

توسعه مدل‌های FIS، ANN و ANFIS برای ارزیابی شاخص کفایت در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی (مطالعه موردی: شبکه آبیاری رودشت)

حبیبه شریفی^۱، عباس روزبهانی^{۲*}، سید مهدی هاشمی شاهدانی^۲

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانشیار، گروه مهندسی آبیاری، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۹/۰۱/۱۳؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۳/۰۹)

چکیده

به منظور مدیریت صحیح آب در بخش کشاورزی، بهبود مدیریت بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی و ارزیابی آنها ضروری است. در تحقیق حاضر برای تحقق هدف یادشده، از مدل‌های سیستم استنتاج فازی (FIS)، شبکه عصبی (ANN) و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، برای توسعه مدل هوشمند ارزیابی کفایت تحویل آب در یک کانال آبیاری، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فرایند بهره‌برداری استفاده شد. به منظور توسعه و بررسی چگونگی عملکرد مدل‌های توسعه داده شده، کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت در استان اصفهان که با مشکل نوسان‌های شدید جریان ورودی روبه‌رو است، به عنوان مطالعه موردی انتخاب شد. از مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیکی HEC-RAS، برای تولید اطلاعات مورد نیاز آموزش و صحت‌سنجی مدل‌های یادشده استفاده شد. نتایج نشان داد براساس شاخص آماری MAPE، ساختارهای منتخب در دو مدل ANN و ANFIS در تخمین شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی نسبت به مدل FIS، به ترتیب به مقدار ۵۷/۰۷، ۵۶/۶۸ درصد بهبود یافته است. بررسی نتایج نشان داد مدل‌های توسعه داده شده هوشمند نسبت به روش‌های مرسوم ارزیابی (مدل‌های هیدرودینامیکی و شاخص‌های ارزیابی) نه تنها زمان بر نبوده بلکه با در نظر گرفتن عدم قطعیت، نتایج دقیقی را ارائه می‌دهند. همچنین، مدل‌های ANN و ANFIS نسبت به FIS عملکرد بهتری داشتند، بنابراین قابلیت استفاده برای سایر سامانه‌های توزیع آب کشاورزی را نیز دارند.

کلیدواژگان: توزیع آب کشاورزی، کفایت تحویل، FIS، ANN و ANFIS.

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آبی کشور، افزایش جمعیت و به تبع آن، نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، استفاده بهینه از آب موجود در بخش کشاورزی به عنوان عمده ترین مصرف کننده آب، اجتناب ناپذیر به نظر می رسد. سامانه های توزیع آب کشاورزی تأثیر زیادی بر استفاده بهینه از آب در بخش کشاورزی دارند اما به رغم تحقیقات گسترده در زمینه بهسازی، عملکرد زیادی ندارند [۱]. نخستین گام برای بهبود عملکرد سامانه های توزیع آب کشاورزی، ارزیابی وضع موجود آنهاست. به این منظور، باید رفتار هیدرولیکی جریان در کانال های آبیاری توسط مدل های هیدرودینامیکی شبیه سازی شده و سپس، شاخص های ارزیابی عملکرد محاسبه شود. با وجود اینکه روش های مرسوم ارزیابی عملکرد سامانه های توزیع آب کشاورزی امکان بررسی گزینه های مختلف بهره برداری و تحقق تصمیم گیری های مناسب در مدیریت بهره برداری سامانه های توزیع آب کشاورزی را فراهم می کنند، اما زمان بر بوده و همچنین همراه با پیچیدگی و عدم قطعیت زیادی هستند. از این رو، وجود این محدودیت ها و ناتوانی بسیاری از مدل های موجود در بررسی ابهامات و عدم قطعیت های پارامترهای گوناگون و واسنجی وقت گیر آنها، رویکرد به تئوری فازی و سایر مدل های هوشمند را به عنوان تکنیک های جدید و ابزاری توانمند در فرایندهای پیچیده مانند پیش بینی، توجیه پذیر می کند [۲].

مزیت اصلی این مدل های هوشمند نسبت به روش های رایج این است که در مدت زمان نسبتاً کوتاهی قادر به بررسی تأثیر انواع پارامترهای در دسترس، بر فرایند بررسی شده هستند [۳] که در ادامه به مزیت و دلیل هر یک از مدل ها پرداخته می شود. سیستم استنتاج فازی، ابزاری توانمند برای حل مسائل مربوط به سیستم های غیر خطی و مسائلی که وابسته به استدلال، تصمیم گیری و استنباط بشری هستند، به شمار می آید [۴]. همچنین، با استفاده از آن می توان عدم قطعیت های موجود را به همراه درک روابط ذاتی میان داده ها مدل سازی کرد [۵]. شبکه های عصبی مصنوعی نیز یکی از روش های متداول جعبه سیاه در پیش بینی و تحلیل سیستم های غیر خطی هستند، همچنین این قابلیت را دارند که به آسانی با اطلاعات موجود تطابق پیدا کنند، از روی یک سری اطلاعات آموزش ببینند و رابطه مناسب بین اطلاعات

برقرار کنند [۴]. یک مدل آماری نیز که به تازگی توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS^۱) است که ترکیبی از قابلیت های دو مدل FIS^۲ و ANN^۳ را دارد. همچنین، مزایای خاص خود را دارد که از آن جمله می توان به توانایی شبیه سازی سامانه های غیر خطی، دقت زیاد و زمان کمتر ساخت مدل و محاسبات آن اشاره کرد [۶]. با توجه به موارد یاد شده و قابلیت های بیان شده سه مدل سیستم استنتاج فازی، شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در تحقیق حاضر به توسعه مدل های یاد شده برای ارزیابی شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی در شبکه آبیاری رودشت، پرداخته شد. پژوهش های زیادی نیز در مورد کاربرد مدل های یاد شده در زمینه مهندسی علوم صورت گرفته است که می توان به مواردی همچون مدل سازی خشکسالی، مدیریت بحران، برآورد رسوب، پیش بینی هوا، سیلاب و جریان رودخانه اشاره کرد [۴]. در ادامه، به برخی از این مطالعات اشاره می شود:

حسینی و همکاران، برای مدل سازی عوامل مؤثر بر فرسایش شیلی، از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تابع عضویت گوسی با روش دی فازی کوچک ترین ماکزیمم به عنوان مدل بهینه در پیش بینی فرسایش شیلی در منطقه احمدآباد مشهد است [۲]. Ghordoyee Milan و همکاران برای استفاده پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی از مدل بهینه سازی خطی فازی و سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند و توانستند عدم قطعیت موجود در میزان تبخیر و برداشت از آب های زیرزمینی و همچنین میزان رواناب را در نظر بگیرند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این مدل ها قادر به پیش بینی مقدار بهینه برداشت آب های زیرزمینی هستند و می توانند جایگزین روش های بهینه سازی عددی شوند [۷]. Tiri و همکاران طی تحقیقی برای بررسی کیفیت آب از لحاظ شرب با هدف ارائه شاخص کیفیت آب (WQI) از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند و از مقادیر پارامترهای هیدروشمیایی آب های سطحی بهره بردند تا بتوانند مدلی را برای ارزیابی کیفیت آب سطحی تهیه کنند [۸].

1. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
2. Fuzzy Inference System
3. Artificial Neural Networks

استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل ترکیبی ANFIS_FA نسبت به مدل ANFIS دارای عملکرد بهتری بود و دقت پیش‌بینی به طرز چشمگیری افزایش داشت. استراتژی مدل‌سازی ترکیبی می‌تواند یک سیستم هوشمند متخصص خبره را برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع در کویر غربی آفریقا به ارمغان آورد [۱۳]. VanHieu Nguyen و همکاران در پژوهشی به پیش‌بینی خشکسالی و مقدار کمی از شاخص‌های خشکسالی در استان khanhho ویتنام با سه ایستگاه هواشناسی، با استفاده از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد مدل‌های پیش‌بینی ANFIS با وقایع SSTA^۲ به‌عنوان متغیرهای ورودی می‌توانند مدت زمان طولانی‌تر از SPI^۳ بارش را به‌عنوان متغیرهای ورودی پیش‌بینی کنند. مدل پیش‌بینی ANFIS با وقایع SSTA به‌عنوان متغیرهای ورودی با موفقیت قابل استفاده است و دقت و قابلیت اطمینان زیاد را برای پیش‌بینی خشکسالی فراهم می‌کند [۱۴]. Zaher Mundher Yaseen و همکاران برای پیش‌بینی الگوی بارش در حوضه رودخانه پاهانگ واقع در شبه‌جزیره مالزی، از مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی با الگوریتم بهینه‌سازی کرم شب‌تاب، استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها دقت زیاد مدل ANFIS-FFA نسبت به مدل ANFIS را نشان داد. همچنین، مدل یادشده نوعی روش مدل‌سازی دقیق است که می‌تواند برای شبیه‌سازی باران در منطقه مطالعه‌شده اتخاذ شود [۱۵].

Wen و همکارانش اکسیژن محلول رودخانه Heihe چین را با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی (ANN) پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنها بیانگر دقت و توانایی زیاد مدل پیشنهادی برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی پارامتر اکسیژن محلول بود [۱۶]. shadmani و همکاران در پژوهشی به مدل‌سازی منطقه‌ای دبی سیلابی در استان همدان با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. در این پژوهش با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در منطقه مطالعه‌شده بهترین ساختار شبکه عصبی مصنوعی پیش‌خور با دو لایه پنهان بود [۱۷]. Malekzadeh and Fereydooni MLP برای پیش‌بینی جریان آب رودخانه فیروزآباد و سد تنگاباد (شیراز) پرداختند. سپس، با تعیین معماری مناسب شبکه و تقسیم‌بندی داده‌ها به دو دسته تست و

Ahmed & Shah از سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) برای برآورد تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی (BOD) رودخانه سورما از بنگلادش، استفاده کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد ANFIS قادر است میزان اکسیژن بیوشیمیایی را با دقت معقول پیش‌بینی کند و می‌تواند برای ایجاد مدل پیش‌بینی کیفیت آب رودخانه استفاده شود [۹]. حیاتی و همکاران به‌منظور پیش‌بینی ضریب دبی سرریزهای مثلی در پلان از مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و الگوریتم تکامل تفاضلی استفاده کردند. سپس، با استفاده از پارامترهای مؤثر بر ضریب دبی، شش مدل ترکیبی را معرفی کردند. در نهایت، براساس تجزیه و تحلیل نتایج مدل‌سازی، عدد فرود جریان، مؤثرترین پارامتر در مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای مثلی در پلان را با استفاده از الگوریتم ترکیبی نرو-فازی و الگوریتم تکامل تفاضلی شناسایی کردند [۱۰]. گیساوندانی و همکاران قابلیت مدل‌های سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیونی در تحلیل منطقه‌ای سیلاب در حوضه آبریز کرخه را ارزیابی کردند. آنها با مقایسه مدل ANFIS، ANN و مدل رگرسیونی نشان دادند که مدل ANFIS در مقایسه ANN منتخب و مدل رگرسیونی به‌خصوص در دوره بازگشت‌های زیاد دقت بیشتری دارد. ولی در مجموع از نظر دقت پیش‌بینی ANFIS در تمام دوره بازگشت‌ها، دبی سیلاب مطابقت بسیار زیادی با دبی سیلاب واقعی دارد و می‌توان آن را به‌عنوان بهترین ابزار برای پیش‌بینی دبی سیلاب در دوره بازگشت‌های مختلف معرفی کرد [۱۱]. Zaher Mundher Yaseen و همکاران به‌منظور پیش‌بینی جریان ماهانه رودخانه Pahang در مالزی از ترکیب مدل ANFIS با الگوریتم کرم شب‌تاب به‌عنوان ابزار بهینه‌ساز، استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد بهینه‌ساز FFA^۱ می‌تواند از دقت و صحت مدل سنتی ANFIS به طور کلی پیشی بگیرد و قادر به حذف داده‌های پیش‌بینی غلط (نادرست) در مدل ANFIS برای جریان‌های بسیار کم است. نتایج حاضر پیامدهای گسترده‌تری نه تنها برای اهداف پیش‌بینی جریان دارد، بلکه برای سایر متغیرهای پیش‌بینی هیدرو هواشناسی نیز کاربرد دارد [۱۲]. Hai Tao و همکاران با هدف پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع منطقه‌ای در بورکینافاسو از ترکیب مدل ANFIS با الگوریتم کرم شب‌تاب

2. Firfly Optimization Algorithm
3. Standardized Precipitation Index

1. Sea Surface Temperature Anomalies

مواد روش‌ها

روش تحقیق

- روند کلی و مراحل انجام تحقیق حاضر به صورت زیر است:

 ۱. توسعه مدل شبیه سازی هیدرودینامیکی توزیع آب کشاورزی، به عنوان داده های ورودی و مشاهداتی؛
 ۲. دسته بندی میزان آبدی شبکه و اطلاعات بهره برداری به شکل فازی؛
 ۳. تدوین مدل های سیستم استنتاج فازی، شبکه عصبی و سیستم تطبیقی عصبی_فازی؛
 ۴. استفاده از داده های دبی تحویلی به عنوان ورودی مدل ها و برآورد شاخص کفایت تحویل کشاورزی به عنوان خروجی؛
 ۵. واسنجی و صحت سنجی مدل های یاد شده با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل k-fold؛
 ۶. ارزیابی نتایج به دست آمده با معیارهای آماری.

منطقه مطالعاتی

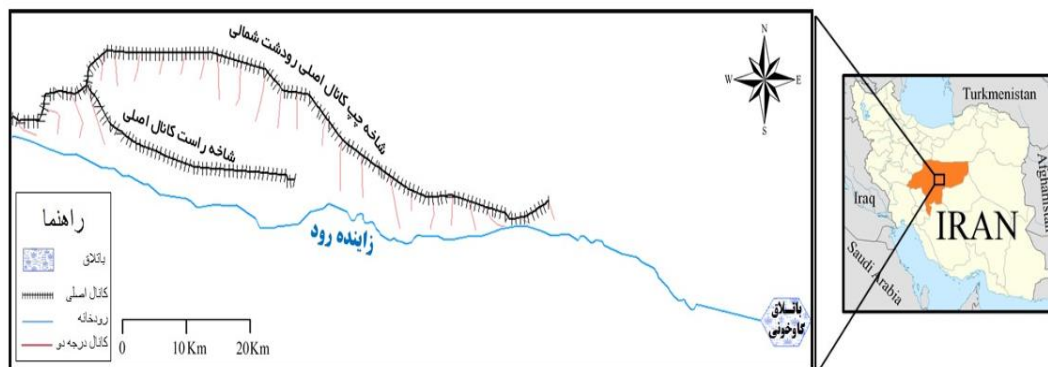
شبکه آبیاری رودشت در جنوب شرقی اصفهان با مساحت حدود ۴۵ هزار هکتار است. در این شبکه حدود ۳۰۰ دریاچه آبیگر نصب شده است که این دریاچه ها بر اساس مقدار معینی از دبی ورودی به شبکه باز می شوند. از این تعداد، ۲۶ آبیگر روی کانال اصلی واقع اند که آب را به کانال های فرعی درجه ۲ تحویل می دهند. در تحقیق حاضر، کانال اصلی چپ شبکه آبیاری رودشت به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است (شکل ۱). این قسمت از کانال دارای شیب ملایم و شامل ۱۴ سازه آب بند (سازه تنظیم کننده سطح آب) است که بر این اساس، کانال مطالعه شده به ۱۳ دریاچه باز تقسیم می شود. همچنین، رودشت آخرین دشتی است که از زاینده رود آبیگری می کند. بنابراین، همه نوسان های رودخانه در مسیر ۳۵۰ کیلومتری به صورت نوسان های مداوم دبی ورودی به شبکه و در نتیجه، اختلال در کارکرد شبکه بروز می کند. از این رو، یکی از کانال های پر مشکل آبیاری کشور از لحاظ مدیریت تأمین و توزیع آب کشاورزی است و به همین دلیل انتخاب شده است تا عملکرد مدل های توسعه داده شده به گونه مناسبی بررسی شود.

آموزش، از آماره های میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی برای بررسی دقت مدل استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد مدل شبکه عصبی، توانایی زیادی در پیش بینی داده های دبی بر اساس ورودی های منتخب دارد [۱۸]. Cheng و همکاران پیش بینی جریان روزانه ورودی به مخزن سد هونگ جیادو در چین را با داده های دوره آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ و بر اساس قاعده بهینه سازی ازدحام ذرات تحت ANN انجام دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد روش پیشنهاد شده صحت و دقت بیشتری نسبت به شبکه عصبی دارد و روش ارائه شده، می تواند نوعی تکنیک جایگزین برای مرحله آموزش در شبکه عصبی برای انتخاب پارامترهای مؤثر باشد [۱۹]. Youngmin Seo و همکاران با هدف پیش بینی روزانه سطح آب از دو مدل ترکیبی شبکه عصبی مبتنی بر موجک^۱ (WANN) و سیستم استنتاج عصبی_فازی سازگار با موجک^۲ (WANFIS) استفاده کردند. نتایج به دست آمده از مطالعه یاد شده نشان می دهد که ترکیب تجزیه موجک و مدل های هوش مصنوعی می تواند ابزاری مفید برای پیش بینی دقیق سطح آب روزانه باشد و می تواند بازده بهتری نسبت به مدل های پیش بینی معمولی داشته باشد [۲۰].

جمع بندی مطالعات پیشین نشان می دهد تا کنون مطالعه ای که با هدف جایگزینی مدل های شبیه سازی و ارزیابی توزیع آب کشاورزی به استفاده از مدل های هوش مصنوعی پردازد، صورت نگرفته است. بنابراین، با توجه به اینکه در سامانه های توزیع آب کشاورزی در مورد پارامترهایی مانند دبی ورودی به سراب، دبی تحویلی به آبیگرها، دبی مورد نیاز (حقابه) و تلفاتی که در مسیر انتقال کانال اصلی رخ می دهد، عدم قطعیت وجود دارد و همچنین، با استناد به قابلیت های سه مدل یاد شده، چنین استنباط می شود که ارزیابی مؤثر سامانه های توزیع آب کشاورزی زمانی انجام می شود که موارد یاد شده تأمین شود. از این رو، تحقیق حاضر برای نخستین بار به توسعه مدل های سیستم استنتاج فازی، شبکه عصبی و سیستم استنتاج فازی_عصبی تطبیقی، برای ارائه یک مدل جایگزین ارزیابی عملکرد توزیع آب کشاورزی پرداخته است.

1. Wavelet-based Artificial Neural Network

2. Wavelet-based Adaptive Neuro-fuzzy Inference System



شکل ۱. شماتیک کانال اصلی شاخه چپ شبکه آبیاری رودشت

درصد و $+40$ تا $+46$ ، -40 تا -90 درصد متغیر است. به ازای هر سناریو، محدوده دبی ورودی به کانال تعیین شد و به ازای هر یک از این دبی‌ها، مدل هیدرودینامیکی کالیبره شده اجرا شد و دبی‌های تحویلی به هر ۲۶ آبگیر به دست آمدند. با مشخص شدن دبی تحویلی به آبگیرها، شاخص کفایت تحویل کشاورزی محاسبه شد. در جدول ۱، محدوده تغییرات شاخص کفایت تحویل کشاورزی به تفکیک سناریوهای مختلف آورده شده است. با توجه به جدول ۱ ملاحظه می‌شود که وضعیت تحویل و توزیع آب با روش بهره‌برداری موجود در کانال چپ شاخه شمالی شبکه آبیاری رودشت، از نظر شاخص کفایت تحویل کشاورزی مناسب نیست.

در این مرحله با در دست داشتن داده‌های به دست آمده از فرایندهای ارزیابی و شبیه‌سازی، به توسعه مدل‌های هوشمند سیستم استنتاج فازی، شبکه عصبی و سیستم تطبیقی عصبی-فازی به منظور ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی پرداخته شد. در این خصوص از متوسط داده‌های دبی تحویلی به آبگیرها و شاخص کفایت تحویل کشاورزی به عنوان داده‌های ورودی و آموزش مدل‌های یادشده استفاده شد.

جدول ۱. محدوده تغییرات شاخص کفایت تحویل کشاورزی

سناریوی محدوده دبی سراب (M^3/S) کفایت تحویل کشاورزی (%)
نوسانی ملایم کاهشی ۴۱/۴۹-۳۱/۶-۶۴/۸-۵۱/۶
نوسانی متوسط کاهشی ۳۱/۵۹-۲۱/۵-۵۱/۸-۳۸/۸
نوسانی شدید کاهشی ۲۱/۶۹-۱۴/۴-۳۸/۷-۲۵/۰
نوسانی ملایم افزایشی ۴۱/۵۱-۳۱/۴-۶۴/۸-۷۳/۲
نوسانی متوسط افزایشی ۳۱/۶۳-۱۴/۵-۵۱/۸-۷۳/۳
نوسانی شدید افزایشی ۳۱/۶۶-۳۱/۶-۸۲/۶-۸۰/۶

شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS

مدل‌های هیدرودینامیکی امکان شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان در کانال‌های آبیاری و نیز بررسی گزینه‌های مختلف مدیریت بهره‌برداری را فراهم آورده‌اند. با استفاده از داده‌های خروجی این مدل‌ها می‌توان اقدام به ارزیابی فرایند تحویل و توزیع آب کرد. این مدل‌ها شامل حل عددی معادلات اساسی حاکم بر جریان هستند. در این میان، می‌توان به مدل‌های HEC-RAS، Mikell، ICSS، CanalCad، Sobek و CANALMAN اشاره کرد. نرم‌افزار HEC-RAS برای انجام محاسبات هیدرولیکی در حالت یک‌بعدی، دوبعدی و یا ترکیب این دو، در شبکه کانال‌های طبیعی و مصنوعی طراحی شده است. این مدل شامل بخش‌هایی برای تحلیل هیدرولیکی جریان است که عبارت‌اند از: محاسبات مربوط به پروفیل سطح آب برای حالت ماندگار، شبیه‌سازی جریان ماندگار در حالت یک‌بعدی و دوبعدی، محاسبات مربوط به انتقال رسوب در مرز متحرک و تحلیل کیفی آب.

در تحقیق پیش رو نیز برای شبیه‌سازی جریان در کانال اصلی آبیاری از مدل هیدرودینامیکی HEC-RAS کالیبره شده توسط کاغذچی و همکاران (۱۳۹۸) استفاده شده است [۲]. در این خصوص سناریوهای مختلف بهره‌برداری از کانال با توجه با شرایط مختلف دبی ورودی در محل سراب کانال اصلی، برای بررسی بهره‌برداری موجود در نظر گرفته شد و از سناریوهای «نوسانی ملایم» و «نوسانی متوسط» و «نوسانی شدید» استفاده شد، که به ترتیب در هر یک از سناریوها دبی ورودی به کانال نسبت به دبی نرمال بین 0 تا $20 \pm$ درصد، $20 \pm$ تا $40 \pm$

شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی

در تحقیق حاضر، به منظور ارزیابی شبکه آبیاری رودشت، از شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی معرفی شده توسط مولدن و گیتس طبق رابطه ۱ استفاده شده است [۲۲]:

کفایت تحویل (PA^1): شاخصی است که میزان توانایی روش بهره‌برداری را در تحویل آب به میزان درخواست شده در هر آبگیر بیان می‌کند.

$$P_A = \frac{1}{T} \sum_T \left[\frac{1}{R} \sum_R (P_a) \right] \quad (1)$$

$$P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \rightarrow \text{if } Q_d < Q_r \rightarrow \text{Otherwise} \rightarrow P_a = 1$$

که در آن، Q_r و Q_d به ترتیب معرف مقدار آب مورد نیاز (حقابه) و مقدار آب تحویل شده در عمل برای انشعاب R در دوره زمانی T و نمادهای $\frac{1}{R} \sum$ و $\frac{1}{T} \sum$ به ترتیب متوسط زمانی و مکانی هستند. براساس استاندارد ارائه شده ارزیابی مطلوبیت بهره‌برداری شاخص کفایت تحویل آب با استفاده از مفاهیم کیفی خوب، متوسط و ضعیف انجام می‌گیرد. به طوری که اگر شاخص کفایت تحویل آب عددی بین ۱ تا ۰/۹ باشد، مطلوبیت بهره‌برداری خوب است و اگر این شاخص بین ۰/۸ تا ۰/۸۹ باشد، مطلوبیت بهره‌برداری متوسط خواهد بود و اگر شاخص کمتر از ۰/۸ باشد، مطلوبیت بهره‌برداری ضعیف است [۲۱].

سیستم استنتاج فازی (FIS)

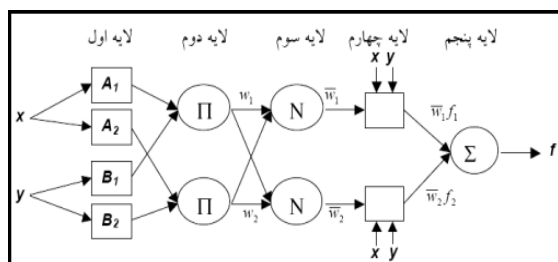
سیستم استنتاج فازی معروف به سیستم‌های قاعده بنیاد فازی، نوعی تکنولوژی است که پایه‌گذار آن لطفی زاده (۱۹۶۵) بوده و شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و به نسبت پیچیده است را با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به بیانی، دانش فرد خبره و با هدف ساده‌سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم جایگزین می‌کند [۲۳]. رایج‌ترین شکل ارائه عبارت‌های زبانی برای بیان دانش و معلومات بشری، استفاده از عبارت‌های شرطی به صورت قوانین «اگر-آن‌گاه» است. با استفاده از شیوه یادشده، می‌توان از یک واقعیت که معلوم است، واقعیت دیگری را استنتاج کرد. هر قانون فازی شامل دو بخش مقدم (ورودی‌های مدل) و تالی (خروجی‌های مدل) می‌شود [۲].

به منظور ساخت مدل فازی در پژوهش حاضر، دامنه تغییرات پارامترهای ورودی (دبی تحویلی به آبگیرها) و خروجی شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی (با توجه به اطلاعات موجود) مشخص شد و با استفاده از فازی‌سازها (توابع عضویت) فازی شد. با توجه به کاربرد گسترده توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی و نتایج به دست آمده از بررسی‌ها، در پژوهش پیش رو نیز برای فازی‌سازی پارامترها از هر دو تابع یادشده استفاده شد. از آنجا که تعریف قوانین فازی متناسب با ورودی و خروجی مدل استنتاج فازی یکی از مراحل مهم ساخت مدل فازی است، بنابراین با توجه به توابع عضویت پارامترها و درجه هم‌پوشانی آنها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دوره آموزش، قوانین تعریف شد. به منظور تکمیل مراحل مدل‌سازی، در این پژوهش برای استنتاج فازی از روش ممدانی (Mamdani) و استلزام^۲ از روش حداقل (Min) و برای تجميع قوانین فازی (Aggregation)، از روش حداکثر (Max) استفاده شد. در مدل‌سازی فازی، استنتاج نهایی به یک نتیجه فازی منجر می‌شود، که برای دستیابی به عدد حقیقی می‌توان از روش‌های دی‌فازی‌سازی استفاده کرد. در پژوهش حاضر با توجه به جامعیت روش مرکز ثقل، از این روش استفاده شد.

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

تئوری مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی برای نخستین بار توسط مک کولاج و والتر پیتز در سال ۱۹۴۳ مطرح شد [۲۴] و بعد از آن روزنبلات در سال ۱۹۶۲ ایده پرسپترون را پیشنهاد داد [۲۵]. امروزه شبکه عصبی مصنوعی در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب کاربرد وسیعی دارد. شبکه عصبی مصنوعی یک مدل جعبه سیاه است که توانایی شناسایی رابطه از الگوهای معین را دارد و این امکان را برای حل روابط غیرخطی فراهم می‌آورد [۲۶] و یکی از روش‌های محاسباتی است که به کمک فرایند یادگیری و با استفاده از پردازشگرهایی به نام نرون تلاش می‌کند با شناخت روابط ذاتی بین داده‌ها، نگاشتی میان فضای ورودی (لایه ورودی) و فضای مطلوب (لایه خروجی) ارائه دهد [۱۱]. معماری معمولی ANN دارای لایه ورودی، پنهان و خروجی است. لایه یا لایه‌های پنهان، اطلاعات دریافت شده

ANFIS یک شبکه پیشخور چندلایه است که از الگوریتم‌های یادگیری شبکه عصبی و منطق فازی به منظور ترسیم یک فضای ورودی به یک فضای خروجی استفاده می‌کند. ساختار ANFIS شامل پنج لایه گره‌های ورودی، گره‌های قاعده، گره‌های متوسط، گره‌های نتیجه و گره‌های خروجی است (شکل ۲). این شبکه می‌تواند براساس یادگیری با نظارت الگوریتم آموزش پیوندی که توسط جانگ ارائه شده، آموزش داده شود [۳۰].



شکل ۲. ساختار ANFIS

لایه اول: (گره‌های ورودی) در این لایه درجه عضویت گره‌های ورودی به بازه‌های مختلف فازی با استفاده از تابع عضویت، مشخص می‌شود:

$$O_{1,i} = \mu A_i(x) \text{ for } i = 1:2 \quad (2)$$

$$O_{1,i} = \mu B_i(y) \text{ for } i = 3:4$$

لایه دوم: (گره‌های قاعده) هر گره در این لایه درجه فعالیت یک قانون را محاسبه می‌کند:

$$O_{2,i} = w_i = \mu A_i(x) \mu B_i(y) \text{ for } i = 1:2 \quad (3)$$

لایه سوم: (گره‌های متوسط) خروجی این لایه نرمالیزه شده لایه قبلی است:

$$O_{3,i} = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ for } i = 1:2 \quad (4)$$

لایه چهارم: (گره‌های نتیجه) در این لایه خروجی هر گره برابر است با:

$$O_{4,i} = \bar{w} f_i = \bar{w} (p_i x + q_i y + r_i) \quad (5)$$

لایه پنجم: (گره‌های خروجی) در این لایه هر گره مقدار خروجی نهایی را به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌کند (تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی هاست):

$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w} f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (6)$$

از لایه ورودی را پردازش می‌کند و مسئول برقراری ارتباط مناسب بین ورودی‌ها و خروجی‌هاست [۲۷]. هر لایه از چند نرون یا گره تشکیل شده که سیگنال‌ها با عبور از نرون‌ها به وسیله وزن‌ها و توابع انتقال بهینه اصلاح می‌شوند [۲۸]. تابع انتقال بیان‌کننده پاسخ هر نرون به سیگنال ورودی آن نرون است که معمول‌ترین توابع انتقال استفاده‌شده در شبکه‌های عصبی مصنوعی تابع سیگموئید و تانژانت هیپربولیک هستند [۲۹].

در پژوهش حاضر، به منظور ساخت مدل شبکه عصبی، ساختار پرسپترون چندلایه MLP انتخاب شد که یک شبکه پیشخور است. شبکه‌های پیشخور یک یا چند لایه، یک یا چند لایه میانی پنهان دارند که نرون‌های هر لایه فقط به همان نرون‌ها در لایه‌های بعدی ارتباط دارند و سیگنال‌های عبوری از قسمت ورودی به خروجی منتقل می‌شوند. با استفاده از نرم‌افزار Matlab تعداد ۶ شبکه عصبی پرسپترون ۳ لایه بر اساس الگوریتم شبکه FFBP^۱ و الگوریتم یادگیری لونیبرگ-مارکوارت، با تعداد و نرون‌های مختلف لایه پنهان و همچنین توابع انتقال متفاوت ایجاد شد و با استفاده از روش k-fold، ۵ مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفت، سپس بهترین حالت براساس معیارهای مختلف آماری انتخاب شد. مشخصات ۶ شبکه عصبی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲. مشخصات شبکه‌های عصبی ساخته‌شده

شبکه توابع انتقال ساختار تعداد نرون
۱ ۱-۱-۱ logsig-purelin
۲ ۱-۱-۱ Tansig-purelin
۳ ۱-۲-۱ logsig-Tansig
۴ ۱-۲-۱ logsig-logsig
۵ ۱-۲-۱ purelin-Tansig
۶ ۱-۲-۱ purelin-purelin

سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) نوعی روش داده‌کاوی است که نخستین بار توسط جانگ در سال ۱۹۹۳ ارائه شده است. این روش توانایی پیش‌بینی توابع واقعی پیچیده با درجه قابل قبولی را دارد [۱۰].

1. Feed-Forward Backprop

بنابراین، در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از روش k -fold، داده‌های آموزش به صورت تصادفی به ۵ زیرمجموعه مجزا تقسیم شدند. به این صورت که یکی از زیرمجموعه‌ها برای ارزیابی مدل و ۴ زیرمجموعه دیگر، برای آموزش مدل در نظر گرفته شده و با استفاده از ۴ زیرمجموعه آموزش مدل‌ها صورت گرفت و از یک زیرمجموعه باقی‌مانده برای پیش‌بینی رفتار مدل‌ها و ارزیابی آنها استفاده شد. این فرایند برای هریک از مدل‌ها ۵ مرتبه تکرار شد و میانگین نتیجه این ۵ مرتبه محاسبه شد.

معیارهای ارزیابی دقت و خطای مدل‌سازی

عملکرد هر یک مدل‌های ارائه‌شده با استفاده از شاخص‌های آماری میانگین خطای مطلق (MAE)، درصد میانگین خطای مطلق (MAPE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، نش-ساتکلیف (NASH) و R مطابق روابط ۷ تا ۱۱ ارزیابی می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n |O_i - P_i| \quad (7)$$

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (8)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (9)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (10)$$

$$R = \frac{\sum (O - \bar{O})(P - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O - \bar{O})^2 \sum (P - \bar{P})^2}} \quad (11)$$

در این روابط، O و $\bar{O}$ مقادیر مشاهداتی و میانگین آنها و P و $\bar{P}$ مقادیر پیش‌بینی‌شده و میانگین آنها توسط مدل‌هاست. معیار $NASH$ و R میزان رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهند، $NASH$ در بازه $-\infty$ تا $+\infty$ ، R در بازه 0 تا 1 تغییر می‌کنند. نزدیکی این معیارها به یک، نشان‌دهنده رابطه قوی بین دو متغیر است. روابط ۷ تا ۹ نیز مقادیری مثبت هستند و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، میزان خطای دو متغیر نسبت به هم کمتر و دو متغیر به هم نزدیک‌ترند.

بحث و نتایج

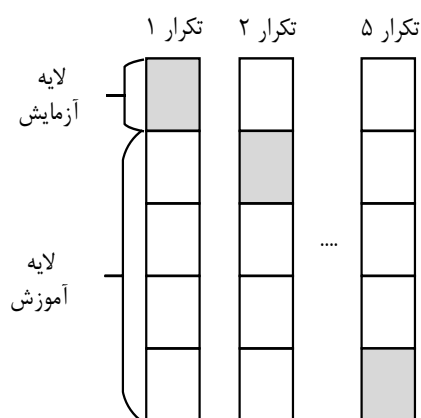
نتایج مدل سیستم استنتاج فازی (FIS)

پس از ساخت مدل‌های فازی پیش‌بینی شاخص کفایت

در این تحقیق، به منظور ساخت مدل ANFIS در محیط متلب از کدنویسی استفاده شد. برای بررسی تأثیر نوع تابع عضویت بر دقت پیش‌بینی مدل از توابع مثلثی و گوسین، با تعداد ۳ و ۵ تابع عضویت استفاده شد. پس از اجرای متعدد مدل ANFIS، بهترین حالت براساس معیارهای مختلف آماری انتخاب شد.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

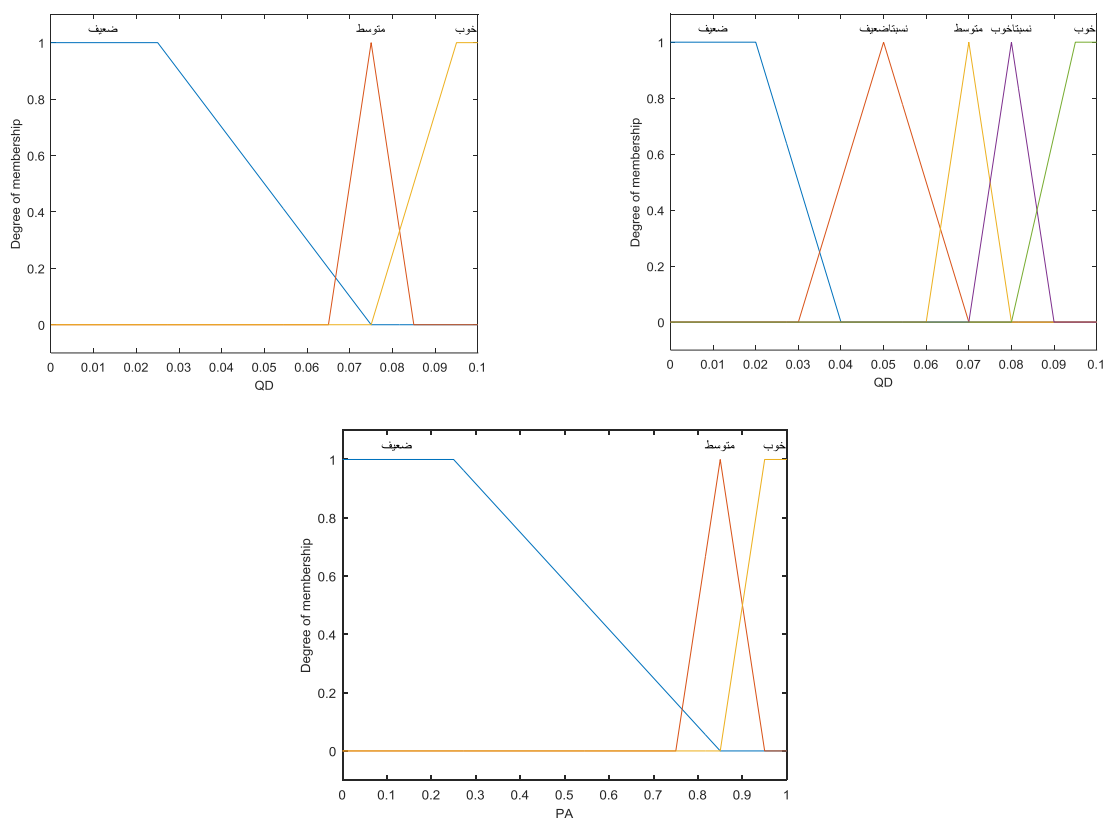
اعتبارسنجی متقابل، روشی آماری برای ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های یادگیری است که داده‌ها را به دو بخش متمایز تقسیم می‌کند: یک بخش برای یادگیری یا آموزش مدل و دیگری برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود [۳۱]. در پژوهش حاضر از روش اعتبارسنجی متقابل k -fold استفاده شد. در این روش، داده‌ها به صورت تصادفی به k زیرمجموعه مجزا تقسیم شده و k بار آموزش و ارزیابی انجام می‌شود، به این صورت که هر بار یکی از زیرمجموعه‌ها برای ارزیابی مدل نگه داشته شده و $k-1$ زیرمجموعه دیگر، برای آموزش مدل استفاده می‌شود. این فرایند k بار تکرار می‌شود، به طوری که هریک از زیرمجموعه‌ها یک بار برای ارزیابی مدل به کار می‌روند. در نهایت، نتیجه این k تکرار برای دستیابی به یک برآورد نهایی، میانگین‌گیری می‌شود. به این صورت، همه داده‌ها در هر دو گروه مورد آموزش و ارزیابی قرار می‌گیرند و از این منظر، روش ارزیابی دقیقی محسوب می‌شود. طرح کلی روش اعتبارسنجی چند لایه در شکل ۳ قابل مشاهده است.



شکل ۳. طرح کلی روش اعتبارسنجی چندلایه

درجه هم‌پوشانی آنها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دوره آموزش، تعریف شد. سپس، مدل‌ها با استفاده از روش k -fold، ۵ مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفتند. همچنین، آماره‌های ارزیابی خطا (روابط ۷ تا ۱۱) برای هر یک از مدل‌ها محاسبه شد. جدول ۳ نتایج هر یک از مدل‌ها با معیارهای ارزیابی یادشده نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول ۳ قابل مشاهده است، با وجود اینکه نتایج به‌دست‌آمده برای هر دو حالت از نظر مقادیر آماره‌های ارزیابی R ، $NASH$ ، $NRSME$ ، MAE قابل قبول است، ولی مقدار خطای $MAPE$ رضایت‌بخش نیست. این نتایج نشان می‌دهد مدل فازی نتوانسته است به‌خوبی شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی را پیش‌بینی کند.

تحويل آب کشاورزی و اجرای آن، تعداد و نوع بهینه توابع عضویت و قوانین به‌صورت سعی و خطا مشخص شد. دبی تحويلی به آبیگرها به‌عنوان ورودی یک بار با تعداد ۳ تابع عضویت (ضعیف، متوسط و خوب) و بار دیگر با تعداد ۵ تابع عضویت (ضعیف، نسبتاً ضعیف، متوسط، نسبتاً خوب و خوب) وارد مدل‌ها شد. در نهایت، شاخص کفایت تحويل آب کشاورزی نیز به‌عنوان خروجی مطابق استاندارد مولدن گیتس به‌صورت ۳ تابع عضویت (ضعیف، متوسط و خوب) در نظر گرفته شد. از ترکیب توابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای با هم‌پوشانی ۱۰ درصد برای در نظر گرفتن عدم قطعیت برای متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شد (شکل ۴). قوانین با توجه به توابع عضویت پارامترها و



شکل ۴. توابع عضویت فازی ورودی و خروجی

جدول ۳. نتایج مدل FIS پیش‌بینی شاخص کفایت تحويل و توزیع شبکه آبیاری رودشت

R NASH NRMSE MAPE% MAE										نوع و تعداد
Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test	توابع عضویت
۰/۱۱	۰/۱۱	۵۷/۱۷	۵۷/۱۴	۰/۲۶	۰/۲۶	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۸۳	۰/۸۳	مثلی، دوزنقه-۳
۰/۱۲	۰/۱۲	۶۰/۳۹	۶۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۸۲	۰/۸۱	مثلی، دوزنقه-۵

نتایج مدل شبکه عصبی (ANN)

پس از آموزش شبکه عصبی چندلایه پرسپترون با استفاده از الگوریتم لونیگ - مارکوت، بهترین توابع انتقال با کمترین میانگین خطا برای توابع انتقال Purelin و Tansig به دست آمد. به منظور بررسی تأثیر تعداد لایه پنهان و تعداد نرون‌های موجود در این لایه و همچنین تأثیر توابع انتقال در ارزیابی شاخص کفایت تحویل کشاورزی، با استفاده از نرم‌افزار متلب برای شبکه‌های ساخته شده حالت‌های مختلف موارد یاد شده صورت گرفت. در نهایت، شبکه‌های ساخته شده با استفاده از روش k-fold، ۵ مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفتند. نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ها، برای یافتن شبکه عصبی بهینه در جدول ۴ همراه معیارهای ارزیابی آماری ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، از میان شبکه‌های آموزش دیده شده، شبکه ۲ با ۵ نرون در لایه پنهان و مقادیر آماره‌های ارزیابی $R=0.99$ ، $NASH=0.99$ ، $NRMSE=0.001$ و $MAPE=0.10\%$ و $MAE=0.0002$ شبکه‌ای با بهترین عملکرد بوده است. به دست آوردن تعداد نرون‌های بهینه اهمیت دارد، زیرا تعداد کم سبب عدم انطباق^۱ و تعداد زیاد نرون‌ها، سبب بیش‌برازش^۲ می‌شود و منحنی برازشی بین این نقاط به شدت نوسان می‌کند. بررسی کلی نشان داد با افزایش تعداد نرون در لایه پنهان دقت شبکه عصبی افزایش می‌یابد، همچنین در

مواقع استفاده از توابع انتقال Tansig و purelin به ترتیب در لایه پنهان و خروجی نسبت به دیگر توابع انتقال، جواب بهتری حاصل می‌شود.

نتایج مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)

بعد از تهیه مدل‌های سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در محیط نرم‌افزار متلب با استفاده از کدنویسی، تعداد و نوع توابع عضویت بهینه با استفاده از سعی و خطا تعیین شد. مدل‌هایی با توابع عضویت مثلثی و گوسی با تعداد ۳ و ۵ تابع عضویت برای بررسی تأثیر بر نتایج ارزیابی شاخص کفایت تحویل کشاورزی تدوین شد. مدل‌های ساخته شده با استفاده از روش k-fold، ۵ مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفت. در نهایت، بهترین ساختار توسط آماره‌های ارزیابی خطا انتخاب شد. نتایج به دست آمده از این مجموعه بررسی‌ها در جدول ۵ ارائه شده است. همچنان که از جدول ۵ استنباط می‌شود، در مدل‌هایی که از تابع عضویت گوسی استفاده شده است نسبت به توابع مثلثی، مقادیر خطاها کمتر است. همچنین، مدل ANFIS با تابع عضویت گوسی که ۵ تابع عضویت دارد، با مقادیر آماره‌های ارزیابی $R=0.99$ ، $NASH=0.99$ ، $NRMSE=0.002$ و $MAPE=0.48\%$ و $MAE=0.001$ در مقایسه با دیگر مدل‌های ANFIS بهترین جواب را ارائه کرده است.

جدول ۴. نتایج مدل ANN برای پیش‌بینی شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی شبکه آبیاری رودشت

شبکه R NASH NRMSE MAPE % MAE											
Train Test Train Test Train Test Train Test Train Test											
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۲	
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۱/۱۵	۱/۱۸	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۳	
۰/۰۶۹	۰/۰۶۹	۵۳/۸۶	۷۳/۱۸	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۴	
۰/۰۱۳	۰/۰۱۳	۸/۷۵	۸/۷۴	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۵	
۰/۰۱۵	۰/۰۱۵	۵/۵۳	۵/۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۶	

جدول ۵. نتایج مدل ANFIS برای پیش‌بینی شاخص کفایت تحویل و توزیع شبکه آبیاری رودشت

R NASH NRMSE MAPE % MAE											
Train Test Train Test Train Test Train Test Train Test											
											نوع و تعداد توابع عضویت
۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۲/۰۳	۱/۹۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۳	مثلثی
۰/۰۰۱	۰/۰۰۲	۰/۹۷	۰/۹۰	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۵	مثلثی
۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۱/۸۹	۱/۸۷	۰/۰۰۷	۰/۰۰۷	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۳	گوسی
۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۴۸	۰/۴۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۵	گوسی

1. Underfitting
2. Overfitting

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، رویکرد جدیدی برای ارزیابی عملکرد توزیع آب کشاورزی (از نظر کفایت تحویل آب) معرفی شد. در این خصوص از مدل‌های هوشمند سیستم استنتاج فازی، شبکه‌های عصبی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی استفاده شد. به منظور توسعه و بررسی چگونگی عملکرد مدل‌های توسعه داده شده، کانال اصلی شبکه آبیاری رودشت که با مشکل نوسان‌های شدید جریان ورودی روبه‌رو است، به‌عنوان نمونه مطالعاتی تحقیق انتخاب شد. از مدل شبیه‌ساز هیدرودینامیکی HEC-RAS، برای تولید اطلاعات مورد نیاز آموزش و صحت‌سنجی مدل‌های یادشده استفاده شد. پس از به دست آوردن شاخص کفایت تحویل آب با استفاده از سه مدل اشاره‌شده، به مقایسه آنها با شاخص کفایت تحویل آب مشاهداتی پرداخته شد. نتایج این تحقیق به شرح زیر خلاصه می‌شود:

۱) مدل سیستم استنتاج فازی (FIS) به دلیل حساسیت‌هایی مانند دسته‌بندی اطلاعات ورودی (دبی تحویلی به آبگیرها) نسبت به خروجی و همچنین تدوین قوانین، در مقایسه با دو مدل ANN و ANFIS در ارزیابی شاخص کفایت تحویل آب از خطای قابل قبولی برخوردار نبود و نتوانست شاخص یادشده را به‌خوبی پیش‌بینی کند.

۲) مدل ANN به‌عنوان یکی از ابزارهای مناسب و قدرتمند برای پیش‌بینی شاخص کفایت تحویل آب در شبکه آبیاری رودشت، بیشترین مطابقت را با شاخص کفایت تحویل آب واقعی داشت و با مقادیر آماره‌های ارزیابی $R=0.99$ ، $NRMSE=0.001$ ، $NASH=0.99$ و $MAPE=0.10\%$ و $MAE=0.0002$ پیش‌بینی بهتری را ارائه داد.

۳) همچنین، مدل ANFIS نیز با استفاده از توابع عضویت گوسی با تعداد ۵ تابع عضویت، توانست شاخص کفایت تحویل کشاورزی را با مقادیر آماره‌های ارزیابی $R=0.99$ ، $NRMSE=0.002$ ، $NASH=0.99$ و $MAPE=0.48\%$ و $MAE=0.001$ به‌خوبی پیش‌بینی کند.

مقایسه نتایج هر سه مدل FIS، ANN و ANFIS نشان داد مدل‌های ANN و ANFIS در مقایسه با مدل FIS، با دقت بیشتر و خطای کمتری قادر به پیش‌بینی شاخص کفایت تحویل آب در منطقه مطالعه شده بودند و می‌توانند به مدیران و ذی‌نفعان برای بهبود مدیریت سایر سامانه‌های توزیع آب کشاورزی کمک کنند. مدل‌های پیشنهادی در

تحقیق حاضر می‌تواند برای ارزیابی و تخمین بهتر و سریع‌تر شاخص‌های دیگری مانند شاخص راندمان و عدالت توزیع آب نیز به کار برده شوند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود به‌منظور بهبود مدیریت و ارزیابی عملکرد سایر سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، از مدل‌های یادشده در تخمین شاخص‌های کارایی مربوط به فرایند توزیع آب کشاورزی استفاده شود.

منابع

- [1]. Shahdany SMH, Sadeghi S, Majd EA. Application of Automatic Regulating Structures in Order to Improving Main Irrigation Canal Operational Performance Suffering From Severe Inflow Fluctuations, Case Study of Roodasht Main Irrigation Canal. 2017; 14-27. [Persian]
- [2]. Hosseini SM, Mosaedi A, Golkarian A, Nasseri K. Modeling Some Factors of Affecting Rill Erosions using Fuzzy Inference System. Water and Soil Conservation. 2015; 22(4): 103-120. [Persian]
- [3]. Poustizadeh N, Najafi N. Discharge Prediction by Comparing Artificial Neural Network With Fuzzy Inference System (Case study: Zayandeh Rud River). Iran Water Resources Research. 2011; 7(2): 92-97. [Persian]
- [4]. Koorehpazan Dezfouli, A. Fuzzy Set Theory and its Applications in the Modeling of Water Engineering Problems. Amirkabir Jahad Daneshgahi Press, Tehran. 2005; 261p. [Persian]
- [5]. Poustizadeh, N. River Flow Forecasting Using Fuzzy Inference System, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University. 2006; 153p. [Persian]
- [6]. Ashrafi KH, Hoshariipoor GA, Najjararabi B, Keshavarzi Shirazi H. Prediction of Daily Carbon monoxide Concentration Using Hybrid FS-ANFIS Model Based on Atmospheric Stability Analysis; Case Study: city of Tehran. Journal of the Earth and Space Physics. 2012; 38(2): 183-201.
- [7]. Milan, SG, Roozbahani A, Banihabib ME. Fuzzy optimization model and fuzzy inference system for conjunctive use of surface and groundwater resources. Journal of Hydrology. 2018; 566: 421-434
- [8]. Tiri A, Belkhiri L, Mouni L. Evaluation of surface water quality for drinking purposes using fuzzy inference system. Groundwater for Sustainable Development. 2018; 6: 235-244.
- [9]. Ahmed AAM, Shah SM A. Application of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) to estimate the biochemical oxygen demand (BOD) of Surma River. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 2017; 29(3): 237-243

- [10]. Yaghoubi B, Izadbakhsh MA, Hayati F. Predicting discharge coefficient of Triangular Plan Form Weirs using Hybrid Model based on Fuzzy Systems and Differential Evolution Algorithm. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*. 2019; 6(22): 1-12. [Persian]
- [11]. Esmaeili Gisavandani H, Akhond Ali AM, Zarei H, Taghian M. Evaluation of the Ability of Adaptive Neuro Fuzzy System Artificial Neural Network and Regression to Regional Flood Analysis. *Water and Soil Conservation*. 2017; 24(3): 149-166. [Persian]
- [12]. Yaseen ZM, Ebtehaj I, Bonakdari H, Deo RC, Mehr AD, Mohtar WHMW, et al. Novel approach for streamflow forecasting using a hybrid ANFIS-FFA model. *Journal of Hydrology*. 2017; 554: 263-276.
- [13]. Tao H, Diop L, Bodian A, Djaman K, Ndiaye PM, Yaseen ZM. Reference evapotranspiration prediction using hybridized fuzzy model with firefly algorithm: Regional case study in Burkina Faso. *Agricultural water management*. 2018; 208: 140-151.
- [14]. Nguyen V, Li Q, Nguyen L. Drought forecasting using ANFIS-a case study in drought prone area of Vietnam. *Paddy and water environment*. 2017; 15(3): 605-616
- [15]. Yaseen ZM, Ghareb MI, Ebtehaj I, Bonakdari H, Siddique R, Heddami S, et al. Rainfall pattern forecasting using novel hybrid intelligent model based ANFIS-FFA. *Water resources management*. 2018; 32(1): 105-122.
- [16]. Wen X, Fang J, Diao M, Zhang C. Artificial neural network modeling of dissolved oxygen in the Heihe River, Northwestern China. *Environmental monitoring and assessment*. 2013; 185(5): 4361-4371.
- [17]. Shadmani M, Marofi S, Mohammadi K, Sabziparvar AA. Regional flood discharge modeling in Hamedan province using Artificial Neural Network. *Journal of Water and Soil Conservation*. 2011; 18(4): 21-42. [Persian]
- [18]. MalekZadeh M, Fereydooni M. Evaluation of MLP Neural Network in Flow Discharge Prediction in Tangabad Dam Basin FiroozAbad River. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. 2015; 5(4): 322-329.
- [19]. Cheng Ch, Niu W, Feng Zh, Shen j, Chau K. Daily Reservoir Runoff Forecasting Method Using Artificial Neural Network Based on Quantum-behaved Particle Swarm Optimization. *Water*. 2015; 7: 4233-4246.
- [20]. Seo Y, Kim S, Kisi O, Singh VP. Daily water level forecasting using wavelet decomposition and artificial intelligence techniques. *Journal of Hydrology*. 2015; 520: 224-243.
- [21]. Kaghazchi A. Development of Bayesian Network Model for Simulation and Assessment of Water Distribution and Delivery within Main Irrigation Canals. Master Thesis, Irrigation and Drainage Department, Aburayhan Campus, University of Tehran. 2019. [Persian]
- [22]. Molden DJ, Gates T. K. Performance measures for evaluation of irrigation-water-delivery systems. *Journal of irrigation and drainage engineering*. 1990; 116(6): 804-823.
- [23]. Ghasemnezhad Moghadam N, Baghaei F, Bafandeh Zende A. Fuzzy logic in simple language. *Iranian Magazine of Quality Control*. 1999; 24: 43-51.
- [24]. McCulloch WS, Pitts W. A logic calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bull Math Biophys*. 1943; 5: 115-33
- [25]. Rosenblatt F. Principles of Neurodynamics: Perceptrons and the Theory of Brain Mechanics. Spartan. 1962.
- [26]. Noori N, Kalin L. Coupling SWAT and ANN models for enhanced daily streamflow prediction. *Journal of Hydrology*. 2016; 533: 141-151.
- [27]. Kasiviswanathan KS, Sudheer KP. Comparison of methods used for quantifying prediction interval in artificial neural network hydrologic models. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2016; 2(1): 22
- [28]. Radmanesh F, Pourhaghi A, Solgi A. Improving the Performance of ANN Model, Using Wavelet Transform and PCA Method for Modeling and Predict Biochemical Oxygen Demand (BOD). *Journal of the Ecohydrology*. 2017; 3(4): 569-585. [Persian]
- [29]. Alborzi M. Introduction to Artificial Neural Networks. Amirkabir University of Technology Press. 2002; 137p. [Persian]
- [30]. Asghari J, Rostami R. Monthly Discharge Prediction of Seminehrood Using Support Vector Machine and Integrated Fuzzy Neural Inference System. *Icohacc*. 2017; 1-9. [Persian]
- [31]. Rezaei Navaei S, Koosha H. Applying Data Mining Techniques for Customer Churn Prediction in Insurance Industry. *International Journal of Industrial Engineering & Production Management*. 2016; 635-653. [Persian]