

مقاله علمی- پژوهشی

استفاده از اعداد Z در تعیین پارامترهای بهینه بهره‌برداری از مخازن سدها

باقر نیکوفر^{۱*}، وحید نورانی^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۰۲

چکیده

برآورد دقیق میزان پتانسیل منابع آب و استفاده بهینه از آن یک مسئله مهم در صنعت آب می‌باشد. بنابراین بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مدیریتی در دوران بهره‌برداری سدها محسوب می‌گردد. در بهره‌برداری واقعی از مخازن سدها با در نظر گرفتن حجم مخزن، مقدار تقاضاها و پیش‌بینی جریان ورودی مخزن، در مورد میزان رهاسازی آب تصمیم‌گیری می‌گردد. نظر به اینکه در داده‌های بهره‌برداری مخازن سدها عدم قطعیت وجود دارد، و یکی از روش‌های برخورد با عدم قطعیت استفاده از مجموعه منطق فازی است، از آنجائی که نظریه‌های فازی سنتی به‌تنهایی نمی‌توانند عدم قطعیت موجود را به‌طور کامل در محاسبات منظور کنند. در این حالت، اعداد Z به‌عنوان نسل جدید منطق فازی پتانسیل زیادی در توصیف عدم قطعیت دانش انسان دارند، چراکه هم محدودیت و هم قابلیت اطمینان را در نظر می‌گیرند. هدف از این تحقیق تعیین پارامترهای بهینه بهره‌برداری سدها در چند گام آبی با لحاظ نمودن عدم قطعیت داده‌ها و قابلیت اطمینان اطلاعات در بهینه‌سازی از طریق اعداد Z به‌صورت مطالعه موردی در سد علویان بوده و تلاش شده است نتایج اعداد Z با نتایج الگوریتم ژنتیک و منطق فازی کلاسیک مقایسه گردد. برای ارزیابی این روش‌ها از شاخص‌های عملکردی مانند قابلیت اطمینان، آسیب‌پذیری و پایداری استفاده شد و نتایج نشان داد که در روش الگوریتم ژنتیک، ۷۷ درصد، منطق فازی کلاسیک ۸۵ درصد و اعداد Z، ۹۲ درصد از نیازهای مربوط به تقاضای کشاورزی پایاب سد علویان تأمین شده است و منحنی فرمان پارامترهای بهینه بهره‌برداری حاصل از مدل‌سازی عدد Z بر اساس پیش‌بینی جریان ورودی از طریق روش تخمین‌های حد پایین و بالا (LUBE)، نشان داد که حجم رهاسازی مشاهده‌شده برای سد علویان در طول سال آبی جاری در محدوده پیش‌بینی‌شده باقی‌مانده است.

واژه‌های کلیدی: اعداد Z، بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سدها، سد علویان، عدم قطعیت، منحنی فرمان، منطق فازی کلاسیک

مقدمه

می‌گردد. از این‌رو استفاده از روشی که مدیریت بهینه بهره‌برداری از مخازن سدها را با لحاظ عدم قطعیت در محاسبات لحاظ کند، ضروری است. در زمینه کمی سازی عدم قطعیت، استفاده از فواصل پیش‌بینی (PIs) اهمیت بسیار بالایی دارد. برخلاف تخمین‌های نقطه‌ای که یک پیش‌بینی با مقدار مشخصی را ارائه می‌کنند، PIها درک جامع‌تری از طیف بالقوه پیامدها ارائه می‌کنند، و تصمیم‌گیرندگان را برای ارزیابی سطوح عدم قطعیت، تقویت استراتژی‌های مدیریت ریسک و قضاوت‌های آگاهانه بر اساس طیفی از احتمالات توانمند می‌سازند (Nourani et al., 2021a). علاوه بر این، PIها شناسایی سناریوهایی را که با عدم قطعیت بالاتر مشخص می‌شوند، تسهیل می‌کنند، و محدوده‌ی یی را با استفاده از روش (LUBE) مشخص می‌کنند که به بررسی بیشتر و جمع‌آوری داده‌ها برای کاهش عدم قطعیت‌ها و افزایش قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها نیاز دارند. قابل‌ذکر

با توجه به این‌که امروزه جوامع بشری به دلیل محدودیت منابع آبی و افزایش نیازهای آبی با مشکل کم‌آبی مواجه هستند، لذا برآورد دقیق میزان پتانسیل منابع آب و استفاده بهینه از آن یک مسئله مهم و قابل توجه در محافل علمی و صنعت آب‌شده است. بنابراین بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مدیریتی در تدوین برنامه منابع و مصارف سالیانه مخازن سدها در دوران بهره‌برداری محسوب می‌گردد (Nazari et al., 2024). در بهره‌برداری واقعی از مخازن سدها با استفاده از فرآیندهای پیچیده و با در نظر گرفتن حجم مخزن، مقدار تقاضاها و پیش‌بینی جریان ورودی مخزن، در مورد میزان رهاسازی آب تصمیم‌گیری

۱- دانشجوی دکتری عمران مدیریت منابع آب، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

*- نویسنده مسئول: (Email: baghernik@tabrizu.ac.ir)

3- Prediction Intervals

4- Upper and Lower Bond Estimates

برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم مخزن برای بزرگ‌ترین مخزن سد در ایالت ماهاراشتر هند از طریق مدل برنامه‌ریزی خطی فازی چندهدفه با دو تابع هدف حداکثر رساندن رهاسازی برای آبیاری و تولید برق آبی ارائه نموده‌اند (Choudhari et al., 2022).

با بررسی پیشینه تحقیقات مشخص گردید که باوجود استفاده گسترده از روش‌های مختلف منطق فازی، بررسی اطمینان‌پذیری اطلاعات تحلیل شده نیز بسیار مهم می‌باشد که در منطق فازی کلاسیک لحاظ نمی‌گردد، بنابراین نظریه‌های فازی کلاسیک به‌تنهایی نمی‌توانند عدم قطعیت موجود را به‌طور کامل در محاسبات منظور کنند (Najafi et al., 2022). در این حالت، اعداد Z پتانسیل زیادی در توصیف عدم اطمینان از دانش انسان دارند، چراکه هم محدودیت و هم قابلیت اطمینان مقدار اندازه‌گیری شده را در نظر می‌گیرند. برای مثال وقتی گفته می‌شود "اگر جریان ورودی به مخزن سد در آبان ماه زیاد باشد رهاسازی از مخزن سد در همان ماه زیاد خواهد بود"، چقدر به زیاد بودن جریان ورودی به سد و یا همچنین برای زیاد بودن رهاسازی از مخزن سد اطمینان وجود دارد؟ لذا میزان اطمینان به چنین مواردی متفاوت است، برای مثال برآورد پارامترهای فازی عموماً از طریق دانش خبرگان صورت می‌گیرد. اما میزان اطمینان به نظر کارشناسان مختلف تفاوت دارد و نمی‌توان عدم قطعیت و تفاوت در اعتبار نظر آنان را نادیده گرفت و باید در فرآیند تصمیم‌گیری این عدم قطعیت لحاظ گردد. به‌منظور حل مشکل درجه عدم اطمینان موجود در اطلاعات، لطفی زاده نظریه اعداد Z را در سال ۲۰۱۱ مطرح کرد (Zadeh et al., 2011) و بعد از آن روش‌های مختلفی برای عملیات جبری روی اعداد Z مطرح گردید (Aliev et al., 2014; Zadeh et al., 2011; Aliev et al., 2015). عدد Z مفهوم جامع‌تری نسبت به اعداد فازی معمولی برای بیان اطلاعات دنیای واقعی دارد و به‌طور معمول، اجزای یک عدد Z به زبان طبیعی توصیف می‌شود. عدد Z یک زوج مرتب از اعداد فازی A و B می‌باشد که به صورت $Z=(A,B)$ بیان می‌شود. A (بخش محدودیت) یک تخمین تقریبی از مقدار X و B (بخش قابلیت اطمینان) یک تخمین تقریبی از قابلیت اطمینان A می‌باشد. یکی از روش‌هایی که می‌توان از توانایی اعداد Z در مدل‌های بهره‌برداری بهینه از آب مخازن سدها استفاده نمود به این صورت می‌باشد که با اعمال نظر متخصصان مسئله بهینه‌سازی را با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان اطلاعات بر اساس اعداد Z تعریف نمود و سپس با اعمال روش‌هایی اعداد Z را به اعداد فازی کلاسیک تبدیل کرد. در نهایت با اعمال روش‌هایی چون روش‌های فازی کلاسیک یا فرا ابتکاری مسئله بهینه‌سازی را حل نمود (Kang et al., 2018a; Kang et al., 2018b). در مطالعات مربوط به مهندسی منابع آب نیز تعداد معدودی کاربرد تئوری اعداد Z ارائه شده است، به‌عنوان مثال ملکی و همکاران از تئوری اعداد Z برای ارزیابی آسیب‌پذیری خاص آب‌های زیرزمینی

است، چندین مطالعه با موفقیت از PIها در تحقیقات منابع آبی استفاده شده است (Chen and Chau, 2019; Nourani et al., 2019; 2020a; 2020b; Sharghi et al., 2021).

با توجه به موارد فوق و لزوم شرایطی که بتوان در جهت مدیریت بهره‌برداری بهینه مخازن سدها به روش‌ها و تکنیک‌های نوین دست‌یافت، تلاش‌های گسترده‌ای جهت استفاده از الگوریتم‌های تصادفی و تقریبی صورت گرفته است. هرچند این الگوریتم‌ها تحت عنوان روش‌های فرا ابتکاری، تضمینی جهت دستیابی به بهینه مطلق ندارند، اما عموماً می‌توان به کسب پاسخ نزدیک به بهینه امیدوار بود. الگوریتم ژنتیک روش مناسبی برای حل مسائل بهینه‌سازی تک هدفه و چندهدفه می‌باشد. توانایی الگوریتم ژنتیک در جستجوی هم‌زمان نواحی مختلف فضای راه‌حل، یافتن جواب‌های گوناگون برای مسائل مشکل با فضای تصمیم غیر محدب، ناپیوسته و چند مدلی را امکان‌پذیر می‌کند. المبدین و همکاران و واهیونی و همکاران از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن سدها و استخراج سیاست‌های بهره‌برداری بهینه استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سیاست‌های بهره‌برداری کارآمدی مناسبی دارد (Almubaidin et al., 2024; Wahyuni et al., 2024).

با توجه به پیچیدگی این موضوع و عدم قطعیت داده‌های مربوط به مدیریت و بهره‌برداری از مخازن سدها، از جمله داده‌های بارش، تأخیر، دما و جریان ورودی به مخزن سدها، مطالعات متفاوتی در زمینه بهره‌برداری بهینه از مخازن سدها توسط محققین انجام یافته است. این مطالعات عمدتاً به دو صورت مدل‌های بهینه‌سازی قطعی، مبتنی بر فرض معلوم بودن داده‌های هیدرولوژیکی و مدل‌های استوکستیک مبتنی بر قطعی نبودن این داده‌ها می‌باشند (چکرائی و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین با توجه به عدم قطعیت در داده‌های بهره‌برداری مخازن سدها، ارائه سیاست‌هایی که باوجود عدم قطعیت‌ها بتواند بهره‌بردار را در اتخاذ تصمیم مناسب جهت رهاسازی بهینه آب از سیستم مخزن سد در طول چند گام آتی هدایت نماید، ضروری می‌باشد، یکی از روش‌های برخورد با عدم قطعیت استفاده از مجموعه منطق فازی است، و تصمیم‌گیری در بهره‌برداری مخازن سدها با استفاده از مدل‌های منطق فازی که در آن دانش و اطلاعات مدیران سدها با استفاده از متغیرهای زبانی قابل تفسیر است، آسان‌تر و قابل فهم‌تر می‌شود. بنابراین روش منطق فازی یک جایگزین امیدوارکننده برای مدل‌های بهره‌برداری از مخزن سدها است (Mehta et al., 2023; Zhang et al., 2021). مریوان و همکاران، مقاله‌ای برای بهینه‌سازی بهره‌برداری سیستم مخزن دربندیخان در عراق از طریق یک کنترل‌کننده منطق فازی و با تعریف تابع هدف انرژی برق آبی طوری که نیازهای پایین دست سد تأمین گردد، ارائه داده‌اند (Mariwan et al., 2021). چاودهاری و همکاران، مقاله‌ای

علویان در طول سال آبی جاری در محدوده پیش‌بینی واقع شده است. همین طور این نمودار به مدیر سد علویان در شرایط مختلف پر آبی (سیلابی) و کم آبی (خشکسالی) برای تامین آب پایاب سد تصمیم سازی می‌کند.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه و داده‌ها

حوضه آبریز سد علویان واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت ۲۷۵ کیلومتر مربع در محدوده‌ای به عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۱ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۲۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۶ درجه تا ۴۶ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی قرار دارد (شکل ۱). رودخانه صوفی چای با طول ۱۲۰ کیلومتر از دامنه‌های جنوب غربی کوه سهند واقع در استان آذربایجان شرقی سرچشمه می‌گیرد و جریان‌های سطحی این رودخانه از مجموع چشمه‌سارهایی که در دامنه سهند ظاهر می‌شوند و همچنین ذوب ذخیره و پوشش برفی این منطقه تأمین می‌شود. جهت رودخانه تقریباً به طرف جنوب بوده و در دره باریک و کم‌عرض جریان دارد. شاخه فرعی اسپیران‌چای به طول ۱۳/۵ کیلومتر در پایین‌دست، در محلی به نام کهلک دره‌سی (اسپیران) از طرف راست وارد رودخانه می‌شود. رودخانه صوفی چای بعد از طی مسافتی در حدود ۴ کیلومتر از محل اتصال اسپیران، به روستای تازه کند قاسم خان می‌رسد. در این محل، ایستگاه هیدرومتری تازه کند قرار دارد. شاخه اسفستانج یکی دیگر از شاخه های فرعی رودخانه صوفی چای است که در فاصله ۲/۵ کیلومتری پایین‌دست روستای تازه کند قاسم خان وارد آن می‌شود. کمی پایین‌تر از این محل نیز، سد علویان قرار دارد که رودخانه صوفی چای نهایتاً در پایین‌دست سد علویان به دریاچه ارومیه ختم می‌شود (Mohab Ghods, 1374; Hojjati et al., 2020).

سد علویان در حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه، بر روی رودخانه صوفی چای در ۳/۵ کیلومتری شمال غربی شهر مراغه در استان آذربایجان شرقی احداث شده است. سد علویان در سال ۱۳۷۴ به بهره‌برداری رسیده است و نوع سد خاکی با هسته رسی دارای حجم کل اولیه مخزن ۶۰ میلیون مترمکعب شامل ۵۷ میلیون مترمکعب حجم مفید و ۳ میلیون مترمکعب حجم مرده می‌باشد. از اهداف اصلی احداث سد تأمین آب مورد نیاز کشاورزی در محدوده شهرستان مراغه و بناب و تأمین بخشی از آب شرب شهرستان مراغه، تأمین آب مورد نیاز صنایع منطقه و همچنین مهار سیلاب رودخانه صوفی چای و محیط‌زیست می‌باشد.

به‌منظور دستیابی به یک روش مناسب برای حفاظت از منابع آب زیرزمینی در مقابل آلاینده‌های آبی با لحاظ عدم قطعیت در داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده کردند (Maleki et al., 2023) و همچنین نجفی و همکاران از تئوری اعداد Z برای استخراج رابطه احتمالی بین پارامترهای آبی و اقلیمی به دلیل وجود پیچیدگی و عدم قطعیت داده‌ها برای مدل‌سازی استفاده کردند (Najafi et al., 2022).

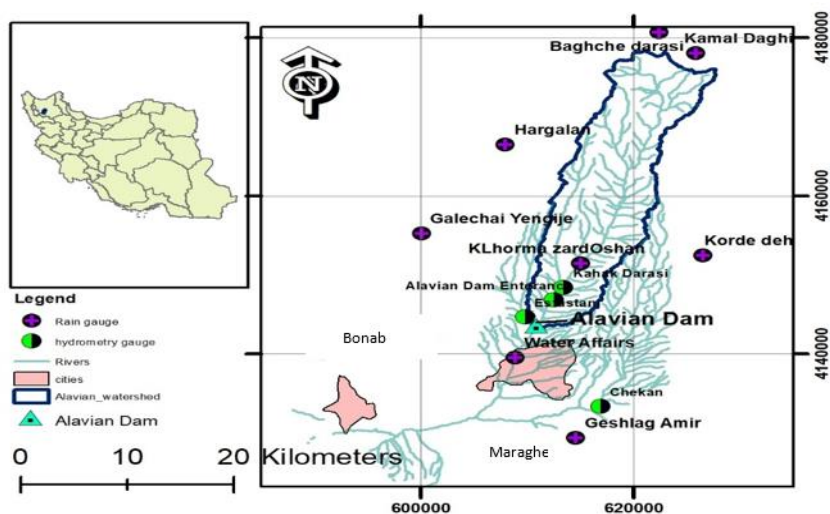
بالین حال براساس بررسی و تحقیقات انجام شده، هنوز از تئوری اعداد Z برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن سدها استفاده نشده است. بنابراین نوآوری این تحقیق بهینه‌سازی بهره‌برداری مخازن سدها با استفاده از تئوری اعداد Z می‌باشد در واقع یکی از اهداف اصلی این پژوهش توسعه کدی در نرم‌افزار MATLAB برای مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان با استفاده از اعداد Z در یک سال آبی آینده بود و برای مدل‌سازی بهینه و حل آن روشی برای تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک پیشنهاد شده است. فرآیند کلی استفاده از توانایی تئوری اعداد Z در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها در سه مرحله زیر صورت گرفته است:

الف) با اعمال نظر متخصصان بهره‌برداری از سدها، مسئله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن قابلیت اطمینان اطلاعات بر اساس اعداد Z تعریف شده است.

ب) با اعمال روش‌هایی اعداد Z به اعداد منطق فازی کلاسیک تبدیل گردید.

ج) برای حل مسئله بهینه‌سازی از روش منطق فازی کلاسیک استفاده گردید.

برای تحقق اهداف این تحقیق از اطلاعات بهره‌برداری سد علویان با دسته‌بندی و تعیین بازه آماری در یک دوره بلندمدت (۲۶ ساله) استفاده شده است. در گام اول پیش‌بینی حجم جریان ورودی به مخزن سد علویان با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و جهت اعمال عدم قطعیت از روش LUBE استفاده شده است، در گام دوم برای تعیین حجم مخزن و حجم رهاسازی بهینه از مخزن با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک محاسبه صورت گرفته است و در گام سوم از طریق منطق فازی کلاسیک برای تعیین پارامترهای بهینه استفاده شده است و در گام چهارم با لحاظ نمودن عدم قطعیت داده‌ها و قابلیت اطمینان اطلاعات در بهینه‌سازی از طریق اعداد Z، و با استفاده از کد نویسی در متلب جهت تعیین حجم مخزن و رهاسازی بهینه از مخزن سد صورت گرفته است و در نهایت نتایج مدل‌های بهینه‌سازی با یکدیگر و همین‌طور با سیاست‌های فعلی بهره‌برداری سد علویان مقایسه شده است. منحنی فرمان پارامترهای بهینه بهره‌برداری حاصل از مدل‌سازی اعداد Z که بر اساس پیش‌بینی جریان ورودی از طریق روش تخمین‌های حد بالا و پائین (LUBE) برای سال (۲۷-۱۴۰۳-۱۴۰۲) بدست آمد، نشان داد که حجم رهاسازی مشاهداتی سد



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز سد علویان از زیر حوضه‌های آبریز دریاچه ارومیه

مساحت حوضه)، ۲۲۷۰ متر نسبت به سطح دریا می‌باشد. با توجه به اختلاف شدید ارتفاعی درون حوضه، در حدود ۸۹ درصد از بارش‌های این منطقه در بازه‌ی زمانی اوایل آبان تا اواخر اردیبهشت اتفاق می‌افتد (Mohab Ghods, 1374; Hojjati et al., 2020).

داده‌های مورد استفاده در این بررسی شامل یک سری داده‌های ۲۶ ساله (۱۳۷۶-۱۴۰۲) به صورت ماهانه اعم از حجم ورودی آب به مخزن سد، حجم تبخیر از سطح مخزن، حجم مخزن، رهاسازی از مخزن سد برای اهداف مختلف کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست می‌باشد و همچنین برای بهینه‌سازی از داده‌های حاصل از نتایج پیش‌بینی حجم جریان ورودی و متوسط حجم تبخیر و حجم رهاسازی از مخزن سد در دوره آماری بهره‌برداری از مخزن سد علویان در جداول ۲ الی ۵ ارائه شده است.

در بالادست سد علویان، یک ایستگاه هیدرومتری درجه ۱ (ایستگاه هیدرومتری تازه کند) و دو ایستگاه هیدرومتری درجه ۴ (ایستگاه‌های

اسفستانج و کهلیک دره‌سی) وجود دارند، لازم به ذکر است که جریان عبوری از شاخه فرعی اسپیران چای (ایستگاه کهلیک دره‌سی) در بالادست ایستگاه هیدرومتری تازه کند بعد از پیوستن به شاخه اصلی وارد مخزن سد می‌شود (شکل ۱). میانگین جریان ورودی به مخزن سد ۳ مترمکعب بر ثانیه بوده است (Mohab Ghods, 1374). بر اساس آمار و اطلاعات ایستگاه‌ها، متوسط بارندگی سالانه ۳۵۰ میلی‌متر می‌باشد که حدود ۳۴ درصد بارندگی در زمستان، ۳۵ درصد آن در بهار، ۲۸ درصد در پاییز و در حدود ۳ درصد در تابستان می‌باشد. ارتفاع حوضه آبریز، در بالادست سد علویان، از ۱۵۴۷ تا ۳۴۴۰ متر متغیر بوده و ارتفاع متوسط حوضه (ارتفاع مربوط به ۵۰ درصد

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری بالادست سد علویان

| نام ایستگاه (درجه) | تازه کند درجه ۱ | اسفستانج درجه ۴ | کهلیک دره‌سی درجه ۴ |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|
| نام رودخانه | صوفی چای | اسفستانج | اسپیران چای |
| مساحت حوضه آبریز (کیلومتر مربع) | ۲۰۲ | ۳۳ | ۴۰ |

جدول ۲- نیاز واقعی بخش کشاورزی، شرب، صنعت و محیط‌زیست در مقیاس ماهانه در پایاب سد علویان (MCM)

| نوع مصارف | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | جمع |
|-----------|-----|------|------|------|------|-------|---------|----------|-------|-----|-------|--------|-----|
| شرب | ۱/۳ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۱ | ۱/۲ | ۱/۵ | ۱/۶ | ۱/۶ | ۱/۵ | ۱/۵ | ۱/۴ | ۱۶ |
| محیط‌زیست | ۰/۳ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۲۵ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۰/۶ | ۰/۶ | ۱ | ۱/۱ | ۰/۶ | ۶ |
| صنعت | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۴ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۵ | ۵/۲ |
| کشاورزی | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۸ | ۱۳ | ۱۲ | ۸ | ۴ | ۴۵ |

جدول ۳- متوسط ۲۶ ساله حجم تبخیر از سطح مخزن سد علویان (MCM)

| مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | جمع |
|------|------|------|-----|------|-------|---------|----------|-------|------|-------|--------|-----|
| ۰/۱۲ | ۰/۰۵ | ۰/۰۲ | ۰/۰ | ۰/۰ | ۰/۰۴۵ | ۰/۱۵ | ۰/۳ | ۰/۵ | ۰/۵۵ | ۰/۴۵ | ۰/۲۵ | ۲/۴ |

نیاز مصارف پایاب سد علویان بر اساس تخصیص در بخش کشاورزی شهرهای مراغه و بناب ۴۵ میلیون مترمکعب و در بخش شرب شهر مراغه ۱۶ میلیون مترمکعب و در صنایع ۵/۲ میلیون مترمکعب و در بخش حیات رودخانه ۶ میلیون مترمکعب و مجموعاً ۷۲/۲ میلیون مترمکعب به‌صورت سالانه می‌باشد.

جدول ۴ متوسط حجم مخزن سد علویان در طول ۲۶ سال دوران بهره‌برداری از سد علویان نشان می‌دهد و در این سال‌ها رهاسازی از مخزن سد بر اساس نیازهای پایاب مخزن سد و مطابق برنامه منابع و مصارف مدون سالانه صورت گرفته است و متوسط رهاسازی از مخزن سد در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- داده‌های متوسط حجم مخزن سد علویان در ۲۶ سال گذشته

| مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|-----|------|-----|----|------|-------|---------|----------|-------|-----|-------|--------|
| ۱۰ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۵ | ۳۰ | ۳۵ | ۴۵ | ۵۲ | ۴۰ | ۳۰ | ۱۸ | ۹ |

جدول ۵- داده‌های متوسط حجم رهاسازی از مخزن سد علویان در ۲۶ سال گذشته

| مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور | جمع |
|-----|------|-----|----|------|-------|---------|----------|-------|-----|-------|--------|------|
| ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲ | ۲/۵ | ۳ | ۸ | ۱۴ | ۱۲ | ۱۰ | ۸ | ۷۷/۵ |

روش تحقیق

هدف از این تحقیق بهینه‌سازی پارامترهای بهره‌برداری مخزن سد علویان با استفاده از محاسبات تئوری اعداد Z می‌باشد و برای بررسی عملکرد مدل، نتایج آن با نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک و منطق فازی کلاسیک با لحاظ تأمین کامل نیاز شرب، صنعت و جریان زیست‌محیطی و کاهش شدت کمبودهای کشاورزی مقایسه شده است. تعیین حجم مخزن و حجم رهاسازی بهینه در دوره‌های مختلف بهره‌برداری و به‌ویژه در یک سال آتی و مقایسه نتایج باسیاست‌های فعلی بهره‌برداری از سد علویان از اهداف اصلی این تحقیق بوده است. با توجه به اینکه محاسبات مستقیم برای بهینه‌سازی حجم ذخیره مخزن و رهاسازی از مخزن سد به‌وسیله اعداد z، سخت و طولانی بوده و دارای شرایطی محدود شونده است (جیرفتی و همکاران، ۱۳۹۶). از این رو برای استفاده از این اعداد، در مرحله اول آن‌ها را به اعداد فازی کلاسیک تبدیل و در مرحله دوم محاسبات به‌وسیله اعداد فازی کلاسیک انجام شد و این روند موجب ساده‌تر شدن محاسبات گردید (Kang et al., 2012a; Azadeh et al., 2013; Krohling et al., 2019). در مرحله سوم در محیط متلب مسئله بهینه‌سازی برای تعیین حجم مخزن و حجم رهاسازی در ۱۲ گام بعد با در نظر گرفتن چهار فصل یک سال، و کد نویسی برای سه روش الگوریتم ژنتیک، فازی کلاسیک و عدد Z صورت گرفته است. در مرحله چهارم

نتایج خروجی مدل‌ها باهم و باسیاست‌های فعلی بهره‌برداری سد علویان مقایسه شده است. در مرحله پنجم ارزیابی و مقایسه نتایج صورت گرفته است. در مرحله ششم منحنی فرمان بهینه بهره‌برداری مخزن سد علویان برای تصمیم‌گیری مدیر سد ترسیم شده است. مراحل مدل‌سازی به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

شبکه‌های عصبی مصنوعی (FFNN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی، که در بحث هوش مصنوعی جای می‌گیرند، سیستم‌ها و روش‌های محاسباتی نوینی برای یادگیری ماشینی، نمایش دانش و در انتها اعمال دانش به‌دست‌آمده در جهت پیش‌بینی پاسخ‌های خروجی از سیستم‌های پیچیده هستند. ساختار ANN متشکل از سه لایه ورودی، پنهان و خروجی است (Nourani, 2017). یکی از متداول‌ترین روش‌های ANN، روش FFNN می‌باشد که کاربرد وسیعی در زمینه علوم آبی دارد. ساختار سه لایه شبکه عصبی پیشرو با الگوریتم انتشار برگشتی FFNNs در اکثر مدل‌سازی‌های سری‌های زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد و یک الگوی کلی برای نگاشت غیرخطی میان متغیرهای ورودی و خروجی است. در این تحقیق برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان از روش FFNN استفاده شده است و برای لحاظ عدم قطعیت و کاهش تأثیر آن در داده‌های ورودی مدل پیش‌بینی ورودی در زمینه کمی سازی عدم قطعیت، از PIs که اهمیت بسیار بالایی دارد، استفاده شده است.



شکل ۲- فرآیند مدل سازی و توسعه یک مدل بهینه بهره برداری از مخازن سدها از طریق اعداد Z

بهتر، بخت بیشتر و به جواب های بدتر، بخت کمتری برای بقا می دهد. عملگر ترکیب به عنوان مهم ترین عملگر الگوریتم ژنتیک و کلید موفقیت این الگوریتم محسوب می شود. این الگوریتم با انجام عملیات بر روی ژن ها در کروموزوم های مختلف به تدریج آن ها را اصلاح می کند و به جواب نزدیک می شود. در این میان امروزه، استفاده از الگوریتم ژنتیک با توجه به توانایی ها و قابلیت های بالای آن در جستجوهای پیچیده وسیع در فضای جواب، در بسیاری از زمینه های مختلف نظیر علوم اجتماعی، بیولوژی، کامپیوتر و مهندسی عمران و مدیریت منابع آب کاربرد گسترده دارد (Almubaidin et al., 2024; Wahyuni et al., 2024).

رویکرد منطق فازی در بهینه سازی بهره برداری از مخزن سد

در مسائل مربوط به بهره برداری مخازن به طور گسترده ای با عدم قطعیت و عدم صراحت روبرو هست. لذا مدل هایی که صرفاً بهینه سازی خود را با استفاده از داده های قطعی (به عنوان مثال میانگین داده های آماری) برای آینده انجام می دهند، قابلیت اطمینان زیادی ندارند، یکی از شیوه های برخورد با عدم قطعیت استفاده از تئوری مجموعه های فازی است. در سال های اخیر، منطق فازی به عنوان یک تکنیک قدرتمند در تجزیه و تحلیل مؤلفه های هیدرولوژیکی و تصمیم گیری در منابع آب مطرح شده است. مسائل مربوط به هیدرولوژی اغلب با عدم دقت و ابهام سروکار دارند که می توانند به خوبی توسط مدل های مبتنی بر منطق فازی مدیریت شوند (Kambalimath and Deka, 2020). واندو و همکاران بهینه سازی مصرف انرژی با هدف کاهش آن جهت پمپاژ آب از مخزن سد برای تأمین نیازهای آبی از طریق مدل منطق فازی برای پمپ خودکار

و به منظور ارزیابی عدم قطعیت روش های اعمال شده، PI مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از روش LUBE محاسبه شده است. معیارهای ارزیابی PI ها در دو معیار ارزیابی کمی شامل احتمال همگرایی فواصل پیش بینی (PICP)¹ و عرض فواصل پیش بینی (MPIW)² است. PICP درصدی از داده های مشاهداتی است که در بازه پیش بینی می افتد. اگر عرض PI گسترده تر باشد، مقادیر مشاهداتی بیشتری را پوشش می دهد. هر چه PICP به مقدار تعیین شده متناظر با سطح اطمینان نزدیک تر باشد، قابل اطمینان تر است. برای پرداختن به این موضوع، یک معیار ترکیبی به نام معیار مبتنی بر عرض پوشش (CWC)³ معرفی شده است. CWC هر دو معیار PICP و MPIW را ادغام می کند و ارزیابی جامعی از عملکرد PI ارائه می دهد (Nourani et al., 2021; Sharghi et al., 2021).

استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی پارامترهای بهره برداری

الگوریتم ژنتیک یکی از روش های بهینه سازی الهام گرفته از طبیعت است که بر پایه رقابت موجودات زنده برای تصاحب منابع طبیعی محدود استوار است. اصول اولیه این روش توسط جان هلند، همکاران و دانشجویانش در دانشگاه میشیگان ایالات متحده ارائه شده است. مهم ترین عملگرهای روش ژنتیک عملگرهای انتخاب و ترکیب می باشد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته اند. عملگر انتخاب بر پایه انتخاب طبیعی داروین می باشد، بدین ترتیب که جواب های

- 1- Prediction Interval Coverage Probability
- 2- Mean Prediction Interval Width
- 3- Coverage Width-Based Criterion

وزنی یکسانی ندارند، از معیارهای عنوان شغلی، تجربه کاری و تخصص، تحصیلات و سن در تعیین وزن اهمیت آن‌ها، و همچنین از معیار جریان ورودی به مخزن سد به لحاظ تأثیر آن در برآورد حجم مخزن و میزان رهاسازی در فصل‌های مختلف استفاده شد. به‌عنوان مثال در فصل پائیز ورودی جریان کم، عدم قطعیت کمتر و به عبارتی ضریب قابلیت اطمینان بالا و در فصل بهار ورودی جریان زیاد، عدم قطعیت بیشتر و ضریب قابلیت اطمینان کمتر در نظر گرفته شده است. وزن دهی هر یک از کارشناسان بر اساس معیارهای تعیین شده و تأثیر عدم قطعیت برای هر یک از پارامترهای حجم مخزن و حجم رهاسازی در هر یک از دوره‌های چهارفصل یک سال برای اعمال ضریب قابلیت اطمینان در عامل محدودیت اعداد Z، مطابق جدول ۶ برآورد می‌گردد. در این تحقیق جدول ۶ به عنوان یک نمونه فرم جهت جمع‌آوری داده‌های آماری از کارشناسان و متخصصین سدها تهیه شده است. پس از تکمیل فرم توسط کارشناسان خبره و با دادن امتیاز بین ۰ تا ۱ و اعمال وزن معیارها به مقادیر هر یک از ماهها، معیار قابلیت اطمینان برای پارامترهای حجم مخزن و حجم رهاسازی در هر فصل برآورد شد. با احتساب میانگین وزن ۲۰ متخصص پس از اعمال ضریب وزنی هر متخصص، معیار نهایی قابلیت اطمینان محاسبه گردید.

استفاده نمودند. بنابراین روش منطقی فازی یک جایگزین امیدوارکننده برای روش‌های مدل‌های منابع آب، به‌ویژه بهره‌برداری از مخازن سدها ایجاد کرد، به دلیل اینکه این روش انعطاف‌پذیری بیشتری دارد و اجازه دخالت نظرات کارشناس را در بهره‌برداری از مخازن سدها ایجاد می‌کند، می‌تواند بیشتر موردقبول بهره‌برداران سدها واقع شود (Vando et al., 2024).

استفاده از تئوری اعداد Z در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن

سد

همان‌طوری که اشاره گردید با استفاده از نظریه اعداد Z می‌توان عدم قطعیت در تخمین پارامترهای فازی را لحاظ نمود. در این تحقیق جهت انجام مدل‌سازی در برآورد بهینه حجم مخزن و میزان رهاسازی از مخزن سد علویان، با استفاده از تئوری اعداد Z استفاده شده است. برای انتخاب معیارهای قابلیت اطمینان از طریق رتبه‌بندی نظریه کارشناسی و تجربه متخصصین بهره‌برداری از سدها با لحاظ نمودن تمامی پارامترهای مؤثر اقدام شده است. در این تحقیق ۲۰ کارشناس خبره و متخصص بهره‌برداری سدها برای تعیین وزن معیار قابلیت اطمینان به لحاظ تأثیر عدم قطعیت در تخمین جریان ورودی به مخزن سد علویان در برآورد حجم مخزن و میزان رهاسازی در طول یک سال آبی در نظر گرفته شد. از آنجایی که این کارشناسان اهمیت

جدول ۶- نمونه فرم شاخص وزن دهی به معیارها (تعیین ضریب قابلیت اطمینان برای عامل دوم (B))

| عنوان پست: | سابقه | تجربه کاری: | تخصص: | تحصیلات: | سن: | وزن محاسباتی: |
|-----------------------------|---------|-------------|------------|----------|-------------|---------------|
| Step | وزن | فصل پائیز | فصل زمستان | فصل بهار | فصل تابستان | |
| شاخص و معیارها | R/V* | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
| تغییرات جریان ورودی جریان | ۰/۴ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
| تغییرات رهاسازی آب به مصارف | ۰/۴/۰/۲ | ۱۱ | ۱۲ | | | |
| تغییرات ظرفیت حجم مخزن | ۰/۲/۰/۴ | | | | | |

R*: (معیار اصلی حجم رهاسازی) تأثیر تغییرات رهاسازی آب در وزن دهی و انتخاب ضریب قابلیت اطمینان و مقدار آن در شاخص رهاسازی آب ۰/۴ و ظرفیت حجم مخزن ۰/۲ در نظر گرفته می‌شود. *V: (معیار اصلی حجم مخزن) تأثیر ظرفیت حجم مخزن در وزن دهی و انتخاب ضریب قابلیت اطمینان و مقدار آن در شاخص رهاسازی آب ۰/۲ و ظرفیت حجم مخزن ۰/۴ در نظر گرفته می‌شود. شاخص تغییرات جریان ورودی جریان در هر دو معیار اصلی ۰/۴ فرض شده است.

مبانی نظری اعداد Z

همان‌طور که عنوان شد یک عدد z از یک جفت عدد فازی به شکل $Z=(A,B)$ تشکیل شده است. به‌طوری‌که عامل اول این اعداد (A) یک محدودیت روی مقدار حقیقی متغیر غیرقطعی X و عامل دوم (B) نیز اندازه‌ای از میزان قابل‌اعتماد بودن عامل اول است. اعداد A و B نشان‌دهنده دو عدد فازی به‌صورت رابطه (۱) می‌باشند (Zadeh et al., 2011).

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (1)$$

در این رابطه A: یک مجموعه فازی روی مجموعه جهانی $[0,1]$ μ_A : تابع عضویت مجموعه A و $\mu_A(x)$: میزان عضویت و بیانی

کننده درجه تعلق $x \in X$ در مجموعه A است. برای مثال اگر یک عدد فازی دوزنقه‌ای و یک عدد فازی مثلثی باشد می‌توان این اعداد را به شکل (۳) نشان داد (Azadeh et al., 2013; Kang et al., 2012a; Kang et al., 2012b; Krohling et al., 2019).

برای مثال فرض کنید بر اساس نظر متخصصین بهره‌برداری سد علویان مقدار رهاسازی در طول یک سال از مقدار مشخص α_1 کمتر نمی‌شود و درعین حال متخصصین بهره‌برداری سد علویان معتقد هستند که با توجه به شرایط ورودی مخزن سد در شرایط کم‌آبی و خشک‌سالی حداکثر رهاسازی α_3 و در شرایط پرآبی می‌تواند از مقدار α_3 فراتر رود. اما تا چه حد می‌توان به پیش‌بینی و نظریه‌های

در طول یک سال آینده را می‌توان از طریق یک عدد Z به شکل $Z=(A, B)$ مطرح نمود.

متخصصین بهره‌برداری سد اعتماد نمود؟ میزان اعتبار پیش‌بینی این متخصص را می‌توان با توجه به پیش‌بینی‌های قبلی وی با استفاده از یک عدد فازی دیگر همچون B توصیف کرد. بنابراین حجم رهاسازی



شکل ۳- مثالی از یک عدد Z

(محدودیت) ترکیب می‌شود. عدد وزنی Z به شکل رابطه (۵) خواهد

$$Z^\alpha = \{(x, \mu_{A^\alpha}(x)) \mid \mu_{A^\alpha}(x) = \alpha \mu_A(x), x \in [0,1]\} \quad (5)$$

$$E_{A^\alpha}(x) = \alpha E_A(x), x \in X \quad (6)$$

$$s. t. \mu_{A^\alpha}(x) = \alpha \mu_A(x), x \in X \quad (7)$$

در رابطه (۶)، $E_A(x)$ امید فزاین از یک مجموعه فازی مانند است و از طریق رابطه (۸) تعریف می‌شود (Kang et al., 2012a; Krohling et al., 2019). این مفهوم با مقدار مورد انتظار در محیط‌های احتمالاتی متفاوت است.

$$E_A(x) = \int_x x \mu_B(x) dx \quad (8)$$

عدد Z بعد از ضرب مقدار قابلیت اطمینان می‌توان در شکل ۴ نشان داد.

تبدیل اعداد Z به عدد فازی کلاسیک

اگر $Z=(A, B)$ یک عدد Z و اعداد فازی A و B به ترتیب به صورت روابط (۲) و (۳) تعریف شوند در این روابط $u_A(x)$ یک تابع عضویت دوزنقه‌ای و $u_B(x)$ یک تابع عضویت مثلثی است (Kang et al., 2012a; Krohling et al., 2019).

$$A = \{(x, u_A(x)) \mid x \in [0,1]\} \quad (2)$$

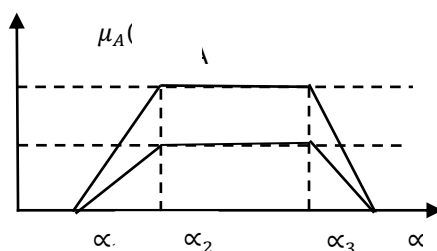
$$B = \{(x, u_B(x)) \mid x \in X\} \quad (3)$$

با توجه به تحقیقات کانگ و همکاران در مقاله‌ای برای محاسبات اعداد Z و تبدیل آن به عدد فازی کلاسیک مراحل زیرانجام می‌شود (Kang et al., 2012a):

گام اول) عامل دوم عدد Z (مقدار قابلیت اطمینان) به یک عدد Crisp تبدیل می‌شود (رابطه ۴).

$$\alpha = \frac{\int x \mu_B(x) dx}{\int \mu_B(x) dx} \quad (4)$$

گام دوم) وزن عامل دوم (مقدار قابلیت اطمینان) با عامل اول



شکل ۴- عدد Z بعد از ضرب مقدار قابلیت اطمینان

Z' دارای امید فازی یکسانی با Z^α است (Kang et al., 2012a; Krohling et al., 2019) تابع عضویت عدد فازی تولیدشده از عدد Z در شکل ۵ ترسیم شده است.

$$Z' = \{(x, \mu_{Z'}(x)) \mid \mu_{Z'}(x) = \mu_A\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right), x \in [0,1]\}$$

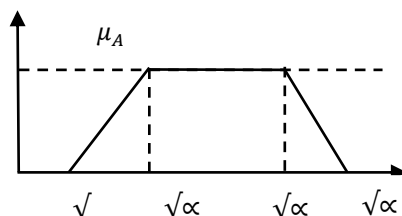
گام سوم) عدد فازی غیرمعمول (محدودیت وزنی) به عدد فازی معمول تبدیل می‌شود، مجموعه فازی به دست آمده را می‌توان به صورت رابطه (۹) نشان داد و از طریق رابطه (۱۲) بیان می‌شود که

$$(9)$$

$$E_{Z'}(x) = \alpha E_A(x), x \in \sqrt{\alpha} X \quad (10)$$

$$s.t. \mu_{Z'}(x) = \mu_A\left(\frac{x}{\sqrt{\alpha}}\right), x \in \sqrt{\alpha} X \quad (11)$$

$$E_{Z'}(x) = E_A^\alpha(x) \quad (12)$$



شکل ۵- عدد فازی تولیدشده از عدد Z

$$\text{Min } P = \sum_{t=1}^{n=4} ((T_s - S_t)^2 + DR_t^2) - 0.001T_s \quad (13)$$

T_s میزان حجم ذخیره هدف در طول کل دوره، S_t مقدار حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی t ، و DR_t میزان انحراف رهاسازی بهینه هر دوره از رهاسازی هدف (میزان تقاضای واقعی) و P تابع هدف مسئله بهینه‌سازی می‌باشد. قیود مربوط به بیلان آب در مخزن که

مهم‌ترین آن‌ها رابطه پیوستگی است و بر اساس معادله (۱۴) استوار است.

$$S_{t+1} = S_t + Q_t - R_t - E_t \quad (t = 1, \dots, n) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴)، S_t حجم مخزن در ابتدای دوره t و S_{t+1} حجم مخزن در انتهای دوره t است. Q_t حجم ورودی به مخزن، E_t حجم تبخیر از سطح مخزن در ماه t ، از طرفی میزان رهاسازی از مخزن سد در هر دوره باید مطابق رابطه (۱۵) برقرار باشد. T_R میزان رهاسازی هدف (میزان تقاضای واقعی)، S_t نیز مطابق با رابطه (۱۶) باید کوچک‌تر و مساوی با حجم بیشینه مخزن K باشد.

$$R_t \geq T_R - DR_{t-1} \quad (15)$$

$$S_t \leq K \quad (16)$$

حداقل و حداکثر حجم مخزن سد علویان ترتیب معادل ۷ و ۶۰ میلیون مترمکعب می‌باشد و همچنین جهت مدل‌سازی از متوسط حجم تبخیر از سطح مخزن و حجم رهاسازی در دوره آماری ۲۶ ساله و پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به تجربه و نظریه کارشناسان و متخصصین بهره‌برداری سدها، یک حجم آب در اثر بارش به‌صورت ورودی وارد مخزن سد می‌شود و یک حجم آبی در اثر نشت و نفوذ از بدنه سد و یا از طریق نفوذ از مخزن سد خارج می‌شود، لذا به دلیل پیچیدگی محاسبات آن‌ها و کمتر بودن مقادیر سالانه آن‌ها، این دو پارامتر باهم

مثال عددی روند تبدیل عدد Z به عدد فازی کلاسیک

در این بخش، از یک مثال عددی برای نشان دادن روند تبدیل اعداد Z به عدد فازی کلاسیک با اعمال نظر کارشناسان بهره‌برداری سد علویان در خصوص رهاسازی از مخزن سد استفاده شده است. A عامل اول عدد Z و B عامل دوم عدد Z برای میزان رهاسازی از سد علویان در فصل تابستان به شرح زیر بیان شده است.
 $A=(0,12,14,16)$, $B=(0.7,0.8,0.9)$
 برای تأثیر دانش کارشناس متخصص بهره‌برداری سد، با اعمال وزن قابلیت اطمینان به محدودیت، عدد Z به‌صورت زیر بیان می‌گردد:

$$Z=(A,B)=[(0,12,14,16), (0.7,0.8,0.9)]$$

میزان α برای عامل دوم عدد Z (عدد فازی B) تعیین و سپس برای تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک، میزان جذر α به‌دست‌آمده در پارامتر عامل اول عدد Z یعنی A ضرب شد. اعداد فازی کلاسیک A' برای رهاسازی از سد علویان در فصل تابستان به دست می‌آید.

$$\alpha = \frac{\int x \mu_B(x) dx}{\int \mu_B(x) dx} = 0.8 \quad \sqrt{\alpha_s} = 0.89$$

$$A' = (0, 10.7, 12.5, 14.3)$$

تابع هدف

تابع هدف الگوریتم ژنتیک

برای استفاده از یک مدل بهینه‌سازی از طریق الگوریتم ژنتیک در حل یک مسئله خاص، باید متغیر تصمیم، تابع هدف و قیود را برای مسئله موردنظر تعریف کرد. در این تحقیق برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد علویان، متغیر تصمیم، شامل حجم ذخیره مخزن در هر دوره زمانی S_t ، و میزان رهاسازی از مخزن در هر دوره زمانی R_t می‌باشد و تابع هدف کمینه‌سازی به‌صورت رابطه (۱۳) تعریف می‌شود (Loucks et al., 2017).

T_{st} مقادیری ایدئال است و به عبارت بهتر، تلاش مدل در دستیابی به این مقادیر نزدیک به یک است. شایان ذکر است که درجات ارضا اعدادی بین صفر و یک هستند. تابع عضویت مثلثی برای حجم مخزن در نظر گرفته شده است (Loucks et al., 2017).

$$m_{st} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{S_t}{T_{st}} S_t \leq T_{st} \\ \frac{K - S_t}{K - T_{st}} T_{st} < S_t \end{array} \right\} \quad (20)$$

همان طوری که ملاحظه می شود تابع عضویت دوزنقه برای حجم رهاسازی در نظر گرفته شده است. زمانی که مقدار رهاسازی صفر است، درجه عضویت آن تابع عضویت برابر صفر است و این مقدار زمانی که مقدار رهاسازی برابر نیاز ماهانه هدف است، بیشترین مقدار خود یعنی یک می باشد. هرچه مقدار رهاسازی از مقدار نیاز فاصله می گیرد درجه عضویت نیز کاهش می یابد. در شرایطی که R_t بزرگ تر از T^R باشد مطلوب ترین حالت اتفاق افتاده است و در صورتی که از T^R کمتر باشد نامطلوب خواهد بود (Loucks et al., 2017).

$$m_{Rt} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_t}{T^R} R_t \leq T^R \\ 1 R_t > T^R \end{array} \right\} \quad (21)$$

معیارهای ارزیابی

به منظور صحت سنجی و ارزیابی عملکرد تئوری اعداد Z به کار گرفته شده در این پژوهش جهت بهینه سازی حجم مخزن و رهاسازی از سه شاخص قابلیت اعتماد، آسیب پذیری و پایداری مخزن استفاده شده است.

الف) شاخص قابلیت اعتماد

احتمال اینکه سیستم در طول دوره ی عملکرد خود در حالت بهره برداری نرمال (عدم شکست) قرار گیرد را ارائه می دهد. در حالت کلی می توان گفت که درصد اعتماد پذیری یا قابلیت اعتماد بیانگر درصدی از زمان است که مخزن قادر به تأمین تقاضا می باشد (Razzaghi et al., 2013). در رابطه (۲۲)، f تعداد کل دوره های شکست، T تعداد کل دوره های بهره برداری و δ قابلیت اعتماد پذیری می باشد.

$$\delta = 100 \left(1 - \frac{f}{T} \right) \quad (22)$$

تهاتر شده و از معادلات پیوستگی معادله (۱۴) حذف گردیده است. مساحت دریاچه با استفاده از منحنی سطح-حجم و از رابطه (۱۷) به دست می آید (Mohab Ghods, 1374).

$$t = -0.0002533 S_t^2 + 0.05197 S_t + 0.3806 \quad (17)$$

که در آن، A_t مساحت دریاچه سد علویان در ماه t ام به کیلومتر مربع و S_t حجم آب ذخیره شده در مخزن سد علویان در بازه زمانی به میلیون مترمکعب می باشد. در سد علویان روزانه از روی آمار تشت تبخیر، مقدار ارتفاع تبخیر به دست می آید و از طریق رابطه (۱۸) حجم تبخیر از سطح مخزن سد تخمین زده می شود.

$$E_t = K \cdot E_{pan} \cdot A_t \quad (18)$$

در این معادله E_t حجم تبخیر از سطح آزاد آب مخزن سد E_{pan} ارتفاع تبخیر از تشت و K ضریب ثابتی است که مقدار آن برای تشت تبخیر استاندارد کلاس (A آمریکایی) بین ۰/۵۸ تا ۰/۷۸ می باشد (Hojjati et al., 2020). با محاسبه تبخیر از سطح مخزن و معلوم بودن حجم تبخیر ماهانه، با جایگذاری در رابطه (۱۴)، حجم مخزن در انتهای ماه به دست می آید.

تابع هدف اعداد Z

برای مدل سازی عدد Z تابع هدف آن مشابه تابع هدف منطبق فازی و مطابق رابطه (۱۹) در نظر گرفته شده است و قیدهای آن می تواند مثل روابط (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) باشد. تابع هدف اعداد Z با در نظر گرفتن ضریب قابلیت در جهت کاهش عدم قطعیت ها و افزایش دقت مدل سازی و برای حداکثر سازی درجات عضویت حجم مخزن و رهاسازی از مخزن به کار گرفته شده است. لازم به ذکر است که اهمیت درجه عضویت رهاسازی و حجم ذخیره مخزن می تواند بر اساس نظریه کارشناسی تعیین گردد (Loucks et al., 2017). در این تحقیق به لحاظ نظریه کارشناسی و اهمیت و تأثیر عدم قطعیت در تخمین حجم رهاسازی بهینه، ضریب حجم رهاسازی ۰/۶ و ضریب حجم مخزن ۰/۴ در نظر گرفته شده است.

$$\text{Max } T = \sum_{t=1}^{n=4} (w_s m_{st} + w_R m_{Rt}) \quad (19)$$

در این رابطه m_{st} تابع عضویت حجم ذخیره مخزن و m_{Rt} تابع عضویت رهاسازی از مخزن در زمان t هستند. همین طور w_s میزان اهمیت حجم ذخیره مخزن و w_R میزان اهمیت رهاسازی از مخزن سد می باشد که می تواند بر اساس اهمیت آن ها بین صفر تا یک تعریف گردد. T_{st} به ذخیره هدف معروف است و در این تحقیق بدین ترتیب محاسبه می گردد که با توجه به این که زمانی که درجات عضویت حجم مخزن و رهاسازی هم زمان بیشینه گردند، مطلوب ترین حالت اتفاق افتاده است، مقدار حجم ذخیره در این حالت همان ذخیره هدف است. بدیهی است که

افزایش قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها، از PIs استفاده شد و به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت، PI مدل FFNN با استفاده از روش LUBE برای دو حالت حد بالا و حد پایین محاسبه شد و از طریق معیار اصلی CWC میزان عدم قطعیت برای یک دوره ۱۲ ماهه آتی ارزیابی گردید. همین‌طور عملکرد انواع روش‌های بهینه‌سازی از قبیل الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و روش اعدادZ در بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان ارزیابی شد، این ارزیابی و توسعه روش‌های بهینه‌سازی با لحاظ تأمین کامل صد درصد نیاز آب شرب و صنعت و جریان زیست‌محیطی به‌عنوان حق آبه دریاچه ارومیه و به حداقل رساندن شدت کمبودهای کشاورزی صورت گرفت. در مسئله بهینه‌سازی حاضر، تابع هدف به‌صورت کمیته‌سازی مجموع اختلاف حجم مخزن با حجم مخزن هدف و انحراف رهاسازی محاسباتی از رهاسازی هدف در یک سال آبی بهره‌برداری از مخزن سد علویان تعریف و محدودیت‌های معادله پیوستگی مخزن، حجم ذخیره مخزن و حجم رهاسازی از مخزن بر تابع هدف مسئله اعمال شد.

نتایج پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان

پس از محاسبه ضرایب همبستگی و انتخاب ورودی‌های مؤثر، جهت مدل‌سازی FFNN برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان از طریق کد نویسی در نرم‌افزار MATLAB استفاده گردید. برای این منظور، داده‌ها به دو بخش آموزش (۷۵٪) و صحت‌سنجی (۲۵٪) تقسیم‌بندی شدند. جهت مدل‌سازی چندگانه (یک تا دوازده ماه بعد) از توانایی مدل FFNN با انتشار برگشتی خطا برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان با به‌کارگیری ورودی‌های مشاهداتی، شبکه آموزش داده‌شده و از تابع تانژانت سیگموئید به‌عنوان یک تابع محرک در لایه‌های میانی و خروجی استفاده گردید. تعداد تکرارها و نرون‌های لایه میانی با استفاده از روش آزمون و خطا به دست آمد. به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت روش اعمال‌شده، PI مدل FFNN با استفاده از روش LUBE برای دو حالت حد بالا و حد پایین محاسبه و مطابق شکل ۶ برای بلندمدت و شکل ۷ برای کوتاه‌مدت ترسیم گردید و همچنین معیارهای ارزیابی آن شامل PICP، MIPW و CWC در جدول ۷ ارائه شد. با بررسی مقادیر شاخص CWC در جدول ۷ به لحاظ عدم قطعیت داده‌های تأثیرگذار در پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان، نتایج حاصل از معیارهای ارزیابی در چهارفصل دسته‌بندی شده است، در فصل پائیز (ماه‌های ۱ الی ۳) مقادیر شاخص ارزیابی خیلی کمتر، در فصل زمستان (ماه‌های ۴ الی ۶) بیشتر، در فصل بهار (ماه‌های ۷ الی ۹) خیلی بیشتر و در فصل تابستان (ماه‌های ۱۰ الی ۱۲) بیشتر می‌باشد، بنابراین با توجه به تعریف شاخص CWC هرچه مقادیر آن بیشتر، عدم قطعیت بیشتر و هر چه مقادیر آن کمتر عدم قطعیت کمتر می‌شود و نتیجه این بررسی نشان

ب) شاخص آسیب‌پذیری

بیانگر شدت کمبود در طی دوره شکست می‌باشد، که به‌صورت نسبت کل آب عرضه‌شده در طول دوره‌های شکست به کل تقاضا در طول همان دوره‌های که شکست اتفاق افتاده است می‌باشد که به‌صورت رابطه (۲۳) تعریف می‌گردد (Razzaghi et al., 2013).

$$\eta = \frac{\sum R_t^* - \sum R_t}{\sum R_t^*} \quad (23)$$

که در آن R_t^* تقاضای موردنظر در طول t امین دوره شکست، R_t مقدار آب رهاشده از سیستم در طول t امین دوره شکست، f تعداد کل دوره‌های شکست می‌باشد. و η شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد.

ج) شاخص پایداری

با توجه به عدم وجود رابطه‌ی همگرایی بین شاخص‌های عملکرد مخزن در برخی بررسی‌ها، لاکس و همکاران شاخص پایداری را که ترکیبی از سه شاخص فوق بود را معرفی نمود (Loucks et al., 2017). گزینه‌ای که بیشترین شاخص پایداری را داشته باشد به‌عنوان گزینه بهینه معرفی می‌شود. شاخص پایداری از رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود (Razzaghi et al., 2013).

$$\varphi = \delta \gamma (1 - \eta) \quad (24)$$

که در آن φ شاخص پایداری، δ شاخص اعتمادپذیری، γ شاخص سرعت برگشت‌پذیری و η شاخص آسیب‌پذیری می‌باشد. در رابطه بالا شاخص سرعت برگشت‌پذیری از رابطه (۲۵) محاسبه می‌شود.

$$\gamma = \frac{1}{f/f_s} \quad (25)$$

که در آن، f_s تعداد دوره‌های شکست به‌طور پیوسته و f تعداد کل دوره‌های زمانی شکست می‌باشد.

نتایج و بحث

در این تحقیق از داده‌های ۲۶ سال (۱۳۷۶-۱۴۰۲) دوران بهره‌برداری سد علویان جهت انجام مدل‌سازی از طریق تئوری اعداد Z در برآورد بهینه حجم مخزن و میزان رهاسازی از مخزن سد استفاده شد. نتایج مدل‌سازی اعداد Z با نتایج الگوریتم ژنتیک و منطق فازی کلاسیک مقایسه گردید. با توجه به اینکه هدف از این تحقیق تعیین پارامترهای بهینه بهره‌برداری به هنگام از سد علویان در ۱۲گام بعد می‌باشد. به دلیل عدم قطعیت پارامترهایی مثل بارش، تبخیر، دمای حداقل و حداکثر، جریان آب ورودی به مخزن سد و... در سطح حوضه آبریز سد علویان، پیش‌بینی جریان‌های ورودی به مخزن سد و بهینه‌سازی را برای عوامل بهره‌بردار سد دشوار می‌سازد. بنابراین در این تحقیق پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان از طریق مدل‌سازی FFNN انجام گرفت و در جهت کاهش عدم قطعیت‌ها و

می‌باشد و همین‌طور فاصله حد بالا و پایین در فصل پائیز از سه ماهه‌های دیگر کمتر می‌باشد. از طرفی با توجه به نمودار ۷ هرچه تأخیر زمانی بیشتر بوده عدم قطعیت بیشتر و فاصله حد بالا و حد پائین افزایش یافته است.

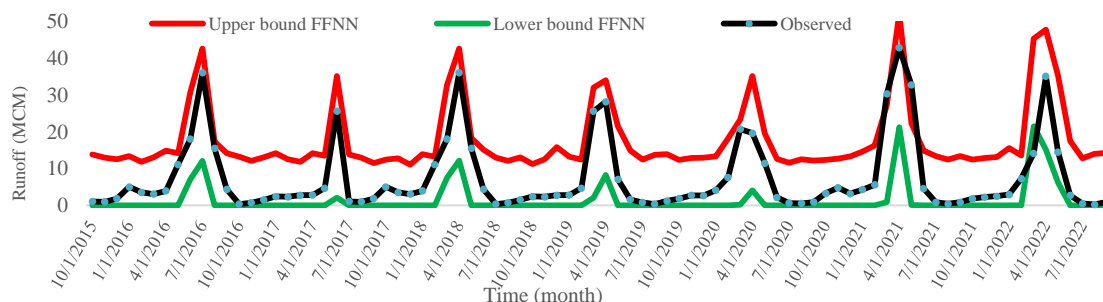
می‌دهد در مواقعی که دبی ورودی به مخزن سد کمتر بوده به نسبت عدم قطعیت نیز کاهش می‌یابد و هرچه مقدار دبی ورودی به مخزن سد بیشتر بوده به نسبت عدم قطعیت نیز افزایش می‌یابد، بنابراین فاصله دو حد بالا و پایین در فصل بهار از بقیه سه ماهه‌ها بیشتر

جدول ۷- شاخص‌های ارزیابی مدل‌سازی عدم قطعیت از طریق فواصل پیش‌بینی

| ماه | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
|--------|-----------|------|------|------------|------|------|----------|------|------|-------------|------|------|
| فصل‌ها | فصل پائیز | | | فصل زمستان | | | فصل بهار | | | فصل تابستان | | |
| PICP | ۰/۹۲ | ۰/۹۵ | ۰/۲۸ | ۰/۷۳ | ۰/۹۱ | ۰/۷ | ۰/۹ | ۰/۶۷ | ۰/۹۴ | ۰/۹۲ | ۰/۹ | ۰/۸۵ |
| MIPW | ۰/۸ | ۱/۷۹ | ۰/۰۴ | ۱/۰۵ | ۲/۰۵ | ۱/۷۸ | ۲/۸۹ | ۳/۴۵ | ۲/۸۸ | ۳/۳۲ | ۲/۶۶ | ۰/۷۷ |
| CWC | ۰/۸ | ۱/۷۹ | ۰/۰۳ | ۵/۲۴ | ۴/۰۵ | ۶/۸۵ | ۱۰/۹۸ | ۲۶/۵ | ۹/۸۸ | ۳/۳۲ | ۲/۶۶ | ۱/۸۴ |

عدم قطعیت شود. شکل ۶ نشان می‌دهد داده‌های مشاهداتی در محدوده حد بالا و حد پایین پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان قرار گرفته است. این نمودار در بهره‌برداری از مخزن سد در شرایط پرابی (سیلابی) و کم‌آبی (خشک‌سالی) به مدیر سد امکان تهیه سناریوهای مختلف رهاسازی و تصمیم‌سازی را می‌دهد.

نتایج داده‌های مدل پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان در شکل ۶ در دو محدوده بالا و پایین در مرحله صحت سنجی ترسیم گردید. با بررسی نتایج مدل FNNN در مقایسه با سری داده‌های مشاهداتی دوره آماری نشان می‌دهد، می‌تواند به‌طور مؤثر عدم قطعیت‌ها را مدیریت کند و منجر به بهبود دقت و کاهش



شکل ۶- مقایسه نمودار حاصل از پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد علویان در دو محدوده بالا و پائین در مرحله صحت سنجی با سری داده‌های مشاهداتی

نتایج بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان

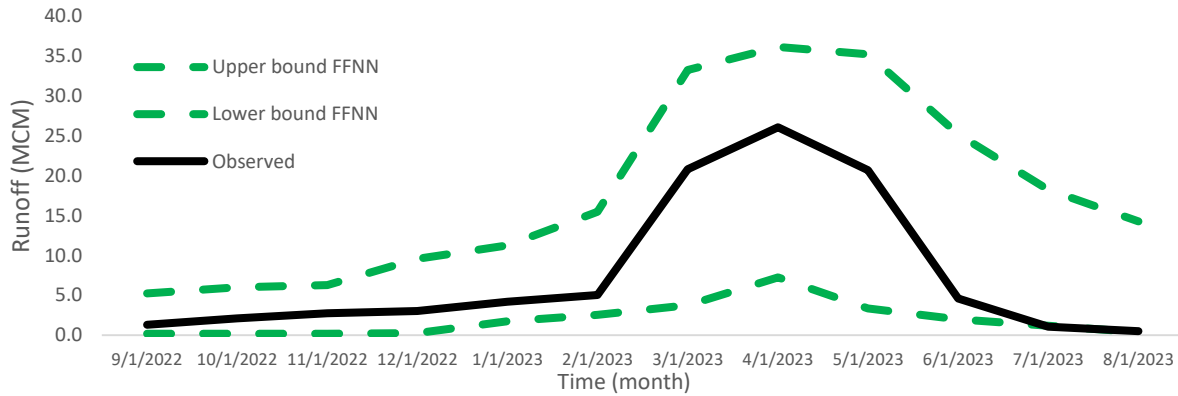
بهینه‌سازی از طریق اعداد Z

متغیرهای زبانی حجم مخزن و رهاسازی از مخزن سد علویان، بر اساس داده‌های متوسط آماری ۲۶ ساله، دسته‌بندی و تبدیل آن‌ها صورت گرفته است. در این مقاله برای کمی‌سازی عامل اول (A) در مورد هر پارامتر، از سه متغیر زبانی شامل کم، متوسط و زیاد که به‌طور خلاصه به صورت $\{H, M, L\}$ ، مطابق جدول ۸ استفاده شده است. برای فازی کردن حجم مخزن از عدد فازی مثلثی و برای فازی کردن حجم رهاسازی از عدد فازی دوزنقه استفاده شده است (Lavasani et al., 2015). با بررسی داده‌های سری تاریخی ۲۶ سال دوران بهره‌برداری سد علویان، حداقل و حداکثر حجم مخزن در چهار فصل سال مطابق جدول ۸ به‌دست‌آمده است و T_{St}

مدل‌های هوش مصنوعی مثل FNNN مدل‌های غیرخطی هستند و با افزایش گام‌های زمانی پیش‌بینی، که در مدل‌های غیرخطی در ذات آن‌ها است، خطا افزایش می‌یابد. در مدل‌های خطی مانند رگرسیون خطی، خطا افزایش نمی‌یابد، اما دقت در این مدل‌ها کمتر است. برای بررسی روند تغییرات با افزایش تاخیرات در ۱۲ ماه آتی، در مرحله اول، PI مدل FFNN محاسبه و در دو حد بالا و پائین نمودار پیش‌بینی جریان ورودی ترسیم شد. و با نمودار جریان ورودی مشاهداتی به مخزن سد مقایسه گردید. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، با افزایش تأخیر، فواصل پیش‌بینی (PIs) بین حد بالا و حد پایین به ویژه در فصل بهار نسبت به سه فصل دیگر افزایش یافته است، بنابراین مطابق شکل ۷ افزایش زمان تأخیر با افزایش عدم قطعیت مطابقت دارد.

از مخزن سد مشخص شد و T^R به عنوان نیاز هدف برای هریک از فصل‌ها در یک سال آبی تعریف گردید.

به عنوان حجم هدف و مجهول مسئله در نظر گرفته شده است. با توجه به داده‌های مجموع نیاز پایاب سد و تجربه کارشناسی در ۲۶ سال دوران بهره‌برداری سد علویان حداقل و حداکثر حجم رهاسازی



شکل ۷- PI های ساخته شده برای مدل FFNN در زمان‌های تأخیر متفاوت در دو حد بالا و پائین و مقایسه با جریان ورودی مشاهداتی

جدول ۸- متغیرهای زبانی حجم مخزن و حجم رهاسازی در چهار فصل یک سال آبی (عامل اول A)

| متغیر زبانی | وزن ترم‌های زبانی - حجم مخزن | متغیر زبانی | وزن ترم‌های زبانی - حجم رهاسازی |
|-------------------------|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| فصل پائین (کم) (L) | ۷ | فصل پائین (کم) (L) | ۴ |
| فصل زمستان (متوسط) (M) | ۱۲ | فصل زمستان (کم) (L) | ۲ |
| فصل بهار (زیاد) (H) | ۳۰ | فصل بهار (زیاد) (H) | ۱۲ |
| فصل تابستان (متوسط) (M) | ۱۲ | فصل تابستان (متوسط) (M) | ۱۰ |

مثلی نرمال شده استفاده شده است. وزن متغیرهای زبانی مورد استفاده در کمی کردن میزان عامل دوم (B) نیز برای هریک از فصل‌های مختلف سال در جدول ۹ نشان داده شده است (Kang et al., 2012a).

همانطوریکه اشاره گردید برای کمی سازی میزان اعتبار عامل اول در مورد هر پارامتر، از کمی سازی پیش‌بینی کارشناسان و متخصصین بهره‌برداری سدها در مورد پارامتر عامل دوم (B) به صورت متغیرهای زبانی، کم (L)، متوسط (M) و زیاد (H) استفاده شده است. برای فازی کردن این بخش نیز از عدد فازی

جدول ۹- وزن متغیرهای زبانی قابلیت اطمینان در چهار فصل یک سال آبی (عامل دوم B)

| متغیر زبانی | وزن ترم‌های زبانی - حجم مخزن | متغیر زبانی | وزن ترم‌های زبانی - حجم رهاسازی |
|-------------------------|------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| فصل پائین (زیاد) (H) | ۰/۸ | فصل پائین (زیاد) (H) | ۰/۹ |
| فصل زمستان (متوسط) (M) | ۰/۷ | فصل زمستان (زیاد) (H) | ۰/۸ |
| فصل بهار (کم) (L) | ۰/۶ | فصل بهار (متوسط) (M) | ۰/۷ |
| فصل تابستان (متوسط) (M) | ۰/۷ | فصل تابستان (کم) (L) | ۰/۶ |

اعداد فازی نرمال شده برای حجم مخزن تحت عنوان تابع عضویت مثلی $(\mu_{SB}(x))$ و برای حجم رهاسازی تحت عنوان تابع عضویت مثلی $(\mu_{RB}(x))$ در نظر گرفته شده است.

برای بررسی تأثیر عدم قطعیت در عامل اول (A) و افزایش قابلیت اطمینان داده‌های حجم مخزن سد علویان در فصل پائین از عامل دوم (B) به صورت اعداد فازی نرمال شده با توجه به تجربه و

برای سهولت کار دسته‌بندی اطلاعات اعداد Z برای حجم رهاسازی و حجم مخزن در چهار فصل از سال آبی در نظر گرفته شده است. محدودیت عامل اول (A) برای حجم مخزن به صورت اعداد واقعی تحت عنوان تابع عضویت مثلی $(\mu_{SA}(x))$ و برای حجم رهاسازی نیز به صورت اعداد واقعی تحت عنوان تابع عضویت دوزنقه $(\mu_{RA}(x))$ در نظر گرفته شده است. برای عامل دوم (B) به صورت

دلیل نوسانات کمتر جریان ورودی، عدم قطعیت کمتر بوده و به تبع آن ضریب قابلیت اطمینان بالا مطابق نمودار ۸(ب) در نظر گرفته شده است.

نظرات کارشناسان و مسئولین سدها استفاده گردید با توجه به سری داده‌های ۲۶ ساله سد علویان و تجربه چندین ساله کارشناسان سد متوسط، حداقل و حداکثر حجم مخزن سد در فصل پائیز به دست آمده است و همین طور در فصل پائیز مقادیر ورودی به سد کمتر بوده و به



شکل ۸- نمودار تابع عضویت الف) محدودیت حجم مخزن و ب) قابلیت اطمینان حجم مخزن - فصل پائیز

همین طور حجم آب ورودی به مخزن سد در فصل بهار در مقایسه با فصل زمستان به شدت افزایشی بوده و به دلیل افزایش نوسانات جریان ورودی در مقایسه با فصل زمستان، عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل زمستان به شدت افزایشی بوده و ضریب قابلیت اطمینان مطابق نمودار ۹(ب) در نظر گرفته شده است.

همین طور در فصل زمستان در مقایسه با فصل پائیز مقادیر ورودی به سد نسبتاً افزایشی بوده و به دلیل افزایش نوسانات جریان ورودی در مقایسه با فصل پائیز، عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل پائیز نسبتاً افزایشی و ضریب قابلیت اطمینان کاهش یافته است و در ادامه متوسط، حداقل و حداکثر حجم مخزن سد در فصل بهار مطابق نمودار ۹(الف) به دست آمده است و



شکل ۹- نمودار تابع عضویت الف) محدودیت حجم مخزن و ب) قابلیت اطمینان حجم مخزن - فصل بهار

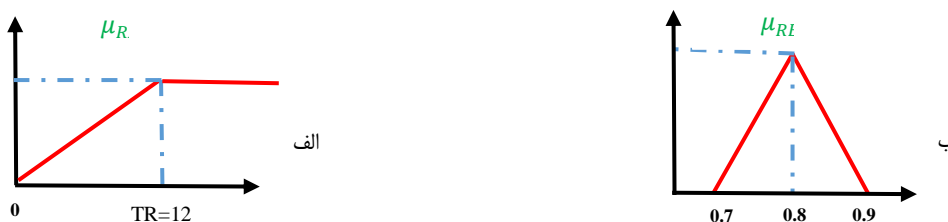
ورودی به سد نسبتاً افزایشی بوده و به دلیل افزایش نوسانات جریان ورودی در مقایسه با فصل پائیز و تأثیر آن در برآورد و تخمین حجم رهاسازی از مخزن سد، عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل پائیز افزایش نسبی داشته و ضریب قابلیت اطمینان کاهش یافته است. در ادامه متوسط، حداقل و حداکثر حجم رهاسازی از مخزن سد در فصل بهار مطابق نمودار ۱۱(الف) به دست آمده است و همین طور مقادیر حجم آب ورودی به مخزن سد در فصل بهار در مقایسه با فصل زمستان به شدت افزایشی بوده است و به دلیل افزایش نوسانات جریان ورودی در مقایسه با فصل زمستان که تأثیر مستقیمی در برآورد و تخمین حجم رهاسازی از مخزن سد دارد، باعث شده عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل زمستان به شدت افزایشی بوده و ضریب قابلیت اطمینان مطابق نمودار ۱۱(ب) در نظر گرفته شده است.

در فصل تابستان نیز در مقایسه با فصل بهار مقادیر ورودی به سد کاهش یافته و به دلیل نوسانات کمتر جریان ورودی در مقایسه با فصل بهار، عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل بهار کاهش یافته و ضریب قابلیت اطمینان بیشتر از فصل بهار بوده است. برای بررسی تأثیر عدم قطعیت در عامل اول (A) و افزایش قابلیت اطمینان داده‌های حجم رهاسازی از مخزن سد علویان برای تأمین نیازهای پایاب سد علویان در فصل پائیز از عامل دوم (B) به صورت اعداد فازی نرمال شده استفاده گردید و مشابه محاسبات حجم مخزن متوسط، حداقل و حداکثر حجم رهاسازی از مخزن سد در فصل پائیز به دست آمده است و همین طور در پائیز مقادیر ورودی به سد کمتر بوده و به دلیل نوسانات کمتر جریان ورودی، عدم قطعیت کمتر بوده و به تبع آن ضریب قابلیت اطمینان بالا مطابق نمودار ۱۰(ب) در نظر گرفته شده است.

همین طور در فصل زمستان در مقایسه با فصل پائیز مقادیر



شکل ۱۰- نمودار تابع عضویت الف) محدودیت حجم رهاسازی و ب) قابلیت اطمینان حجم رهاسازی- فصل پائیز



شکل ۱۱- نمودار تابع عضویت الف) محدودیت حجم رهاسازی و ب) قابلیت اطمینان حجم رهاسازی- فصل بهار

اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک تبدیل می‌شوند. بدین ترتیب در ابتدا با استفاده از رابطه (۴) میزان α برای عامل دوم عدد Z (عدد فازی B) در هر پارامتر تعیین گردید و سپس برای تبدیل اعداد Z به اعداد فازی کلاسیک، میزان جذر α به دست آمده از مرحله قبل در هر یک از پارامترهای عامل اول عدد Z یعنی A ضرب شد. مراحل تبدیل اعداد Z حجم مخزن و حجم رهاسازی از مخزن سد علویان به اعداد فازی کلاسیک در هر یک از فصل‌ها در جداول ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

در فصل تابستان نیز در مقایسه با فصل بهار مقادیر حجم آب ورودی به مخزن سد به شدت کاهش یافته است و به دلیل نوسانات کمتر جریان ورودی در مقایسه با فصل بهار که تأثیر مستقیمی در برآورد و تخمین حجم رهاسازی از مخزن سد دارد و با کاهش حجم مخزن در این فصل و عدم تأمین مصارف پایاب سد مطابق برنامه، ضمن افزایش تنش آبی در بخش‌های مختلف، عدم قطعیت در این فصل در مقایسه با فصل زمستان و پائیز به شدت افزایش یافته و ضریب قابلیت اطمینان کاهش یافته است. با توجه به مطالب تشریح شده در بخش (۲-۴-۳) این تحقیق،

جدول ۱۰- تبدیل اعداد Z حجم مخزن به اعداد فازی کلاسیک

| عنوان دسته‌بندی | ضریب وزن قابلیت اطمینان ($\sqrt{\alpha_s}$) | دسته‌بندی اعداد فازی | اعمال ضریب وزن قابلیت اطمینان ($\sqrt{\alpha_s}$) | درجه عضویت مساوی ۱ |
|---------------------|-----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| فصل پائیز (کم) | ۰/۹۵ | (7, Ts, 25) | (6.65, 0.95Ts, 23.75) | 0.95Ts |
| فصل زمستان (متوسط) | ۰/۹ | (12, Ts, 30) | (10.8, 0.9Ts, 27) | 0.9Ts |
| فصل بهار (زیاد) | ۰/۸۴ | (30, Ts, 60) | (25.2, 0.84Ts, 50.4) | 0.84Ts |
| فصل تابستان (متوسط) | ۰/۹ | (12, Ts, 30) | (10.8, 0.9Ts, 27) | 0.9Ts |

به مخزن سد، حجم تبخیر از سطح مخزن، نیازهای واقعی پایاب سد، حجم مخزن در طول ۳۳۰ ماه (۲۶ سال) استفاده گردید، ابتدا سری زمانی داده‌های موجود پس از آماده‌سازی به ۲۶ سال (۳۳۰ ماه) مرتب گردید، سپس از تعداد داده‌های موجود ۲۶ سال به ترتیب ۲۵ سال

تحلیل مدل‌سازی بهینه حجم مخزن و حجم رهاسازی از مخزن سد علویان

در این تحقیق جهت انجام مدل‌سازی از سری تاریخی داده‌های آماری شامل حجم رهاسازی از مخزن سد علویان، جریان آب ورودی

اجرا گردید و نتایج سال‌های آخر مدل‌سازی به‌عنوان حجم مخزن و حجم رهاسازی محاسباتی با داده‌های مشاهداتی (بهره‌برداری شده) سال‌های آخر مقایسه و تحلیل گردید و نتایج حاصل از مدل‌های بهینه‌سازی در جداول ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.

برای انجام مراحل آموزش و یک سال آخر برای صحت‌سنجی یا به‌عنوان سال آماری پیش‌بینی در نظر گرفته شد و محاسبات پارامترهای بهینه بهره‌برداری در گام اول از روش الگوریتم ژنتیک، در گام دوم از منطق فازی کلاسیک و در گام سوم از روش عدد Z استفاده شد. مدل‌ها برای داده‌های گام اول تا سوم به‌صورت جداگانه

جدول ۱۱- تبدیل اعداد Z حجم رهاسازی از مخزن سد به اعداد فازی کلاسیک

| عنوان دسته‌بندی | ضریب وزن قابلیت اطمینان ($\sqrt{\alpha_s}$) | دسته‌بندی اعداد فازی | اعمال ضریب وزن قابلیت اطمینان ($\sqrt{\alpha_s}$) | درجه عضویت مساوی ۱ |
|--------------------|-----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|--------------------|
| فصل پائیز (کم) | 0.95 | (0,2,4,8) | (0,1.9,3.8,7.6) | (1.9) |
| فصل زمستان (متوسط) | 0.95 | (0,2,4,8) | (0,1.9,3.8,7.6) | (1.9) |
| فصل بهار (زیاد) | 0.9 | (0,12,14,16) | (0,10.8,12.6,14.4) | (10.8) |
| فصل زمستان (متوسط) | 0.84 | (0,12,14,16) | (0,10.1,11.7,13.4) | (10.1) |

جدول ۱۲- داده‌های محاسباتی حجم بهینه مخزن سد علویان در ۱۲ ماه آبی از طریق الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z

| روش | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|---------------|-----|------|-----|-----|------|-------|---------|----------|-------|------|-------|--------|
| GA | ۸ | ۱۷ | ۱۸ | ۲۱ | ۲۴ | ۲۹ | ۳۶ | ۴۸ | ۳۶ | ۲۸ | ۱۸ | ۱۰ |
| Classic Fuzzy | ۱۰ | ۱۲ | ۱۵ | ۱۷ | ۱۸ | ۲۳ | ۳۱ | ۴۴ | ۳۳ | ۲۳ | ۱۵ | ۱۰ |
| Z-Number | ۹ | ۱۰ | ۱۲ | ۱۳ | ۱۵ | ۱۸ | ۲۵ | ۴۰ | ۳۰ | ۲۲ | ۱۴ | ۹ |
| Obser | ۸/۸ | ۸/۵ | ۹/۲ | ۹/۶ | ۱۰/۱ | ۱۳/۵ | ۲۳/۸ | ۳۱/۷ | ۲۹/۵ | ۱۸/۲ | ۱۱/۵ | ۹/۲ |

جدول ۱۳- داده‌های محاسباتی بهینه رهاسازی از مخزن سد علویان در ۱۲ ماه آبی از طریق الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z

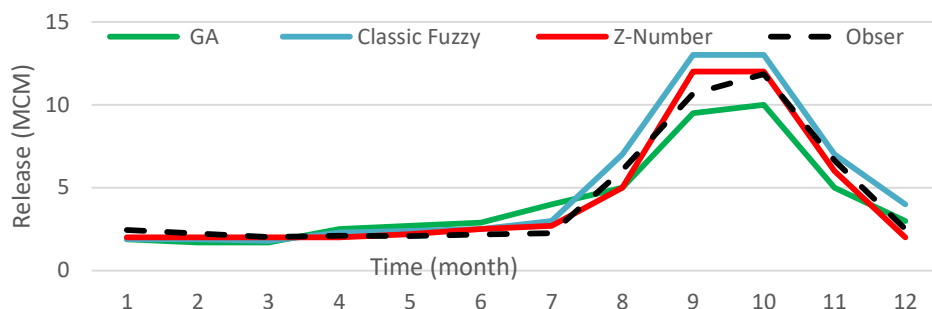
| روش | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|---------------|------|------|------|-----|------|-------|---------|----------|-------|-------|-------|--------|
| GA | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۲/۵ | ۲/۷ | ۲/۹ | ۴/۰ | ۵/۰ | ۹/۵ | ۱۰/۰ | ۵/۰ | ۳/۰ |
| Classic Fuzzy | ۲/۰ | ۱/۹ | ۱/۸ | ۲/۳ | ۲/۴ | ۲/۵ | ۳/۰ | ۷/۰ | ۱۳/۰ | ۱۳/۰ | ۷/۰ | ۴/۰ |
| Z-Number | ۲/۰ | ۲/۰ | ۲/۰ | ۲/۰ | ۲/۲ | ۲/۵ | ۲/۷ | ۵/۰ | ۱۲/۰ | ۱۲/۰ | ۶/۰ | ۲/۰ |
| Obser | ۲/۴۵ | ۲/۲۳ | ۲/۰۲ | ۲/۱ | ۲/۰۸ | ۲/۱۸ | ۲/۲۶ | ۶/۰۵ | ۱۰/۶۸ | ۱۱/۸۵ | ۶/۶۴ | ۲/۵۱ |

ترتیب برابر ۹، ۱۱ و ۱۴ می‌باشد و نتایج در جدول ۱۴ ارائه شده است. با تحلیل نتایج جدول ۱۴ نشان می‌دهد که دامنه تغییرات شاخص پایداری نسبت به سایر شاخص‌ها کمتر بود، ولی دامنه تغییرات شاخص اعتمادپذیری در مقایسه با سایر شاخص‌ها زیاد بود، بر همین اساس، قابلیت اطمینان بیشتری برای ارزیابی وضعیت سیستم را دارد. رفتار سیستم مخازن به شاخص‌های عملکرد سیستم وابسته بوده و با کاهش ضریب اعتمادپذیری یا افزایش ضریب آسیب‌پذیری مقدار کمبود تأمین آب کشاورزی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین برای کاهش کمبودها یکی از روش‌ها کاهش تقاضای کشاورزی و همچنین استفاده از روش‌های بهینه و مدیریتی می‌باشد.

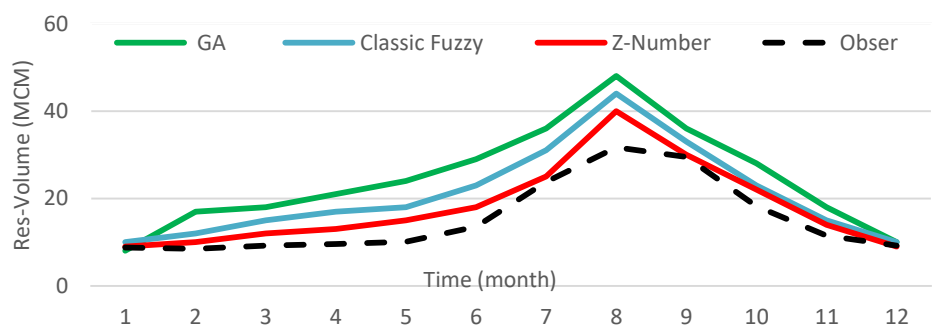
برای ارزیابی عملکرد روش‌های موردبررسی در بهینه‌سازی پارامترهای بهینه بهره‌برداری مخزن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری استفاده گردید. شکل ۱۲ مقادیر تقاضای حجم رهاسازی مشاهداتی (بهره‌برداری شده) با مقادیر حجم رهاسازی محاسباتی برای سه روش الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z باسیاست فعلی سد علویان را در ۱۲ ماه آبی نشان می‌دهد. با تحلیل و ارزیابی نتایج نشان می‌دهد که در گام اول ۷۷ درصد، در گام دوم ۸۵ درصد و در گام سوم ۹۲ درصد از نیازهای مربوط به تقاضای آب کشاورزی تأمین شده است. همچنین شاخص پایداری برای الگوریتم GA، منطق فازی کلاسیک و عدد Z به

جدول ۱۴- مقادیر شاخص‌های عملکرد حاصل از اجرای مدل بهینه‌سازی در بهره‌برداری از مخزن سد علویان

| روش‌ها | کل کمبود (MCM) | قابلیت اعتماد (درصد) | آسیب‌پذیری (درصد) | شاخص پایداری |
|-----------------|----------------|----------------------|-------------------|--------------|
| GA | 39.2 | 77 | 29 | 9 |
| Classical Fuzzy | 31.5 | 85 | 24 | 11 |
| Z-Number | 17.13 | 92 | 21 | 14 |



شکل ۱۲- مقایسه مقادیر تقاضای حجم رهاسازی مشاهداتی و حجم رهاسازی بهینه محاسباتی از طریق چهار روش مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z در ۱۲ ماه آبی سد علویان



شکل ۱۳- مقایسه مقادیر حجم مخزن مشاهداتی و حجم مخزن بهینه محاسباتی از طریق سه روش الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z در ۱۲ ماه آبی سد علویان

پایاب سد و حجم ذخیره استفاده شد و برای سال ۲۷ حجم مخزن مطابق نمودار ۱۴ و حجم رهاسازی مطابق نمودار ۱۵ پیش‌بینی گردید. همچنین بر اساس معیارهای اعتمادپذیری، آسیب‌پذیری و پایداری، روش عدد Z به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد و از نتایج این مدل برای ترسیم منحنی‌های فرمان بهره‌برداری برای حجم مخزن و حجم رهاسازی در ماه‌های مختلف سال آبی در دو بازه حد بالا و حد پائین استفاده گردید. با توجه به اینکه در زمان تحلیل نتایج این مقاله، داده‌های آماری سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ (سال ۲۷) برای حجم رهاسازی و حجم مخزن مطابق جدول ۱۵ در بهره‌برداری از مخزن سد علویان تحقیق‌یافته است، نتایج حجم رهاسازی و حجم مخزن با داده‌های مشاهداتی تحقیق‌یافته سال آبی ۱۴۰۳-۱۴۰۲ مقایسه گردید.

همان‌طوری که اشاره گردید یکی از ورودی‌های مدل بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سدها، پیش‌بینی جریان ورودی می‌باشد، در این تحقیق جریان ورودی به مخزن سد علویان با استفاده از روش FFNN پیش‌بینی گردید و به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت روش اعمال شده، مدل PI-FFNN با استفاده از روش LUBE برای دو حالت حد بالا و حد پایین محاسبه شد. مطابق تابع هدف و قیدهای آن، وبا استفاده از سایر داده‌ها، مقادیر بهینه حجم مخزن و حجم رهاسازی سد علویان در یک سال آبی آینده در دو حالت حد بالا و حد پائین محاسبه و مطابق نمودارهای ۱۴ و ۱۵ ترسیم گردید.

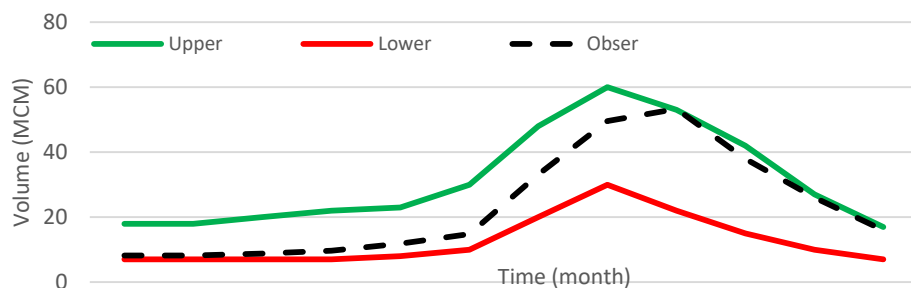
به همین ترتیب نمودار ۱۳ مقایسه مقادیر حجم مخزن بهینه حاصل از سه روش الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z را با داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد و نتایج حجم مخزن بهینه حاصل از مدل محاسباتی اعداد Z به داده‌های مشاهداتی (بهره‌برداری شده) نزدیک بوده و مطابقت خوبی دارد.

ترسیم منحنی فرمان بر اساس پارامترهای بهینه بهره‌برداری در ۱۲ ماه آبی

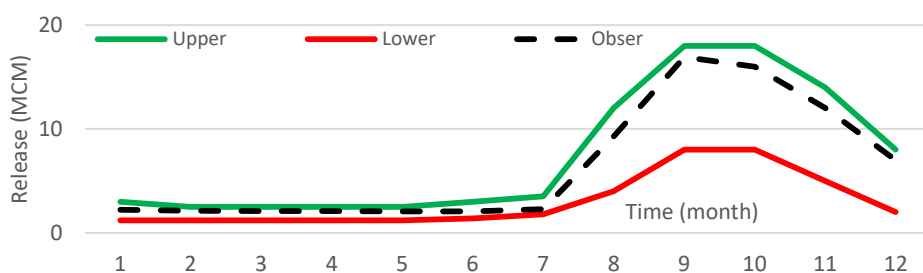
در این تحقیق علاوه بر مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان، منحنی فرمان بهره‌برداری از سد علویان جهت تأمین نیازهای پایاب سد برای ۱۲ ماه آبی ترسیم‌شده و به بهره‌بردار این امکان را ایجاد می‌کند که بتواند در هر مرحله زمانی، با توجه به مشخصات مخزن و کل حجم آب در دسترس، در خصوص میزان رهاسازی بهینه از مخزن سد تصمیم‌گیری نماید. بر اساس مطالعاتی که بر روی قابلیت‌های هر یک از روش‌های بهینه‌سازی موجود انجام گرفت، سه مدل بهینه‌سازی بر مبنای الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و عدد Z توسعه داده شد. با توجه به اینکه در این تحقیق بهترین نتایج برای تابع هدف در تحلیل مدل‌سازی در یک دوره کوتاه‌مدت مربوط به روش عدد Z بود، از نتایج این روش به‌عنوان نوآوری این تحقیق برای به دست آوردن پارامترهای بهینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن جریان آب ورودی و نیازهای ماهانه

جدول ۱۵ - داده‌های مشاهداتی حجم مخزن و حجم رهاسازی از مخزن سد علویان در سال آبی (۱۴۰۳-۱۴۰۲) برای تأمین اهداف مصارف (MCM)

| | مهر | آبان | آذر | دی | بهمن | اسفند | فروردین | اردیبهشت | خرداد | تیر | مرداد | شهریور |
|-------------|------|------|-----|-----|------|-------|---------|----------|-------|-----|-------|--------|
| حجم رهاسازی | ۲/۲۱ | ۲/۱۳ | ۲/۱ | ۲/۱ | ۲/۰۶ | ۲/۰۶ | ۲/۲۷ | ۹/۲۸ | ۱۶/۹ | ۱۶ | ۱۲ | ۸ |
| حجم مخزن | ۸/۲۴ | ۸/۲ | ۸/۸ | ۹/۷ | ۱۱/۸ | ۱۴/۸ | ۳۳/۱ | ۴۹/۶ | ۵۳/۳ | ۳۸ | ۲۶ | ۱۶ |



شکل ۱۴ - منحنی فرمان ماهانه پیش‌بینی حجم مخزن سد علویان با استفاده از روش اعداد Z



شکل ۱۵ - مقایسه منحنی فرمان ماهانه پیش‌بینی حجم رهاسازی از مخزن سد علویان با استفاده از روش اعداد Z با داده‌های مشاهداتی

بدست آمده است، عدم وجود مصرف آب کشاورزی و کمی دبی جریان ورودی به مخزن سد و به تبع آن کاهش عدم قطعیت و افزایش ضریب قابلیت اطمینان در این فصل‌ها بوده است و همین‌طور به علت شروع فصل آبیاری در اردیبهشت‌ماه تا آخر شهریورماه مربوط به فصل‌های بهار و تابستان و افزایش دبی جریان ورودی به مخزن در فصل بهار، فاصله حد بالا و پایین افزایش یافته و به تبع آن عدم قطعیت افزایش و ضریب قابلیت اطمینان در این فصل‌ها به نسبت کاهش یافته است.

با بررسی منحنی فرمان در دو حد بالا و پایین نشان می‌دهد در صورتی که منحنی داده‌های مشاهداتی و تحقق یافته به حد بالا نزدیک باشد شرایط ترسالی را دیکته می‌کند و در صورتی که به حد پایین نزدیک باشد شرایط خشکسالی و احتمال کمبود آب در ماه‌های آتی را دیکته می‌کند و به مدیر سد تصمیم‌سازی می‌کند که برای بهره‌برداری سد علویان سناریوهای مختلف بهره‌برداری سد را تدوین نماید تا در شرایط ترسالی برای کنترل سیل و در نظر گرفتن فضای استهلاک سیل آمادگی‌های لازم داشته باشد و همین‌طور در شرایط

با بررسی نمودار ۱۴ نشان می‌دهد به لحاظ اعمال تأثیر عدم قطعیت و ضریب قابلیت اطمینان در روش اعداد Z برای تعیین حجم بهینه ذخیره مخزن سد، نتایج کاملاً با رفتار منحنی فرمان واقعی سد علویان که در دوران ساخت سد طراحی شده و در اردیبهشت‌ماه نقطه پیک دارد همخوانی و مطابقت دارد. همین‌طور نمودار ۱۵ مربوط به حجم بهینه رهاسازی از مخزن سد در فصول آبیاری که در بهره‌برداری واقعی سد علویان از نیمه دوم اردیبهشت‌ماه شروع و در نیمه اول شهریورماه خاتمه می‌یابد، همخوانی و مطابقت خوبی با نیازهای واقعی دارد. بنابراین روش اعداد Z در مقایسه با سایر روش‌ها در مورد سیاست بهره‌برداری از مخزن سد نتیجه مطلوب‌تری داشته و همبستگی بهتری از خود نشان داد و به عنوان روش مناسب ارزیابی و انتخاب گردید و بر این اساس منحنی‌های فرمان رهاسازی و حجم مخزن برای کمک به عوامل بهره‌برداری مخزن سد علویان در تصمیم‌گیری با استفاده از روش اعداد Z در ۱۲ ماه آتی در دو تراز بالا و پایین ترسیم گردید. دلیل اینکه فاصله حد بالا و پایین در فصل‌های پاییز و زمستان در منحنی فرمان مربوط به حجم رهاسازی کمتر

(بهره‌برداری شده) نزدیک بوده و توانسته ۹۲ درصد از نیازهای کشاورزی پایین دست سد علویان را تأمین نماید. بنابراین روش اعداد Z در مقایسه با سایر روش‌ها در مورد سیاست بهره‌برداری از مخزن سد نتیجه مطلوب‌تری داشته و به‌عنوان روش مناسب ارزیابی انتخاب گردید و بر این اساس منحنی فرمان پارامترهای بهینه بهره‌برداری حاصل از مدل‌سازی اعداد Z در ۱۲ ماه آبی که بر اساس پیش‌بینی جریان ورودی از طریق روش تخمین‌های حد بالا و پائین (LUBE) برای سال ۲۷ (۱۴۰۳-۱۴۰۲) بدست آمد، نشان داد که حجم رهاسازی مشاهداتی سد علویان در طول سال آبی جاری در محدوده پیش‌بینی واقع شده است. همین طور منحنی فرمان بهره‌برداری به مدیر سد علویان در شرایط مختلف پرآبی (سیلابی) و کم‌آبی (خشکسالی) برای تأمین آب پایاب سد تصمیم‌سازی و سناریوهای مختلفی ارائه می‌کند و این منحنی فرمان بهره‌برداری می‌تواند در ابتدای سال آبی تهیه و به‌عنوان دستورالعمل بهره‌برداری در طول سال مورد استفاده قرارگیرد.

درنهایت برای مطالعات آینده و توسعه این تحقیق، پیشنهاد می‌شود با توجه به وجود مدل‌های متنوع و جدید دیگر، در راستای افزایش دقت مدل‌سازی، از توانایی سایر روش‌های فرا ابتکاری چندهدفه مثل ازدحام ذرات برای بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخازن سدها و استخراج منحنی‌های فرمان بهینه و مقایسه با روش‌های مرسوم تعیین منحنی فرمان از جمله SOP استفاده‌شده و تأثیر روش اعمالی جدید بر روی دقت مدل‌سازی‌ها با مطالعه حاضر مقایسه گردد. همچنین توصیه می‌شود برای رهاسازی بهینه از مخزن سد در ۱۲ گام بعدی، به‌جای استفاده از یک مدل هوش مصنوعی برای پیش‌بینی جریان ورودی به مخزن سد در ۱۲ گام بعدی، از چندین مدل‌های هوش مصنوعی مثل سیستم استنتاج عصبی-فازی (ANFIS)، رگرسیون بردار پشتیبان (SVR) به‌صورت منفرد و همچنین با در نظر گرفتن ترکیب آن‌ها به‌عنوان ورودی مدل بهینه‌سازی استفاده گردد و نیز پیشنهاد می‌گردد این تحقیق برای چند مخزنه دارای چند هدف با تخصیص آب برای اهداف شرب، کشاورزی و نیروگاه توسعه داده شود و با گسترش مدل اعداد Z برای بهینه‌سازی بهره‌برداری مخزن سد توأم با شبکه‌های آبیاری به‌صورت یکپارچه با لحاظ عوامل اجتماعی-اقتصادی، ممکن است رویکرد جامع‌تری برای بهره‌برداری پایدار مخزن سدها ارائه دهد.

منابع

جیرفتی، ا.، نجفی، ا.ع.، ۱۳۹۶. بهینه‌سازی سید سرمایه‌گذاری به‌وسیله ارزش در معرض ریسک تحت نظریه اعتبار با رویکرد اعداد Z. مجله مهندسی مالی و مدیریت اوراق بهادار. (۳۰).
چکرائی، ا.، صفوی، ح. و کبیری، ع. ۱۳۹۰. بهره‌برداری بهینه از مخزن

خشکسالی آمادگی لازم برای کمبود آب و کاهش مصارف اولویت‌های پایین، مثل کشاورزی داشته باشد.

نتیجه‌گیری

هدف از این تحقیق در نظر گرفتن عدم قطعیت و کاهش تأثیر آن در تعیین پارامترهای بهینه بهره‌برداری از مخزن سد علویان است. برای کاهش اثرات عدم قطعیت در این تحقیق تلاش گردید با استفاده از داده‌های آماری در دسترس و مدل‌سازی بهره‌برداری بهینه یک الگوی تصمیم‌گیری در خصوص بهره‌برداری بهینه از مخزن سد علویان در زمان‌های آینده توسعه داده شود. این مهم با استفاده از مدل‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد علویان و ارائه سیاست بهره‌برداری بهینه از سیستم تک مخزنه سد علویان با لحاظ تأمین نیاز کشاورزی دو شهر مراغه و بناب، نیازهای صددرصدی زیست‌محیطی رودخانه صوفی چای، مصرف آب شرب و صنایع شهرستان مراغه محقق گردید. جریان ورودی به مخزن سد علویان با استفاده از روش FFNN پیش‌بینی گردید و به‌منظور ارزیابی عدم قطعیت روش اعمال‌شده، PI مدل FFNN با استفاده از روش LUBE برای دو حالت حد بالا و حد پایین محاسبه شد و بر اساس معیارهای ارزیابی PIها در نظر گرفته‌شد و با استفاده از داده‌های پیش‌بینی جریان ورودی، و بر اساس تقاضاهای پایین دست سد، حجم اولیه مخزن در شروع سال آبی، مطابق تابع هدف و قیدهای آن و با کد نویسی در محیط متلب، مقادیر بهینه حجم رهاسازی و حجم مخزن سد علویان در یک سال آبی آینده در دو حالت حد بالا و حد پائین برآورد گردید. نظر به اینکه حجم رهاسازی در ارتباط با حجم ذخیره مخازن سدها بوده و بایستی توأماً و باهم بهینه‌سازی گردند و عوامل بهره‌برداری تأثیر آن‌ها را در مدیریت مخزن ببینند، لذا در این تحقیق تلاش گردید، پس از معرفی روش‌های بهینه‌سازی بهره‌برداری از مخزن سد و محاسبه پارامترهای بهینه از قبیل حجم مخزن و حجم رهاسازی از طریق روش‌های الگوریتم ژنتیک، منطق فازی کلاسیک و اعداد Z، نتایج حاصل از مدل‌سازی با داده‌های مشاهداتی سال ۲۷ مقایسه گردد و جهت ارزیابی عملکرد روش‌های بهینه‌سازی موردبررسی در بهره‌برداری بهینه از مخزن، از شاخص‌های عملکرد مخزن شامل اطمینان‌پذیری، آسیب‌پذیری و پایداری استفاده شد. در روش مدل‌سازی الگوریتم ژنتیک، ۷۷ درصد، در منطق فازی کلاسیک ۸۵ درصد و در روش مدل‌سازی اعداد Z، ۹۲ درصد از نیازهای مربوط به تقاضای آب کشاورزی پایاب سد علویان تأمین شده است. با تحلیل و ارزیابی نتایج نشان داد که در روش بهینه‌سازی اعداد Z به دلیل تأثیر ضریب قابلیت اطمینان و اعمال نظرات خبرگان و کارشناسان متخصص بهره‌برداری سدها دقت محاسبات زیاد بوده و نتایج حجم رهاسازی حاصل از مدل محاسباتی به داده‌های مشاهداتی

- Science. 9(3): 703-709.
- Kang, B., Wei, D., Li, Y. and Deng, Y. 2012b. Decision making using Z-numbers under uncertain environment. *Journal of computational Information systems*. 8(7): 2807-2814.
- Krohling, R.A., Pacheco, A.G.C. and dos Santos, G.A., 2019. TODIM and TOPSIS with Z-numbers. *Front. Inf. Technol. Electronic engineering*. 20: 283-291.
- Lavasani, S.M., Zendegani, A. and Celik, M. 2015. An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) application in petrochemical process industry, *Process Safety and Environmental Protection*. 93: 75-88.
- Loucks, D.P. and van Beek, E. 2017. *Water resource systems planning and management*. Berlin. 527-565.
- Mehta, D., Achour, B., Pastagia, J., Azamathulla, H., Verma, S., 2023. Review of reservoir operation. *Larhyss j*. 2023: 193-214.
- Mohab Ghods Consulting Engineers. 2005. *Operation instructions for Alavian Dam: Hydrology Report*. East Azerbaijan Regional Water Company, Tabriz, Iran.
- Maleki, S., Nourani, V., Najafi, H., Hosseini, A. and Chang-Qing Ke. 2023. Z-Numbers based novel method for assessing groundwater specific vulnerability. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122: 106104
- Mariwan, R., Hekmat, M., Kawa, Z., Luqman, S. and Kilgour, D. 2021. Fuzzy logic model for optimal operation of Darbandikhan reservoir, Iraq. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*. 16(4): 335-343, <https://doi.org/10.18280/ijdne.160401>
- Najafi, H., Nourani, V., Sharghi, E., Roushangar, K. and Dąbrowska, D. 2022. Application of Z-numbers to teleconnection modeling between monthly precipitation and large scale sea surface temperature. *Hydrology Research*. 53(1): 1-13.
- Nazari, M. and Kerachian, R., 2024. Optimal Operation of Reservoirs Considering Water Quantity and Quality Aspects: A Systematic State-of-the-Art Review. *Water Resources Management*. 1-34.
- Nourani, V., Najafi, H., Sharghi, E. and Roushangar, K. 2021b. Application of Z-numbers to monitor drought using large-scale oceanic-atmospheric parameters. *Journal of Hydrology*. 598(1): 126198.
- Nourani, V., Paknezhad, N. J. and Tanaka, H. 2021a. Prediction interval estimation methods for artificial neural network (ANN)-based modeling of the hydro-climatic processes. a review. *Sustainability*. 13(4): 1633.
- Nourani, V., Paknezhad, N. J., Sharghi, E. and Khosravi, A. 2019. Estimation of prediction interval
سد با استفاده از سیستم استنتاج عصبی- فازی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، ایران.
- Aliev, R.A. and Zeinalova, L.M. 2014. Decision making under Z-information. *Human-Centric Decision-Making Models for Social Sciences (Studies in Computational Intelligence)*. Berlin: Springer; 233-252
- Aliev, R.A., Huseynov, O.H., Aliyev, R.R. and Alizadeh, A.A. 2015. *The arithmetic of Z-numbers*. World Scientific; 316. <https://doi.org/10.1142/9575>
- Almubaidin, M.A., Ahmed, A.N., Sidek, L.M., Al-Assifeh, K.A.H., El-Shafie, A., 2024. Deriving Optimal Operation Rule for Reservoir System Using Enhanced Optimization Algorithms. *Water Resour. Manag.* 38: 1207-1223.
- Azadeh, A., Sberi, M., Atashbar, N.Z., Chang, E. and Pazhoheshfar, P. 2013. Z-AHP: A Z-number extension of fuzzy analytical hierarchy process, in: 2013 7th IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), IEEE, pp. 141-147.
- Chen, X.-Y. and Chau, K.-W., 2019. Uncertainty Analysis on Hybrid Double Feedforward Neural Network Model for Sediment Load Estimation with LUBE Method. *Water Resources Management*. 33: 3563-3577. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02318-4>
- Choudhari, S. A., Bhise D. V. and Sardeshmukh M.M. 2022. Optimal reservoir operation policy determination for uncertainty conditions. 3c *Empresa: investigación y pensamiento crítico*, 11(2).
- Hojjati, E., Mahtabi, G., Taran, F. and Kisi, O., 2020. Estimating evaporation from reservoirs using energy budget and empirical methods: Alavian dam reservoir, NW Iran. *Ital. The Journal of Agricultural Meteorology*. 1: 19-34.
- Kambalimath, S. and Deka, P.C. 2020. A basic review of fuzzy logic applications in hydrology and water resources. *Applied Water Science*. 10(191). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01276-2>
- Kang, B., Chhipi-Shrestha, G., Deng, Y., Hewage, K. and Sadiq R. 2018b. Stable strategies analysis based on the utility of Z-number in the evolutionary games. *Applied Mathematics and Computation*. 324: 202-217.
- Kang, B., Deng, Y., Hewage, K. and Sadiq, R. 2018a. A method of measuring uncertainty for Z-number. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 27(4): 731-738.
- Kang, B., Wei, D., Li, Y. and Deng, Y.A. 2012a. Method of converting Z-number to classical fuzzy number. *Journal of Information & computational*

- Sharghi, E., Paknezhad, N. J. and Najafi, H. 2021. Assessing the effect of emotional unit of emotional ANN (EANN) in estimation of the prediction intervals of suspended sediment load modeling. *Earth science informatics*. 14(1): 201-213.
- Vando, G.A., Nurhening, Y. and Haryanto, H. 2024. Fuzzy logic-based energy optimization in water pumping: towards sustainable development goals, *The most important scientific journals*. 13(1): 431-439. DOI: 10.18421/TEM131-45
- Wahyuni, S., Sisingsih, D., Elhuda, I., Souma, K., Dasyva, I.Z., 2024. Optimization of reservoir release operation using genetic algorithm method. *Results Eng*. 23, 102610.
- Zadeh, L.A. 2011. Note on Z-numbers. *Information Scientific*. 181(14): 2923-2932.
- Zhang, J., Cai, X., Lei, X., Liu, P., Wang, H., 2021. Real-time reservoir flood control operation enhanced by data assimilation. *The Journal of Hydrology*. 598. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126426>
- in ANN-based multi-GCMs downscaling of hydro-climatologic parameters. *Journal of Hydrology*. 579: 124226.
- Nourani, V., Sadikoglu, F., Paknezhad, N. J. and Sharghi, E. 2020a. Prediction intervals for the artificial neural network (ANN) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) via the LUBE method. *World Conference Intelligent System for Industrial Automation*,
- Nourani, V., Sharghi, E. and Paknezhad, N. J. 2020b. Estimation of ANN prediction bounds for the suspended sediment load modeling. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 491: 012001.
- Nourani, V. 2017. An emotional ANN (EANN) approach to modeling rainfall-runoff process. *Journal of Hydrology*. 544: 267-277.
- Razzaghi, P., Babazadeh, H. and Shurian, M. 2013. Development of the rationing policy for the use of the multi-purpose reservoir in the conditions Limitation of water resources using the model MODSIM 8.1. *Journal of Water and Soil Resources Protection*.

Using Z-Numbers in Determine Optimal Operation Parameters of Dam Reservoirs

B. Nikoufar*¹, V. Nourani²

Received: Aug.28, 2024

Accepted: Dec.22, 2024

Abstract

Accurate estimation of water resources potential and their optimal use is a crucial issue in the water industry. Therefore, optimal reservoir operation is considered one of the most important management factors during dam operation periods. In real reservoir operations, decisions on water release are made, considering reservoir volume, demand quantities, and inflow forecasts. Given the uncertainty in dam reservoir operation data, one approach to addressing this uncertainty is through the use of fuzzy logic sets, as traditional fuzzy theories alone cannot fully account for the existing uncertainty in calculations. In this case, Z-numbers, as a new generation of fuzzy logic, have great potential in describing the uncertainty of human knowledge, as they consider both limitation and reliability. This research aims to determine optimal dam operation parameters for multi-step ahead considering data uncertainty and information reliability in optimization through Z-numbers, as a case study on the Alavian Dam. Efforts have been made to compare Z-number results with classical fuzzy logic, and genetic algorithm results. To evaluate these methods, performance indicators such as reliability, vulnerability, and stability were used, and the results showed that 77% of the genetic algorithm, 85% of classic fuzzy logic, and 92% of Z numbers of the needs related to the sustainable agricultural demand of Alavian Dam were met. The rule curve of optimal operating parameters obtained from Z-number modeling based on inflow forecasting through the method of Lower and Upper Bound Estimates (LUBE) showed that the observed release volume for Alavian Dam during the current flow year remained within the predicted range.

Keywords: Z-Numbers, Optimal Operation of Dam Reservoirs, Alaviyan Dam, Uncertainty, Rule Curve, Classical Fuzzy Logic

1- Ph.D student, Civil doctoral student in water resources management, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Professor of Civil Engineering Faculty, Tabriz University, Tabriz, Iran

(*- Corresponding Author Email: baghernik@tabrizu.ac.ir)