، نیاز پایین دست، حجم مخزن) و قسمت نتیجه (متغیر وابسته، رهاسازی از مخزن) را برقرار می کنند. بنابراین تصمیم گیری در دو مرحله صورت می گیرد. در مرحله اول متغیرهای ورودی - خروجی (جریان ماهانه ورودی به مخزن، حجم مخزن و نیاز پایین دست به عنوان متغیر ورودی و رهاسازی به عنوان متغیر خروجی) با استفاده از یکی از توابع عضویت، همانند شکل ۲ فازی سازی می شوند. در مرحله دوم متغیرها جهت ایجاد قواعد فازی و با استفاده از عملگر اشتراک "و" و با وزنی برابر در تمامی قواعد برای متغیرهای ورودی ترکیب می شوند. شکل ۳ نحوه عملکرد یک سیستم استنتاج فازی را نشان می دهد.



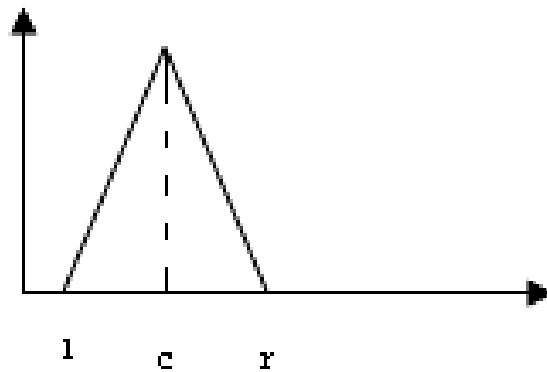
شکل ۲- توابع عضویت فازی در یک ماه مشخص با استفاده از مدل فازی معمول.



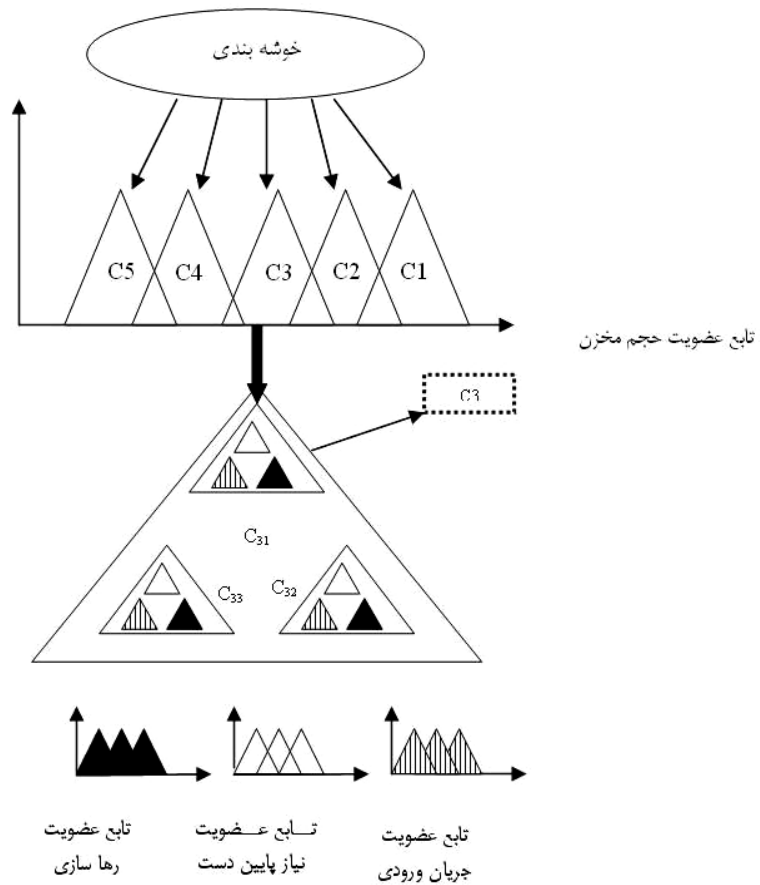
شکل ۳- شمای کلی از یک سیستم فازی.

به کارگیری روش خوشه‌بندی به منظور بسط مدل فازی: با توجه به آن‌که تعداد قواعد فازی بستگی مستقیمی به تعداد مجموعه‌های فازی دارد، به طور قطع راه موثر جهت کاهش قواعد، به کارگیری تعداد کم‌تری مجموعه فازی با تشکیل ساده‌ترین مجموعه ممکن و تنها یک تابع عضویت می‌باشد. تعداد خوشه‌ها بسته به دقت مورد انتظار و سهولت در تفسیر آن توسط ذهن بشری قابل تغییر است (سیواپراگاسام و همکاران، ۲۰۰۷). برای هر جفت داده ورودی- خروجی، یک قاعده ساده در سیستم فازی بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. با افزایش جفت داده‌های ورودی- خروجی، تعداد قواعد فازی نیز افزایش می‌یابد که دو مسئله را به همراه دارد: ایجاد قواعد فازی وقت‌گیر بوده و امکان افزایش

خطاهای سیستماتیک نیز در مساله وجود دارد. بنابراین، روش خوشه‌بندی که جفت داده‌های ورودی-خروجی را به خوشه‌های همسان تقسیم‌بندی می‌کند، روش موثری برای کاهش قواعد در سیستم‌های استنتاج فازی به‌شمار می‌آید. روش کار به این صورت است که متغیرهای ورودی مشابه در خوشه‌های همسان قرار می‌گیرند. بنابراین، هر خوشه به‌عنوان نماینده‌ای از یک قاعده مشخص بوده و در نتیجه تعداد قواعد به تعداد خوشه‌ها تقلیل می‌یابد. در این مطالعه، داده‌های آموزش داده شده، به چندین خوشه متفاوت با استفاده از روش K-means تقسیم شده و هر خوشه با استفاده از یک قاعده ساده از دیگر خوشه‌ها متمایز می‌شود. روش خوشه‌بندی K-means که به‌عنوان روشی تقسیم‌کننده مطرح است، اعضاء موجود در داده‌های اصلی را به K خوشه دو به دو ناسازگار تقسیم می‌کند و در نهایت برداری را به‌عنوان خروجی تولید می‌کند که در آن مشخص می‌شود هر عضو به چه خوشه‌ای تعلق دارد. K-means الگوریتمی تکرار شونده را به‌کار می‌برد تا مجموع فواصل اعضاء تا مرکز ثقل در هر خوشه به حداقل ممکن برسد. این الگوریتم اعضاء را میان خوشه‌ها آن قدر جابه‌جا می‌کند تا به مرحله‌ای برسد که دیگر مجموع فواصل تا مرکز ثقل کاهش ننماید. نتیجه، مجموعه‌ای از خوشه‌های کاملاً جدا از هم خواهد بود (شامکوئیان و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به این‌که برنامه‌ریزی با طول دوره ۳۰۰ سال در این پژوهش موردنظر قرار گرفته است، با اجرای ۳۰۰ سال برنامه بهینه‌سازی سالانه در ۵ حالت حجم اولیه مخزن در ابتدای سال زراعی در مجموع ۱۵۰۰ جفت داده ورودی-خروجی تولید گردید. با دو نیم کردن داده‌های ورودی-خروجی به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی، جهت شبیه‌سازی و آزمون مدل فازی، مجموعاً ۷۵۰ سری داده برای برنامه خوشه‌بندی تهیه می‌شود. در هر خوشه برای هر کدام از متغیرهای ورودی و خروجی یک تابع عضویت منفرد فازی توسط بردارهای  $c$  و  $l$  (به‌ترتیب نماینده مرز چپ، مرکز و راست در توابع عضویت مورد نظر هستند) مطابق شکل ۴ ایجاد شد. در واقع هر سری سالانه مرکب از ۱۲ ماه می‌باشد، که در خوشه‌بندی برنامه‌ریزی برای هر ماه به‌صورت جداگانه صورت گرفته است. بنابراین سری‌های مورد استفاده برای خوشه‌بندی ۱۲ سری ۷۵۰ تایی است. روش خوشه‌بندی K-mean در دو مرحله صورت می‌گیرد، در مرحله اول مطابق با حجم اولیه مخزن در ابتدای فصل رشد، حجم مخزن در هر ماه به ۵ خوشه اصلی متفاوت با حجم مشخص جریان ورودی، نیاز و رهاسازی تقسیم‌بندی می‌شود. در مرحله دوم، در هر خوشه اصلی هر متغیر (جریان ورودی، نیاز و رهاسازی) به سه زیرخوشه تقسیم می‌شود. به‌عنوان نتیجه، در هر ماه، ۱۵ قاعده فازی، به منظور تصمیم‌گیری میزان آب رهاسازی شده از مخزن وجود دارد. خوشه‌بندی به‌کار رفته در این مدل به‌طور شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- تابع عضویت تک مثلثی.



شکل ۵- شکل شماتیک خوشه‌بندی در مطالعه حاضر.

ارزیابی مدل منطق فازی

آزمون تعیین صحت خوشه‌بندی: در این مطالعه تعیین صحت تعداد خوشه‌ها با شاخص عرض سیلهوت متوسط مشخص می‌شود. عرض سیلهوت برای هر عضو مورد نظر، معیاری است از این‌که این عضو تا چه اندازه با دیگر اعضا موجود در خوشه مربوطه و اعضا دیگر خوشه‌ها شبیه است. اگر اندازه این معیار برای عضوی به عدد ۱ نزدیک باشد، این عضو در خوشه‌ای مناسب جای گرفته است (شامکوئیان و همکاران، ۲۰۰۹). چنانچه عرض سیلهوت به عدد -۱ میل کند، به معنای انجام یک گروه‌بندی نادرست خواهد بود و اگر این معیار به عدد صفر نزدیک باشد، بیانگر این مطلب است که عضو مورد نظر در فاصله‌ای برابر از دو خوشه واقع شده است. این معیار با استفاده از رابطه ۷ قابل محاسبه می‌باشد (شامکوئیان و همکاران، ۲۰۰۹):

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (7)$$

در این رابطه،  $a(i)$  متوسط فاصله  $i$ امین عضو موجود در یک خوشه با دیگر اعضا آن خوشه،  $b(i)$  حداقل متوسط فاصله  $i$ امین عضو موجود در یک خوشه، با تمامی اعضا خوشه  $j$  ( $j = 1, \dots, k; j \neq k$ )، بوده و در نتیجه  $-1 \leq s(i) \leq 1$  خواهد بود.

ارزیابی عملکرد مدل فازی: بخشی از نتایج مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به‌عنوان داده‌های تاریخی در مدل فازی به منظور تولید قواعد فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به منظور ارزیابی مدل فازی، روند خروجی مدل فازی در مرحله آزمون باید مشابه داده‌های تاریخی در مدل برنامه‌ریزی غیرخطی باشد. همچنین ۳ معیار عملکرد، نظیر  $R^2$ ، MAE و RMSE در معادلات زیر برای ارزیابی عملکرد مدل فازی مورد استفاده قرار می‌گیرد (موسوی و همکاران، ۲۰۰۷):

$$R^2 = \frac{[\sum (r_0 - \bar{r}_0)(r_1 - \bar{r}_1)]^2}{\sum (r_0 - \bar{r}_0)^2 \sum (r_1 - \bar{r}_1)^2} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_0 - r_1| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_0 - r_1)^2} \quad (10)$$

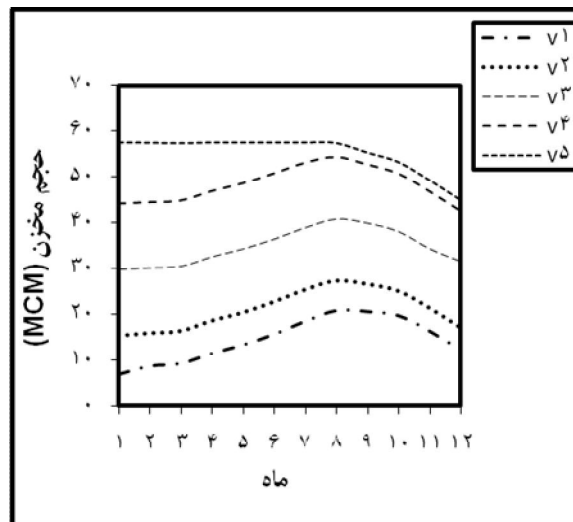
که در آن‌ها  $T_0$  میزان رهاسازی از مخزن با استفاده از مدل غیرخطی است که به‌عنوان مقادیر مشاهده شده (سری تاریخی مشاهدات) در نظر گرفته شده است و  $T_1$  میزان رهاسازی از مخزن با استفاده از مدل فازی است.

### نتایج و بحث

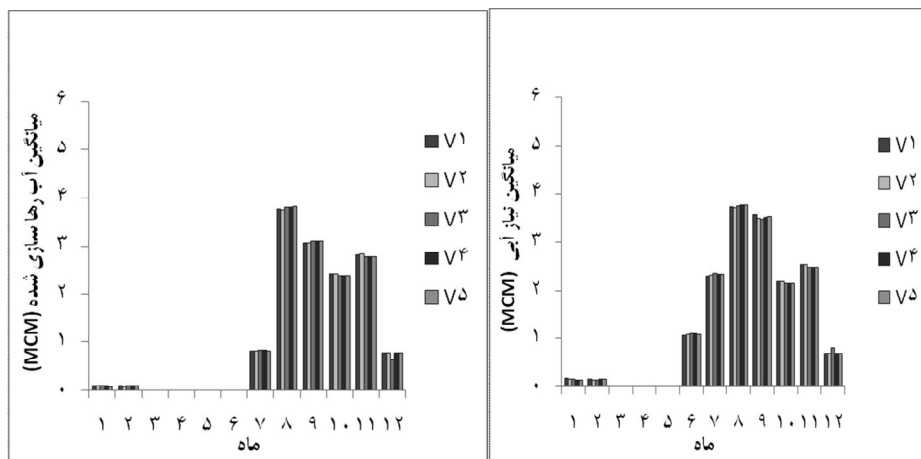
**برنامه‌ریزی غیرخطی:** به‌منظور استنتاج قواعد بهره‌برداری که در آن هدف حداکثر سود خالص ناشی از کاشت گیاهان در مبنای سالانه است، سری‌های زمانی حجم ذخیره، رهاسازی و نیاز آبی گیاهان از مدل بهینه‌سازی استخراج می‌شود. تأثیر حجم آب اولیه در مخزن در ابتدای سال آبی با در نظر گرفتن ۵ حالت ذکر شده در قسمت مواد و روش‌ها اعمال شده است. نتایج حاصل از رهاسازی متناظر با هر گزینه برای حجم آب اولیه در مخزن، بیانگر آن است که برای هر یک از حالات حجم آب اولیه در مخزن، حجم آب در مخزن در ماه‌های مختلف (از مهرماه تا شهریور سال آینده) تغییر می‌کند. این تغییرات مطابق با نیاز آبی ماهانه می‌باشد. شکل ۶ نشان می‌دهد که روند این تغییرات از حجم آب اولیه در مخزن مستقل است؛ زیرا تمامی روند تغییرات حجم آب در مخزن در طول سال تقریباً موازی است. همچنین این نکته نیز قابل ذکر است که حجم آب اولیه در مخزن در ابتدای سال زراعی در میزان حجم آب مخزن در سایر ماه‌ها تأثیرگذار است، به این معنا که حجم آب اولیه حداکثر، نسبت به سایر حالت‌ها در تمامی طول سال دارای حجم آب حداکثر است. با توجه به شکل ۶ حجم آب موجود در مخزن تا ماه‌های ۷ و ۸ (زمانی که حداکثر رقابت میان سه محصول برای تأمین نیاز آبی افزایش می‌یابد) افزایش و سپس به‌دلیل نیاز آبی بیش‌تر و همچنین کاهش میزان جریان ورودی به مخزن، کاهش می‌یابد.

میزان آب رهاسازی شده و نیاز آبی ماهانه از مخزن متناظر با حجم‌های مختلف اولیه آب در مخزن در شکل (۷ الف) نشان داده شده است. مطابق این شکل، حداکثر آب رهاسازی شده با ۵ حالت مختلف حجم اولیه آب در مخزن در ماه اردیبهشت، هنگامی که سه گیاه کاشته شده به آب نیاز دارند، رخ می‌دهد. بنابراین، ذخیره آب در ماه‌های پیشین در مخزن، هنگامی که نیاز آبی مقدار کم‌تری است، منطقی می‌باشد. می‌توان از شکل ۷ (الف) این‌گونه استنتاج کرد که میزان آب رهاسازی شده در یک ماه مشخص تقریباً مستقل از حجم آب اولیه در مخزن است به‌گونه‌ای که با وجود تغییرات حجم آب

اولیه در مخزن، میزان رهاسازی از مخزن از تغییرات مشابهی برخوردار می‌باشد. نتایج ذکر شده برای میزان نیاز آبی ماهانه نیز صادق است (حسین پور طهرانی، ۲۰۰۸).



شکل ۶- مسیرهای مختلف حجم بهینه مخزن، با ۵ حالت حجم اولیه مخزن شامل مرده، حداکثر و ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ برابر حجم حداکثر در ابتدای فصل زراعی (به ترتیب V<sub>1</sub> تا V<sub>5</sub>).



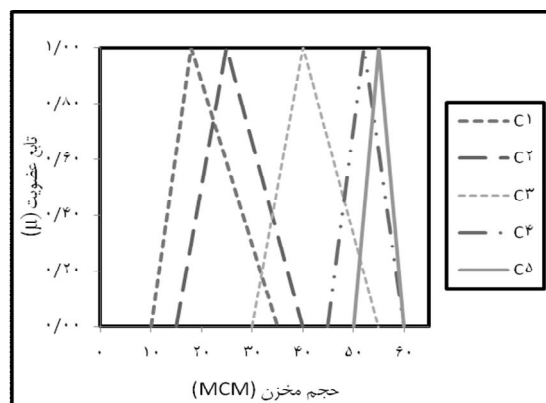
شکل ۷- میانگین رهاسازی (سمت راست) و نیاز آبی ماهانه (سمت چپ) در حالت‌های مختلف حجم اولیه مخزن (از حجم مخزن مرده تا حجم حداکثر).

**مدل منطق فازی:** همان‌طور که پیش از این ذکر شد، نتایج به‌دست آمده از مدل برنامه‌ریزی غیرخطی نشان داد، که حجم آب اولیه در مخزن در ابتدای فصل زراعی، نقش مستقیم و موثری در حجم آب در مخزن در سایر ماه‌ها دارد. همچنین با ارزیابی که از طریق عرض سیلهوت جهت مشابهت اعضا هر خوشه و تمایز آن نسبت به سایر خوشه‌ها انجام شد، این نتیجه به‌دست آمده که حجم آب اولیه در مخزن به‌عنوان یکی از متغیرها، نقش موثرتری نسبت به دو متغیر دیگر بر روی نحوه و تعداد خوشه‌بندی دارد و بنابراین نحوه خوشه‌بندی به‌کار رفته در این مطالعه به این صورت است که حجم آب اولیه در مخزن به‌عنوان خوشه اصلی در این مطالعه در نظر گرفته می‌شود. متعاقباً هر خوشه اصلی دارای ۳ زیر خوشه شامل جریان ورودی، نیاز پایین‌دست و رهاسازی است.

**تابع عضویت برای هر خوشه:** توابع عضویت فازی به‌کار رفته در این مطالعه، توابع عضویت مثلثی است (شکل‌های ۸ و ۹). پارامترهای توابع عضویت مثلثی و میزان همپوشانی این توابع بر اساس میزان فراوانی مقادیر به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی غیرخطی و متعاقباً مقادیر قرار گرفته در خوشه‌ها و زیرخوشه‌های مرتبط با آن حاصل می‌شود. در شکل‌های ۸ و ۹  $\mu$  نمایانگر درجه عضویت فازی و  $C_{i,j}$  نماینده خوشه تحت مطالعه است، به‌طوری‌که  $C$  نماینده خوشه اصلی، اندیس  $i$  شمارنده خوشه و  $j$  شمارنده زیرخوشه در خوشه مورد نظر می‌باشد. به‌عنوان مثال  $C_{12}$  خوشه اول و زیرخوشه دوم متغیر مورد نظر را نشان می‌دهد. نزدیکی مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط متغیر مورد نظر به حدود  $I$  و  $C$  و  $r$  در ۵ خوشه تحت مطالعه، تأییدی بر درستی انتخاب حدود توابع عضویت حجم آب اولیه در مخزن می‌باشد. جدول ۱ مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط حجم آب در مخزن و جدول ۲ مقادیر حداکثر، حداقل و متوسط جریان ورودی، نیاز پایین‌دست و رهاسازی را نشان می‌دهد. در شکل ۸ توابع عضویت حجم آب اولیه در مخزن در ابتدای ماه اردیبهشت به‌عنوان خوشه‌های اصلی رسم گردیده است، بر این اساس، در خوشه  $C_1$  بیش‌ترین درجه عضویت برابر ۱ متعلق به مقدار ۲۰ میلیون مترمکعب و کمترین درجات عضویت برابر صفر مربوط به مقادیر ۱۰ و ۳۵ میلیون مترمکعب می‌باشد و مقدار ۱۵ میلیون مترمکعب درجه عضویتی برابر ۰/۵ دارد. به همین طریق توابع عضویت سایر متغیرها در خوشه‌های مختلف و زیرخوشه‌های مربوط به آن خوشه محاسبه شده است. شکل‌های ۸ و ۹ به‌ترتیب تابع عضویت حجم مخزن با ۰/۲۵ حجم حداکثر در خوشه دوم و زیرخوشه‌های مربوط به آن شامل جریان ورودی به مخزن سد، نیاز پایین‌دست و رهاسازی را نشان می‌دهد. با خوشه‌بندی



متغیرهای ورودی در گروه‌های مختلف، هر متغیر در هر خوشه بیانگر یک مجموعه فازی با یک متغیر زبانی خاص است. با توجه به آن‌که در ماه اردیبهشت (با کاشت سورگوم) رقابت بر سر آب میان سه گیاه بیش‌ترین مقدار می‌باشد، نتایج رهاسازی از مخزن با استفاده از روش فازی در ماه اردیبهشت به‌عنوان نماینده هر سه گیاه گندم، جو و سورگوم ارائه می‌شود.



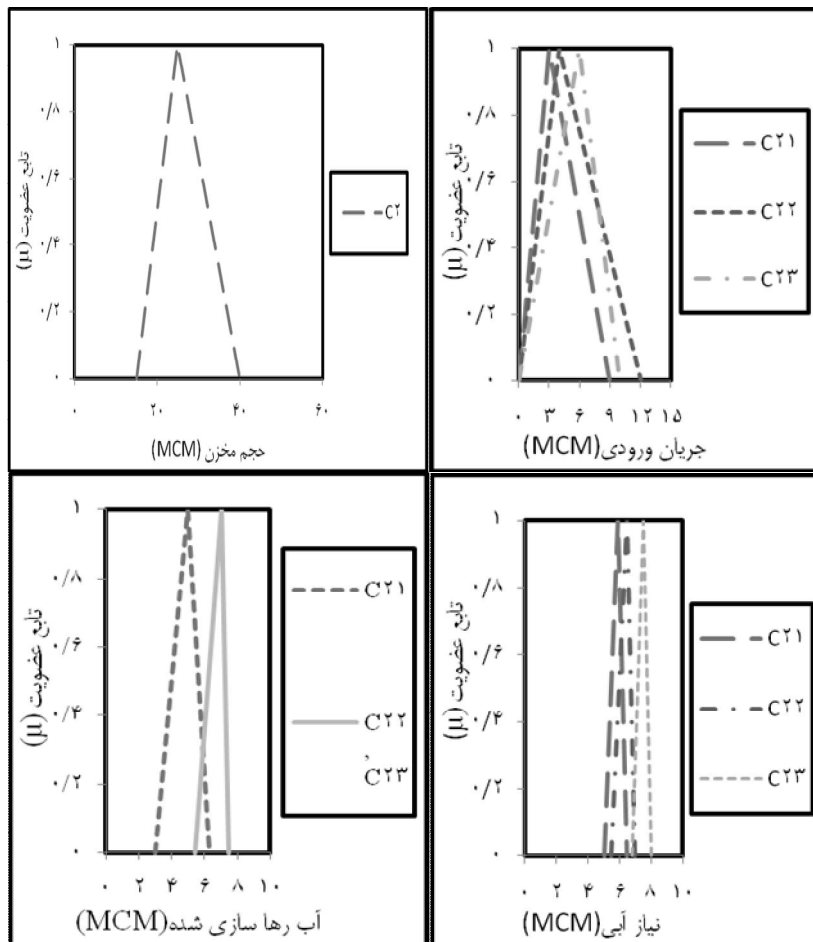
شکل ۸- تابع عضویت حجم اولیه مخزن در ۵ خوشه اصلی (C<sub>1</sub>- C<sub>5</sub>) در ماه اردیبهشت.

جدول ۱- حدود بالا و پایین حجم آب در مخزن در ۵ خوشه ایجاد شده در ماه اردیبهشت (MCM).

حجم مرده	$0.25 V_m$	$0.50 V_m$	$0.75 V_m$	$V_m$	وضعیت حجم مخزن
۲۹/۷۴	۳۷/۱	۵۱/۴۲	۵۷/۵۴	۵۷/۵۴	حداکثر
۲۰/۸۵	۷۲/۲	۴۱	۵۴	۵۷/۰۴	متوسط
۱۳/۷۶	۱۸/۱۷	۲۸/۸۲	۴۳/۱۵	۵۳/۸۵	حداقل

جدول ۲- حدود بالا و پایین جریان ورودی، نیاز پایین دست و رهاسازی در خوشه دوم با نسبت ۰/۲۵ به حجم حداکثر.

زیرخوشه		۱		۲		۳		حدود
رهایسازی	نیاز پایین دست	جریان ورودی	رهایسازی	نیاز پایین دست	جریان ورودی	رهایسازی	نیاز پایین دست	متغیر
۶/۷۷	۶/۴۳	۹/۵۶	۷/۸۶	۷/۳۷	۱۲/۲	۶/۴۳	۶/۳۰	حداکثر
۶/۶۱	۶/۳۶	۳/۶	۶/۷	۷/۳۸	۶/۱۴	۴/۶۸	۶/۰۶	متوسط
۵/۷۳	۵/۶۹	۰/۰۰۰۷	۵/۶۸	۷/۳۸	۰/۰۰۰۸	۳/۵۴	۵/۶۹	حداقل



شکل ۹- تابع عضویت حجم مخزن (در بالا) و جریان ورودی به رودخانه، نیاز آبی و آب رها سازی شده در هر خوشه (شکل‌های پایین، به ترتیب از راست) در ماه اردیبهشت.

ایجاد پایگاه قواعد فازی و تصمیم‌گیری فازی جهت رهاسازی: همان‌طور که در روش‌ها ذکر شد، جهت ساختن قواعد فازی در هر خوشه، هر زیرخوشه یک قاعده مخصوص به خود ایجاد می‌کند که در مجموع به علت آن‌که هر خوشه شامل ۳ زیرخوشه است، ۳ قاعده از هر خوشه به دست می‌آید که در مجموع با داشتن ۵ خوشه اصلی، ۱۵ قاعده برای هر ماه ایجاد می‌گردد. در واقع خوشه‌بندی

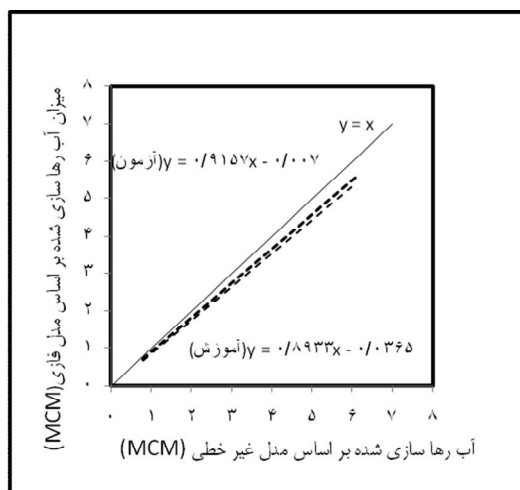
راه‌حلی مناسب جهت کمک به فهم بهتر سیستم است. هنگامی که سیستم به سمت دسترسی بسیار پایین و نیاز بالا میل می‌کند، شرایط سیستم به صورت "بسیار سخت" تلقی می‌شود. به‌عنوان مثال یکی از قواعد به‌دست آمده در ماه اردیبهشت بیان می‌کند که در صورتی که حجم آب در مخزن زیاد، ورودی زیاد و نیاز زیاد باشد رهاسازی زیاد است که این قاعده نشانگر شرایط آسانی جهت تصمیم‌گیری می‌باشد و قاعده دیگر بیان می‌کند که در صورتی که حجم آب در مخزن در ابتدای ماه اردیبهشت کم، جریان ورودی متوسط و نیاز زیاد باشد، رهاسازی زیاد است که تصمیم‌گیری در این شرایط به‌دلیل قابلیت دسترسی کم پیچیده‌تر می‌شود.

مطابق جدول ۳ گرچه هر دو مدل از الگوی مشابهی برخوردارند، میزان آب رهاسازی در مدل فازی، کم‌تر از مدل غیرخطی است، بخصوص در ماه‌های با نیاز آبی بیشتر و فصل تابستان که تنها گیاه سورگوم کاشته می‌شود. به‌عنوان مثال در ماه اردیبهشت و خرداد که رقابت میان سه گیاه بر سر آب وجود دارد، میزان MAE و RMSE برای ماه اردیبهشت در مرحله آموزش برابر ۰/۸۳ و ۰/۹۱ و در مرحله آزمون برابر ۰/۸۳ و ۰/۹۲ و برای ماه خرداد در مرحله آموزش برابر ۰/۶۶ و ۰/۷۷ و در مرحله آزمون برابر ۰/۷۳ و ۰/۸۴ است. می‌توان اینگونه استنباط کرد که با توجه به عدم تغییرات یکسان و مشابه در وضعیت‌های مختلف، چنین معیاری نمی‌تواند به‌عنوان شاخصی جهت عملکرد اقتصادی مدل فازی در نظر گرفته شود.

در شکل ۱۰ دو خط رگرسیون مربوط به مدل‌های فازی و غیرخطی نشان دادند که با افزایش میزان رهاسازی، تفاوت میان مدل فازی و غیرخطی بیشتر می‌شود. بنابراین، می‌توان این گونه استنتاج کرد که در ماه‌های با نیاز آبی بیشتر، تفاوت میان آب رهاسازی شده میان دو مدل ذکر شده بیشتر می‌شود. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، فاصله زمانی آذر تا بهمن به‌عنوان ماه‌های خواب سال در محاسبات مدنظر قرار نمی‌گیرد. لازم به ذکر است که نتایج به‌دست آمده از مدل فازی در مقایسه با مدل غیرخطی در مرحله آزمون بهتر از مرحله آموزش است.

**بررسی مدل در شرایط مختلف حجم آب اولیه در مخزن:** از میان مجموعه داده‌هایی که جهت آزمون مدل فازی مورد استفاده قرار گرفتند، با ۵ حالت حجم آب اولیه در مخزن در ابتدای سال زراعی و جریان ورودی متغیر در یک دوره مشخص به‌عنوان مثال ۱۰ سال، دو مدل بهینه‌سازی غیرخطی و فازی اجرا شدند. شکل ۱۰ نشان می‌دهد که کم‌ترین اختلاف رهاسازی در دو مدل نسبت به هم در حالت حجم مخزن با نسبت ظرفیت حجم اولیه ۰/۵ به حجم حداکثر، درحالی‌که بیش‌ترین اختلاف با

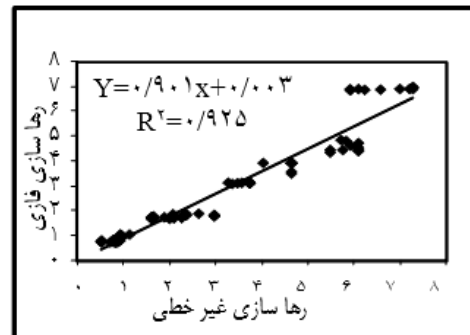
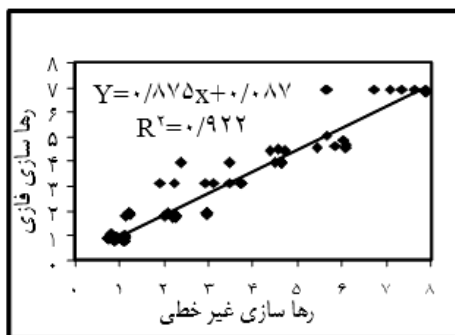
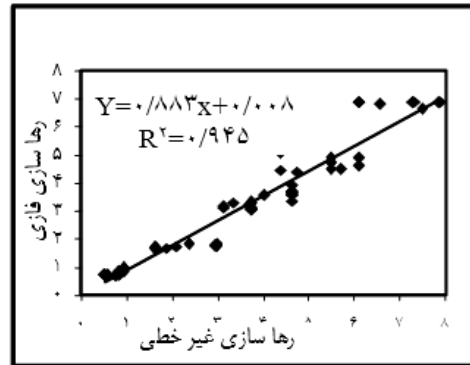
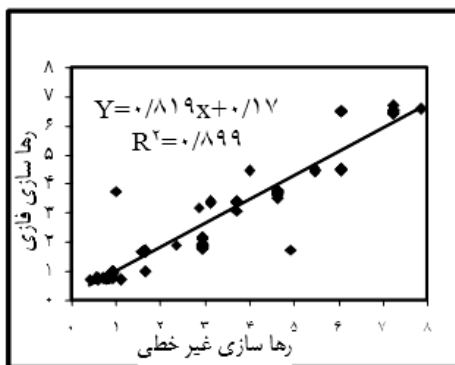
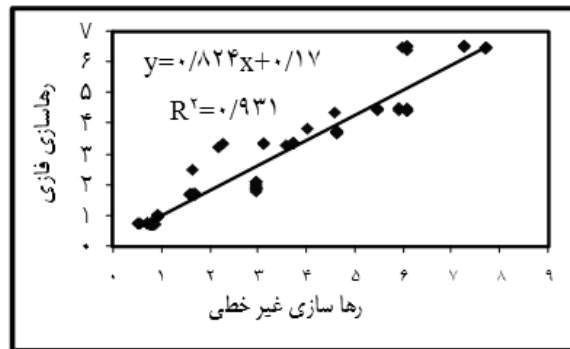
نسبت ظرفیت حجم اولیه ۰/۲۵ به حجم حداکثر به دست آمده است. با این حال، مقادیر بالای ضریب تعیین ( $R^2$ ) نشان می‌دهد که خروجی مدل فازی از روند مدل غیر خطی پیروی می‌کند.



شکل ۱۰- مقایسه میانگین رهاسازی با استفاده از مدل فازی و غیرخطی. خط ممتد خط بهترین تطابق (با شیب ۱:۱) و دو خط منقطع مربوط به مدل فازی و در دو مرحله آزمون و آموزش می‌باشد.

جدول ۳- ارزیابی مدل منطق فازی در هر دو مرحله آموزش و آزمون.

ماه	مرحله آموزش		مرحله آزمون	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE
مهر	۰/۱۵۴	۰/۱۹۵	۰/۱۷۳	۰/۲۱۰
آبان	۰/۰۹۸	۰/۱۷۲	۰/۱۰۸	۰/۱۸۸
آذر	۰/۰۸۴	۰/۱۰۹	۰/۰۸۹	۰/۱۱۹
فروردین	۰/۳۵	۰/۴۳	۰/۳۳	۰/۴۳۵
اردیبهشت	۰/۸۳	۰/۹۱	۰/۸۳	۰/۹۲
خرداد	۰/۶۶	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۸۴
تیر	۰/۶۱	۰/۶۹	۰/۶۳	۰/۷۱
مرداد	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۸۴	۰/۹۱
شهریور	۰/۸۱	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۸۷



شکل ۱۰- رها سازی در حالت های مختلف حجم اولیه مخزن در ماه اردیبهشت برای ۵ کلاس مختلف حجم آب در مخزن در ابتدای فصل رشد (حجم مرده،  $0.25 V_m$ ،  $0.5 V_m$ ،  $0.75 V_m$  و  $V_m$ ) (به ترتیب از بالا به پایین و از راست به چپ).

## بحث و نتیجه‌گیری

در این مطالعه که با هدف بهره‌برداری از مخزن سد ایلانجق واقع در خراسان شمالی، با هدف تأمین آب کشاورزی پایین‌دست منطقه انجام گرفته است، راه‌حلی بر پایه خوشه‌بندی به منظور ایجاد حداقل قواعد فازی که بیش‌ترین اهمیت را دارند به‌کار گرفته شده است. در این مطالعه خوشه‌بندی جفت داده‌های ورودی- خروجی به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی غیرخطی به‌عنوان متغیرهای ورودی به سیستم فازی با ۵ خوشه و در نهایت ۱۵ قاعده فازی بررسی شده است. مجموعه‌های فازی به‌کار گرفته شده در هر خوشه مثلثی می‌باشد. با توجه به سادگی و سرعت محاسبات، این روش می‌تواند جایگزین روش‌های معمول تولید قواعد فازی با حجم زیاد جفت داده‌های ورودی- خروجی در سیستم‌های فازی بهینه باشد. با توجه به آن‌که مدل‌های ریاضی نظیر برنامه‌ریزی‌های غیرخطی نمی‌توانند با انتخاب شرایط و حالت‌های مختلف ورودی، خروجی‌های متفاوت و قابل قبولی را ارائه کنند، مدل فازی توانست با در نظر گرفتن تمامی شرایط و حالت‌ها و با پیروی کردن از روند برنامه‌ریزی غیرخطی که به‌عنوان سری داده‌های تاریخی در مدل فازی مورد نظر قرار گرفتند، خروجی‌های مختلفی را به‌ازای ورودی مختلف ارائه کنند به‌گونه‌ای که مبنای تصمیم‌گیری جهت بهره‌برداری عمومی در سال‌های آتی قرار گیرد. از طرفی با مقایسه نتایج میزان رهاسازی به‌دست آمده از مدل بهینه‌سازی غیرخطی و رهاسازی به‌دست آمده از مدل فازی و محاسبه نتایج خطای نسبی میان این دو روش، می‌توان به این نتیجه رسید که روند تغییرات رهاسازی از مخزن در هر دو مدل شبیه به هم می‌باشد، اما به‌طور کلی میزان رهاسازی سالانه در مدل فازی نسبت به مدل بهینه‌سازی غیرخطی کم‌تر است، در ماه اردیبهشت بیش‌ترین رهاسازی در دو مدل مشاهده می‌شود که به‌دلیل رقابت بر سر آب میان ۳ گیاه و تأمین نیاز شرب می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که می‌توان در سیستم تک‌مخزنی چندمنظوره به‌جای استفاده از روش‌های معمول مدل‌های فازی با حجم محاسباتی بالا از روش فازی به‌وسیله خوشه‌بندی برای مدیریت بهره‌برداری بهینه استفاده کرد. از آن‌جاکه میزان آب رهاسازی شده توسط مدل فازی در مقایسه با مدل غیرخطی کم‌تر است، اما این به معنای عملکرد بهتر مدل فازی نیست و توسط تابع هدف موجود در مدل غیرخطی باید این موضوع مورد تحلیل قرار گیرد. مقایسه نتایج به‌دست آمده از این مطالعه حاضر با مدل موسوی و همکاران (۲۰۰۷) که تابع هدف در آن به‌گونه‌ای دیگر بیان شده است، نشان می‌دهد که اختصاص آب رهاسازی شده چه در مرحله رهاسازی از مخزن و چه در مرحله مزرعه، برای بهره‌بردار ملموس و بیشتر قابل درک می‌باشد.

در مطالعه موسوی و همکاران (۲۰۰۷) تصمیم‌گیری جهت رهاسازی بر اساس تابع هدف با حداقل واحد کمبود است، درحالی‌که در مطالعه حاضر، اختصاص آب به هر گیاه بر اساس درجه حساسیت رشد هر گیاه به‌طور جداگانه صورت می‌گیرد. این به آن معناست که به‌عنوان مثال، یک واحد کمبود برای ماه‌های مختلف معنای یکسانی ندارد و بسته به هر گیاه و مرحله رشد آن با گیاه دیگر و دوره رشد دیگر متفاوت است.

### منابع

1. Abpooy Consulting Engineering Company. 2005. The Report of Water Resources Planning for Zagelanloo and Shourkal Border Rivers, No. 6, Mashhad. (In Persian)
2. Bardossy, A., and Duckstein, L. 1995. Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems. CRC Press Inc., Boca Raton, Florida, USA.
3. Bras, R.L., and Cordova, J.R. 1981. Intra-seasonal water allocation in deficit irrigation. *Water Resour. Res.*, 17: 866-874.
4. Depic, O., and Simonovic, S.P. 2000. Aggregation operators for soft decision making in water resources. *Fuzzy Sets Syst.*, 115: 11-33.
5. Doorenbos, J., and Kassam, O.W. 1979. Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. FAO, Rome, Italy, 193p.
6. Dubovin, T., Jolma, A., and Turunen, E. 2002. Fuzzy model for real-time reservoir operation. *J. Water Resour. Plng. Manage.*, 128: 66-73.
7. Dudley, N.J., and Burt, O.R. 1973. Stochastic reservoir management and system design for irrigation. *Water Resour. Res.*, 9: 507-522.
8. Dudley, N.J., Howell, D.T., and Musgrave, W.F. 1971. Optimal interseasonal irrigation water allocation. *Water Resour. Res.*, 7: 770-788.
9. Ghahraman, B., and Sepaskhah, A.R. 1999. Use of different irrigation water deficit scheme for economic operation of a reservoir. *Iran. J. Sci. Tech.*, 23: 83-90.
10. Ghahraman, B., and Sepaskhah, A.R. 2002. Optimal allocation of water from a single purpose reservoir to an irrigation project with pre-determined multiple cropping patterns. *Irrig. Sci.*, 21: 127-137.
11. Ghahraman, B., and Sepaskhah, A.R. 2004. Linear and non-linear optimization models for allocation of limited water supply. *Irrigation Drainage*, 53: 39-54.
12. Hasebe, M., and Nagayama, Y. 2002. Reservoir operation using the neural network and fuzzy systems for dam control and operation support. *Adv. Eng. Software*, 33: 245-260.

13. Hossain Poor Tehrani, M. 2008. Reservoir operation using fuzzy inference system (Case study: Ilanjogh dam). MSc dissertation in Irrigation Structures, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Pp: 107-117. (In Persian)
14. Labadie, J.W. 2004. Optimal Operation of Multi-reservoir Systems: State-of-the-Art Review. *J. Water Resour. Plan Manage.*, ASCE, 130: 2. 93.
15. Mousavi, S.J., Ponnambalam, K., and Karray, F. 2007. Inferring operating rules for reservoir operations using fuzzy regression and ANFIS. *Fuzzy Set Syst.*, 158: 1064-1082.
16. Mousavi, S.J., Ponnambalam, K., and Karray, F. 2005. Reservoir Operation Using a Dynamic Programming, Fuzzy Rule-Based Approach. *Water Res. Management*, 19: 655-6723.
17. Panigrahi, D.P., and Mujumdar, P.P. 2000. Reservoir operation modelling with fuzzy logic. *Water Resour. Manage.*, 14: 89-109.
18. Rani, D., and Moreira, M.M. 2010. Simulation-optimization modeling: a survey and potential application in reservoir systems operation. *Water Resour. Manage.*, 24: 1107-1138.
19. Rao, N.H., Sarma, P.B.S., and Chander, S. 1990. Optimal multicrop allocation of seasonal and intra-seasonal irrigation water. *Water Resour. Res.*, 26: 551-559.
20. Reddy, J.M., and Kumar, N.D. 2008. Evolving Strategies for Crop Planning and Operation of Irrigation Reservoir System using Multi-Objective Differential Evolution. *Irrigation Science*, 26: 2. 177-190.
21. Reddy, J.M., and Kumar, N.D. 2007. Optimal Reservoir Operation for Irrigation of Multiple Crops using Elitist-Mutated Particle Swarm Optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 52: 4. 686-701.
22. Russel, S.O., and Campbell, P.E. 1996. Reservoir operating rules with fuzzy programming. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, 122:165-170.
23. Shamkouian, H., Ghahraman, B., Davari, K., and Sarmad, M. 2009. Flood frequency analysis using linear moment and flood index method in Khorasan Provinces. *J. Water Soil*, 23: 31-43.
24. Shrestha, B.P., Duckstein, L., and Stakhiv, E.Z. 1996. Fuzzy rule-based modeling of reservoir operation. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 122: 4. 262-269.
25. Simonovic, S.P. 1992. Reservoir systems analysis: Closing the gap between theory and practice. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 118: 262-280.
26. Sivapragasam, C., Vasudevan, G., Vincent, P., Sugendran, P., Marimuthtt, M., and Seenivasakan, S. 2007. Rule reduction in fuzzy logic for better interpretability in reservoir operation. *Hydrol. Process.*, 21: 2835-2844.
27. Srikanthan, R., Sharma, A., and McMahon, T.A. 2006. Comparison of two nonparametric alternatives for stochastic generation of monthly rainfall. *J. Hydrol. Engng.*, 11: 222-229.



28. Teegavarapu, R.S.V., and Simonovic, S.P. 1999. Modeling uncertainty in reservoir loss functions using fuzzy sets. *Water Resour. Res.*, 35: 2815-2823.
29. Vedula, S., and Mujumdar, P.P. 1992. Optimal reservoir operation for irrigation for multiple crops. *Water Resour. Res.*, 28: 1-9.
30. Vedula, S., and Kumar, D.N. 1996. An integrated model for optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. *Water Resour. Res.*, 32: 1101-1108.
31. Wang, L.X. 1997, *A course in fuzzy systems and control*, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA.
32. Yeh, W.W.G. 1985. Reservoir management and operations models: A state-of-the art review. *Water Resour. Res.*, 21: 12. 1798-1818.



Gorgan University of Agricultural  
Sciences and Natural Resources

*J. of Water and Soil Conservation, Vol. 18(4), 2011*  
<http://jwfst.gau.ac.ir>

## **Reservoir operating using Fuzzy Inference System and clustering (Case study: Ilanjogh Dam)**

**M. Hossein poor Tehrani<sup>1</sup>, \*B. Ghahraman<sup>2</sup>, K. Davary<sup>3</sup>  
and H. Ansari<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>M.Sc. Graduated, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,  
<sup>2</sup>Professor, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>3</sup>Associate Prof.,  
Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, <sup>4</sup>Assistant Prof., Dept. of  
Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 2010-4-6; Accepted: 2011-3-1

### **Abstract**

Results of a Non-Linear Programming (NLP) model were used to develop Fuzzy Rule Bases for optimal Ilanjogh reservoir operation located in Daregaz, northeast of Iran. The dam is designed for agriculture of three crops (winter, barley, and sorghum). Making decision is considered in two levels: reservoir and farm levels. The reservoir level Fuzzy logic model extracts important features of the system from the input-output data set by NLP and represents features as general operating rules. The developed model serves not only as efficient decision making tool in easy and understandable Fuzzy Inference Systems, but also provides operators with a limited number of the most meaningful operating rules using Clustering-Based approach. The model is set properly in a yearly based with initial storage and monthly steps. Results showed that the changing trend of water releases in both models is the same with  $R^2=0.97$  such that over the 12 months period, both trends had increased from October to May but since then, they decreased gradually. But in general, the amount of annual released water in Fuzzy model is almost less than NLP, especially in competitive month, May and June, when there was a competition between all 3 crops for water, the percentage of water deficit to the percentage of annual mean water deficit were 0.57 and 0.81 in training and 0.93 and 1.145 in the test stage, respectively.

**Keywords:** Reservoir operation; Non-Linear programming; Fuzzy model; Clustering; Release.

---

\*Corresponding Author; Email: [bjanganh@um.ac.ir](mailto:bjanganh@um.ac.ir)