اکوهیدرولوژی

دورهٔ ۷، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۹، ص ۶۴۶-۶۳۵

توسعهٔ مدل‌های ANN, FIS و ANFIS برای ارزیابی شاخص کفایت در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی (مطالعهٔ موردی: شبکهٔ 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

به‌منظور 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)، شبکهٔ عصبی (ANN) و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)، برای توسعهٔ مدل هوشمند ارزیابی کفایت تحویل آب در یک کانال آبیاری، با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در فرایند بهره‌برداری استفاده شد. به‌منظور توسعه و بررسی چگونگی عملکرد مدل‌های توسعه داده‌شده، کانال اصلی شبکهٔ آبیاری رودشت در استان اصفهان که با مشکل نوسان‌های شدید جریان ورودی روبه‌رو است، به عنوان مطالعهٔ 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، به‌ترتیب به مقدار ۵۷/۰۷، ۵۶/۶۸ درصد بهبود یافته است. بررسی نتایج نشان داد مدل‌های توسعه داده‌شدهٔ هوشمند نسبت به روش‌های مرسوم ارزیابی (مدل‌های هیدرودینامیکی و شاخص‌های ارزیابی) نه‌تنها زمان‌بر 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.

* نویسندهٔ مسئول

Email: roozbahany@ut.ac.ir

مقدمه

با توجه به محدودیت منابع آبی کشور، افزایش جمعیت و به تبع آن، نیاز روزافزون به تولید محصولات کشاورزی، استفادهٔ بهینه از آب موجود در بخش کشاورزی به‌عنوان عمده‌ترین مصرف‌کنندهٔ آب، اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. سامانه‌های توزیع آب کشاورزی تأثیر زیادی بر استفادهٔ بهینه از آب در بخش کشاورزی دارند اما به‌رغم تحقیقات گسترده در زمینهٔ بهسازی، عملکرد زیادی ندارند [۱]. نخستین گام برای بهبود عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی، ارزیابی وضع موجود آنهاست. به این منظور، باید رفتار هیدرولیکی جریان در کانال‌های آبیاری توسط مدل‌های هیدرودینامیکی شبیه‌سازی شده و سپس، شاخص‌های ارزیابی عملکرد محاسبه شود. با وجود اینکه روش‌های مرسوم ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی امکان بررسی گزینه‌های مختلف بهره‌برداری و تحقق تصمیم‌گیری‌های مناسب در مدیریت بهره‌برداری سامانه‌های توزیع آب کشاورزی را فراهم می‌کنند، اما زمان‌بر بوده و همچنین همراه با پیچیدگی و عدم قطعیت زیادی هستند. از این‌رو، وجود این محدودیت‌ها و ناتوانی بسیاری از مدل‌های موجود در بررسی ابهامات و عدم قطعیت‌های پارامترهای گوناگون و واسنجی وقت‌گیر آنها، رویکرد به تئوری فازی و سایر مدل‌های هوشمند را به‌عنوان تکنیک‌های جدید و ابزاری توانمند در فرایندهایی پیچیده مانند پیش‌بینی، توجیه‌پذیر می‌کند [۲].

مزیت اصلی این مدل‌های هوشمند نسبت به روش‌های رایج این است که در مدت‌زمان نسبتاً کوتاهی قادر به بررسی تأثیر انواع پارامترهای در دسترس، بر فرایند بررسی‌شده هستند [۳] که در ادامه به مزیت و دلیل هر یک از مدل‌ها پرداخته می‌شود. سیستم استنتاج فازی، ابزاری توانمند برای حل مسائل مربوط به سیستم‌های غیرخطی و مسائلی که وابسته به استدلال، تصمیم‌گیری و استنباط بشری هستند، به شمار می‌آید [۴]. همچنین، با استفاده از آن می‌توان عدم قطعیت‌های موجود را به همراه درک روابط ذاتی میان داده‌ها مدل‌سازی کرد [۵]. شبکه‌های عصبی مصنوعی نیز یکی از روش‌های متداول جعبه‌سیاه در پیش‌بینی و تحلیل سیستم‌های غیرخطی هستند، همچنین این قابلیت را دارند که به‌آسانی با اطلاعات موجود تطابق پیدا کنند، از روی یک‌سری اطلاعات آموزش ببینند و رابطهٔ مناسب بین اطلاعات برقرار کنند [۴]. یک مدل آماری نیز که به‌تازگی توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است. سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS[1]) است که ترکیبی از قابلیت‌های دو مدل FIS[2] و ANN[3] را دارد. همچنین، مزایای خاص خود را دارد که از آن جمله می‌توان به توانایی شبیه‌سازی سامانه‌های غیرخطی، دقت زیاد و زمان کمتر ساخت مدل و محاسبات آن اشاره کرد [۶]. با توجه به موارد یادشده و قابلیت‌های بیان‌شده سه مدل سیستم استنتاج فازی، شبکهٔ عصبی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی در تحقیق حاضر به توسعهٔ مدل‌های یادشده برای ارزیابی شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی در شبکهٔ آبیاری رودشت، پرداخته شد. پژوهش‌های زیادی نیز درمورد کاربرد مدل‌های یادشده در زمینهٔ مهندسی علوم صورت گرفته است که می‌توان به مواردی همچون مدل‌سازی خشکسالی، مدیریت بحران، برآورد رسوب، پیش‌بینی هوا، سیلاب و جریان رودخانه اشاره کرد [۴]. در ادامه، به برخی از این مطالعات اشاره می‌شود:

حسینی و همکاران، برای مدل‌سازی عوامل مؤثر بر فرسایش شیاری، از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد تابع عضویت گوسی با روش دی‌فازی کوچک‌ترین ماکزیمم به‌عنوان مدل بهینه در پیش‌بینی فرسایش شیاری در منطقهٔ احمدآباد مشهد است [۲]. Ghordoyee Milan و همکاران برای استفادهٔ پایدار از منابع آب سطحی و زیرزمینی از مدل بهینه‌سازی خطی فازی و سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند و توانستند عدم قطعیت موجود در میزان تبخیر و برداشت از آب‌های زیرزمینی و همچنین میزان رواناب را در نظر بگیرند. نتایج پژوهش آنها نشان داد این مدل‌ها قادر به پیش‌بینی مقدار بهینهٔ برداشت آب‌های زیرزمینی هستند و می‌توانند جایگزین روش‌های بهینه‌سازی عددی شوند [۷]. Tiri و همکاران طی تحقیقی برای بررسی کیفیت آب از لحاظ شرب با هدف ارائهٔ شاخص کیفیت آب (WQI) از سیستم استنتاج فازی (FIS) استفاده کردند و از مقادیر پارامترهای هیدروشیمیایی آب‌های 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

Ahmed & Shah از سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS) برای برآورد تقاضای اکسیژن بیوشیمیایی (BOD) رودخانهٔ سورما از بنگلادش، استفاده کردند. نتایج مطالعهٔ 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 مثلثی 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 تجزیه‌وتحلیل نتایج مدل‌سازی، عدد فرود جریان، مؤثرترین پارامتر در مدل‌سازی ضریب دبی سرریزهای مثلثی 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، شبکهٔ عصبی مصنوعی و رگرسیونی در تحلیل منطقه‌ای سیلاب در حوضهٔ آبریز کرخه را ارزیابی کردند. آنها با مقایسهٔ مدل ANFIS، ANN و مدل رگرسیونی نشان دادند که مدل ANFIS در مقایسهٔ ANN منتخب و مدل رگرسیونی به‌خصوص در دورهٔ بازگشت‌های زیاد دقت بیشتری دارد. ولی در مجموع از نظر دقت پیش‌بینی ANFIS در تمام دورهٔ بازگشت‌ها، دبی سیلاب مطابقت بسیار زیادی با دبی سیلاب واقعی دارد و می‌توان آن را به‌عنوان بهترین ابزار برای پیش‌بینی دبی سیلاب در دورهٔ بازگشت‌های مختلف معرفی کرد [۱۱]. Zaher Mundher Yaseen و همکاران به‌منظور پیش‌بینی جریان ماهانهٔ رودخانهٔ Pahang در مالزی از ترکیب مدل ANFIS با الگوریتم کرم شب‌تاب به‌عنوان ابزار بهینه‌ساز، استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان می‌دهد بهینه‌ساز FFA[1] 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 نه‌تنها برای اهداف پیش‌بینی جریان دارد، بلکه برای سایر متغیرهای پیش‌بینی هیدروهواشناسی نیز کاربرد دارد [۱۲]. Hai Tao و همکاران با هدف پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع منطقه‌ای در بورکینافاسو از ترکیب مدل ANFIS با الگوریتم کرم‌شب‌تاب 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[2] به‌عنوان متغیرهای ورودی می‌توانند مدت زمان طولانی‌تر از SPI[3] 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 حوضهٔ رودخانهٔ پاهانگ واقع در شبه‌جزیرهٔ 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 منطقهٔ مطالعه‌شده اتخاذ شود [۱۵].

Wen و همکارانش اکسیژن محلول رودخانهٔ Heihe چین را با استفاده از شبکهٔ 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 شبکهٔ عصبی مصنوعی پرداختند. در این پژوهش با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص شد که در منطقهٔ مطالعه‌شده بهترین ساختار شبکهٔ عصبی مصنوعی پیش‌خور با دو لایهٔ پنهان بود [۱۷]. Malekzadeh and Fereydooni به بررسی شبکهٔ MLP برای پیش‌بینی جریان آب رودخانهٔ فیروزآباد و سد تنگاباد (شیراز) پرداختند. سپس، با تعیین معماری مناسب شبکه و تقسیم‌بندی داده‌ها به دو دستهٔ تست و

1. Sea Surface Temperature Anomalies

2. Firfly Optimization Algorithm
3. Standardized Precipitation Index

آموزش، از آماره‌های میانگین مربعات خطا و ضریب همبستگی برای بررسی دقت مدل استفاده کردند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد مدل شبکهٔ عصبی، توانایی زیادی در پیش‌بینی داده‌های دبی بر اساس ورودی‌های منتخب دارد [۱۸]. Cheng و همکاران پیش‌بینی جریان روزانهٔ ورودی به مخزن سد هونگ جیادو در چین را با داده‌های دورهٔ آماری ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ و بر اساس قاعدهٔ بهینه‌سازی ازدحام ذرات تحت ANN انجام دادند. نتایج بررسی آنها نشان داد روش پیشنهادشده صحت و دقت بیشتری نسبت به شبکهٔ عصبی دارد و روش ارائه‌شده، می‌تواند نوعی تکنیک جایگزین برای مرحلهٔ آموزش در شبکهٔ عصبی برای انتخاب پارامترهای مؤثر باشد [۱۹]. Youngmin Seo و همکاران با هدف پیش‌بینی روزانهٔ سطح آب از دو مدل ترکیبی شبکهٔ عصبی مبتنی بر موجک (WANN)[1] و سیستم استنتاج عصبی_فازی سازگار با موجک (WANFIS)[2] استفاده کردند. نتایج به‌دست‌آمده از مطالعهٔ یادشده نشان می‌دهد که ترکیب تجزیهٔ موجک و مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند ابزاری مفید برای پیش‌بینی دقیق سطح آب روزانه باشد و می‌تواند بازده بهتری نسبت به مدل‌های پیش‌بینی معمولی داشته باشد [۲۰].

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد تا کنون مطالعه‌ای که با هدف جایگزینی مدل‌های شبیه‌سازی و ارزیابی توزیع آب کشاورزی به استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی بپردازد، صورت نگرفته است. بنابراین، با توجه به اینکه در سامانه‌های توزیع آب کشاورزی در مورد پارامترهایی مانند دبی ورودی به سراب، دبی تحویلی به آبگیرها، دبی مورد نیاز (حقابه) و تلفاتی که در مسیر انتقال کانال اصلی رخ می‌دهد، عدم قطعیت وجود دارد و همچنین، با استناد به قابلیت‌های سه مدل یادشده، چنین استنباط می‌شود که ارزیابی مؤثر سامانه‌های توزیع آب کشاورزی زمانی انجام می‌شود که موارد یادشده تأمین شود. از این‌رو، تحقیق حاضر برای نخستین‌بار به توسعهٔ مدل‌های سیستم استنتاج فازی، شبکهٔ عصبی و سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی، برای ارائهٔ یک مدل جایگزین ارزیابی عملکرد توزیع آب کشاورزی پرداخته است.

مواد روش‌ها

روش تحقیق

روند کلی و مراحل انجام تحقیق حاضر به‌صورت زیر است:

۱. توسعهٔ مدل شبیه‌سازی هیدرودینامیکی توزیع آب کشاورزی، به‌عنوان داده‌های ورودی و مشاهداتی؛

۲. دسته‌بندی میزان آبدهی شبکه و اطلاعات بهره‌برداری به شکل فازی؛

۳. تدوین مدل‌های سیستم استنتاج فازی، شبکهٔ عصبی و سیستم تطبیقی عصبی_فازی؛

۴. استفاده از داده‌های دبی تحویلی به‌عنوان ورودی مدل‌ها و برآورد شاخص کفایت تحویل کشاورزی به‌عنوان خروجی؛

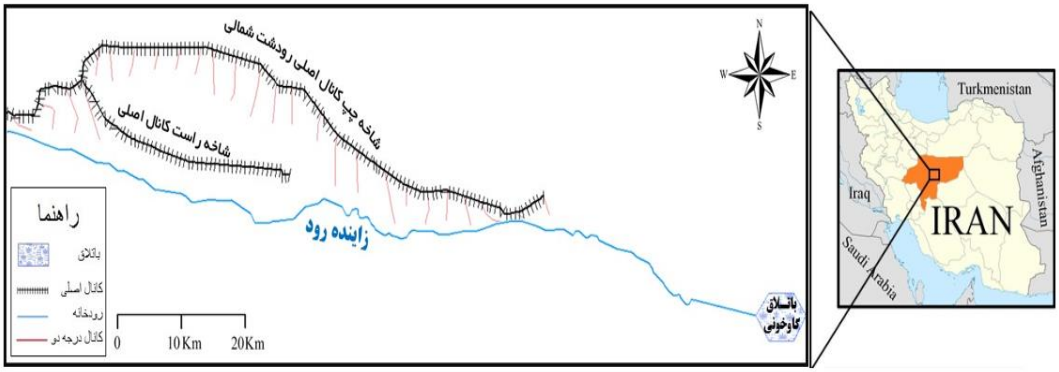
۵. واسنجی و صحت‌سنجی مدل‌های یادشده با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل k-fold؛

۶. ارزیابی نتایج به‌دست‌آمده با معیارهای آماری.

منطقهٔ مطالعاتی

شبکهٔ آبیاری رودشت در جنوب شرقی اصفهان با مساحت حدود ۴۵ هزار هکتار است. در این شبکه حدود ۳۰۰ دریچهٔ آبگیر نصب شده است که این دریچه‌ها بر اساس مقدار معینی از دبی ورودی به شبکه باز می‌شوند. از این تعداد، ۲۶ آبگیر روی کانال اصلی واقع‌اند که آب را به کانال‌های فرعی درجهٔ ۲ تحویل می‌دهند. در تحقیق حاضر، کانال اصلی چپ شبکهٔ آبیاری رودشت به‌عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است (شکل ۱). این قسمت از کانال دارای شیب ملایم و شامل ۱۴ سازه آب‌بند (سازهٔ تنظیم‌کنندهٔ سطح آب) است که بر این اساس، کانال مطالعه‌شده به ۱۳ دریچهٔ باز تقسیم می‌شود. همچنین، رودشت آخرین دشتی است که از زاینده‌رود آبگیری می‌کند. بنابراین، همهٔ نوسان‌های رودخانه در مسیر ۳۵۰ کیلومتری به صورت نوسان‌های مداوم دبی ورودی به شبکه و در نتیجه، اختلال در کارکرد شبکه بروز می‌کند. از این‌رو، یکی از کانال‌های پرمشکل آبیاری کشور از لحاظ مدیریت تأمین و توزیع آب کشاورزی است و به همین دلیل انتخاب شده است تا عملکرد مدل‌های توسعه داده‌شده به گونهٔ مناسبی بررسی شود.

1. Wavelet-based Artificial Neural Network
2. Wavelet-based Adaptive Neuro-fuzzy Inference System



شکل ۱. شماتیک کانال اصلی شاخهٔ چپ شبکهٔ آبیاری رودشت

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، CanalCad، ICSS، Sobek و CANALMAN اشاره کرد. نرم‌افزار HEC-RAS برای انجام محاسبات هیدرولیکی در حالت یک‌بعدی، دوبعدی و یا ترکیب این دو، در شبکهٔ 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 کالیبره‌شده 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 به‌ترتیب در هر یک از سناریوها دبی ورودی به کانال نسبت به دبی نرمال بین ۰ تا ۲۰ ± درصد، ۲۰ ± تا ۴۰ ± درصد و ۴۰+ تا ۴۶+، ۴۰- تا ۹۰- درصد متغیر است. به‌ازای هر سناریو، محدودهٔ دبی ورودی به کانال تعیین شد و به ازای هر یک از این دبی‌ها، مدل هیدرودینامیکی کالیبره‌شده اجرا شد و دبی‌های تحویلی به هر۲۶ آبگیر به دست آمدند. با مشخص شدن دبی تحویلی به آبگیرها، شاخص کفایت تحویل کشاورزی محاسبه شد. در جدول ۱، محدودهٔ 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 شاخهٔ شمالی شبکهٔ آبیاری رودشت، از نظر شاخص کفایت تحویل کشاورزی مناسب نیست.

در این مرحله با در دست داشتن داده‌های به‌دست‌آمده از فرایندهای ارزیابی و شبیه‌سازی، به توسعهٔ مدل‌های هوشمند سیستم استنتاج فازی، شبکهٔ عصبی و سیستم تطبیقی عصبی_فازی به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه‌های توزیع آب کشاورزی پرداخته شد. در این خصوص از متوسط داده‌های دبی تحویلی به آبگیرها و شاخص کفایت تحویل کشاورزی به‌عنوان داده‌های ورودی و آموزش مدل‌های یادشده استفاده شد.

جدول ۱. محدودهٔ تغییرات شاخص کفایت تحویل کشاورزی

سناریوی محدودهٔ دبی سراب (M^3/S)	کفایت تحویل کشاورزی (٪)
نوسانی ملایم کاهشی ۴/۴۹-۳/۶	۶۴/۸-۵۱/۶
نوسانی متوسط کاهشی ۳/۵۹-۲/۷	۵۱/۵-۳۸/۸
نوسانی شدید کاهشی ۲/۶۹-۰/۴۴	۳۸/۷-۰/۰۲۵
نوسانی ملایم افزایشی ۵/۴-۴/۵۱	۷۳/۲-۶۴/۸
نوسانی متوسط افزایشی ۶/۳-۵/۴۱	۸۰/۶-۷۳/۳
نوسانی شدید افزایشی ۶/۶-۶/۳۱	۸۲/۶-۸۰/۶

شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی

در تحقیق حاضر، به‌منظور ارزیابی شبکهٔ آبیاری رودشت، از شاخص کفایت تحویل آب کشاورزی معرفی‌شده توسط مولدن و گیتس طبق رابطهٔ ۱ استفاده شده است [۲۲]:

کفایت تحویل (PA[1]): شاخصی است که میزان توانایی روش بهره‌برداری را در تحویل آب به میزان درخواست‌شده در هر آبگیر بیان می‌کند.

$$P_A = \frac{1}{T}\sum_T[\frac{1}{R}\sum_R(P_a)]$$
$$P_a = \frac{Q_d}{Q_r} \rightarrow if \rightarrow Q_d < Q_r \rightarrow Otherwise \rightarrow P_a = 1 \quad (۱)$$

که در آن،Qr و Qd به‌ترتیب معرف مقدار آب مورد نیاز (حقابه) و مقدار آب تحویل‌شده در عمل برای انشعاب R در دورهٔ زمانی T و نمادهای $\frac{1}{T}\sum$ و $\frac{1}{R}\sum$ به‌ترتیب متوسط زمانی و مکانی هستند. براساس استاندارد ارائه‌شده 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 لطفی‌زاده (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 ارائهٔ عبارت‌های زبانی برای بیان دانش و معلومات بشری، استفاده از عبارت‌های شرطی به صورت قوانین «اگر- آن‌گاه» است. با استفاده از شیوهٔ 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].

به‌منظور ساخت مدل فازی در پژوهش حاضر، دامنهٔ 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 گستردهٔ توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی و نتایج به‌دست 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 درجهٔ هم‌پوشانی آنها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دورهٔ آموزش، قوانین تعریف شد. به‌منظور تکمیل مراحل مدل‌سازی، در این پژوهش برای استنتاج فازی از روش ممدانی (Mamdani) و استلزام[2] از روش حداقل (Min) و برای تجمیع قوانین فازی (Aggregation)، از روش حداکثر (Max) استفاده شد. در مدل‌سازی فازی، استنتاج نهایی به یک نتیجهٔ 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.

شبکهٔ عصبی مصنوعی (ANN)

تئوری مدل‌های شبکهٔ عصبی مصنوعی برای نخستین‌بار توسط مک کولاچ و والتر پیتز در سال ۱۹۴۳ مطرح شد [۲۴] و بعد از آن روزنبلات در سال ۱۹۶۲ ایدهٔ پرسپترون را پیشنهاد داد [۲۵]. امروزه شبکهٔ عصبی مصنوعی در مطالعات هیدرولوژی و مدیریت منابع آب کاربرد وسیعی دارد. شبکهٔ عصبی مصنوعی یک مدل جعبه‌سیاه 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 (لایهٔ ورودی) و فضای مطلوب (لایهٔ خروجی) ارائه دهد [۱۱]. معماری معمولی ANN دارای لایهٔ ورودی، پنهان و خروجی است. لایه یا لایه‌های پنهان، اطلاعات دریافت‌شده

1. Delivery Aquracy

2. Implication

از لایهٔ 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 وسیلهٔ وزن‌ها و توابع انتقال بهینه اصلاح می‌شوند [۲۸]. تابع انتقال بیان‌کنندهٔ 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، به‌منظور ساخت مدل شبکهٔ عصبی، ساختار پرسپترون چندلایه MLP انتخاب شد که یک شبکهٔ پیشخور است. شبکه‌های پیشخور یک یا چند لایه، یک یا چند لایهٔ 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 شبکهٔ عصبی پرسپترون ۳ لایه بر اساس الگوریتم شبکه FFBP[1] و الگوریتم یادگیری لونبرگ_مارکوارت، با تعداد و نرون‌های مختلف لایهٔ پنهان و همچنین توابع انتقال متفاوت ایجاد شد و با استفاده از روش k-fold، 5 مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفت، سپس بهترین حالت براساس معیارهای مختلف آماری انتخاب شد. مشخصات ۶ شبکهٔ عصبی در جدول ۲ آمده است.

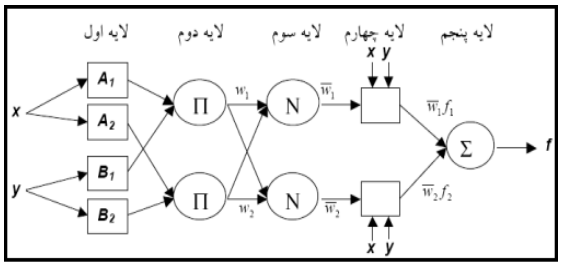
جدول ۲. مشخصات شبکه‌های عصبی ساخته‌شده

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

سیستم‌های استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)

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

ANFIS یک شبکهٔ پیشخور چندلایه است که از الگوریتم‌های یادگیری شبکهٔ عصبی و منطق فازی به‌منظور 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

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

$$O_{1,i} = \mu A_i(x) \; for \; i = 1,2$$
$$O_{1,i} = \mu B_i(x) \; for \; i = 3,4 \qquad (۲)$$

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

$$O_{2,i} = w_i = \mu A_i(x)\mu B_i(y) \; i = 1,2 \qquad (۳)$$

لایهٔ سوم: (گره‌های متوسط) خروجی این لایه نرمالیزه‌شدهٔ لایهٔ قبلی است:

$$O_{3,i} = \bar{w} = \frac{w_i}{w_1+w_2} \; i = 1,2 \qquad (۴)$$

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

$$O_{4,i} = \bar{w} f_i = \bar{w}(p_i x + q_i y + r_i) \qquad (۵)$$

لایهٔ پنجم: (گره‌های خروجی) در این لایه هر گره مقدار خروجی نهایی را به‌صورت رابطهٔ ۶ محاسبه می‌کند (تعداد گره‌ها برابر تعداد خروجی‌هاست):

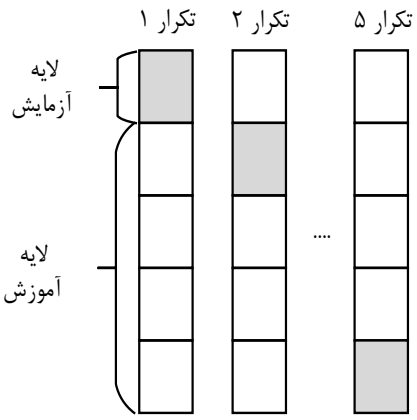
$$O_{5,i} = \sum_i \bar{w} f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \qquad (۶)$$

1. Feed-Forward Backprop

در این تحقیق، به‌منظور 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 اجراهای متعدد مدل ANFIS، بهترین حالت براساس معیارهای مختلف آماری انتخاب شد.

ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌ها

اعتبارسنجی متقابل، روشی آماری برای ارزیابی و مقایسهٔ 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 زیرمجموعهٔ مجزا تقسیم شده و k بار آموزش و ارزیابی انجام می‌شود، به این‌صورت که هر بار یکی از زیرمجموعه‌ها برای ارزیابی مدل نگه داشته شده و k-1 زیرمجموعهٔ 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، همهٔ 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

بنابراین، در تحقیق حاضر ابتدا با استفاده از روش k-fold، داده‌های آموزش به‌صورت تصادفی به ۵ زیرمجموعه مجزا تقسیم شدند. به این صورت که یکی از زیرمجموعه‌ها برای ارزیابی مدل و ۴ زیرمجموعهٔ دیگر، برای آموزش مدل در نظرگرفته شده و با استفاده از ۴ زیرمجموعه آموزش مدل‌ها صورت گرفت و از یک زیرمجموعهٔ باقی‌مانده برای پیش‌بینی رفتار مدل‌ها و ارزیابی آنها استفاده شد. این فرایند برای هریک از مدل‌ها ۵ مرتبه تکرار شد و میانگین نتیجهٔ 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)، ریشهٔ میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، نش- ساتکلیف (NASH) و R مطابق روابط ۷ تا ۱۱ ارزیابی می‌شود.

$$MAE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} | O_i - P_i | \quad (۷)$$

$$MAPE = 100 \times \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^{n} | \frac{O_i - P_i}{O_i} | \quad (۸)$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (۹)$$

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۱۰)$$

$$R = \frac{\sum(O-\bar{O})(P-\bar{P})}{\sqrt{\sum(O-\bar{O})^2 \sum(P-\bar{P})^2}} \quad (۱۱)$$

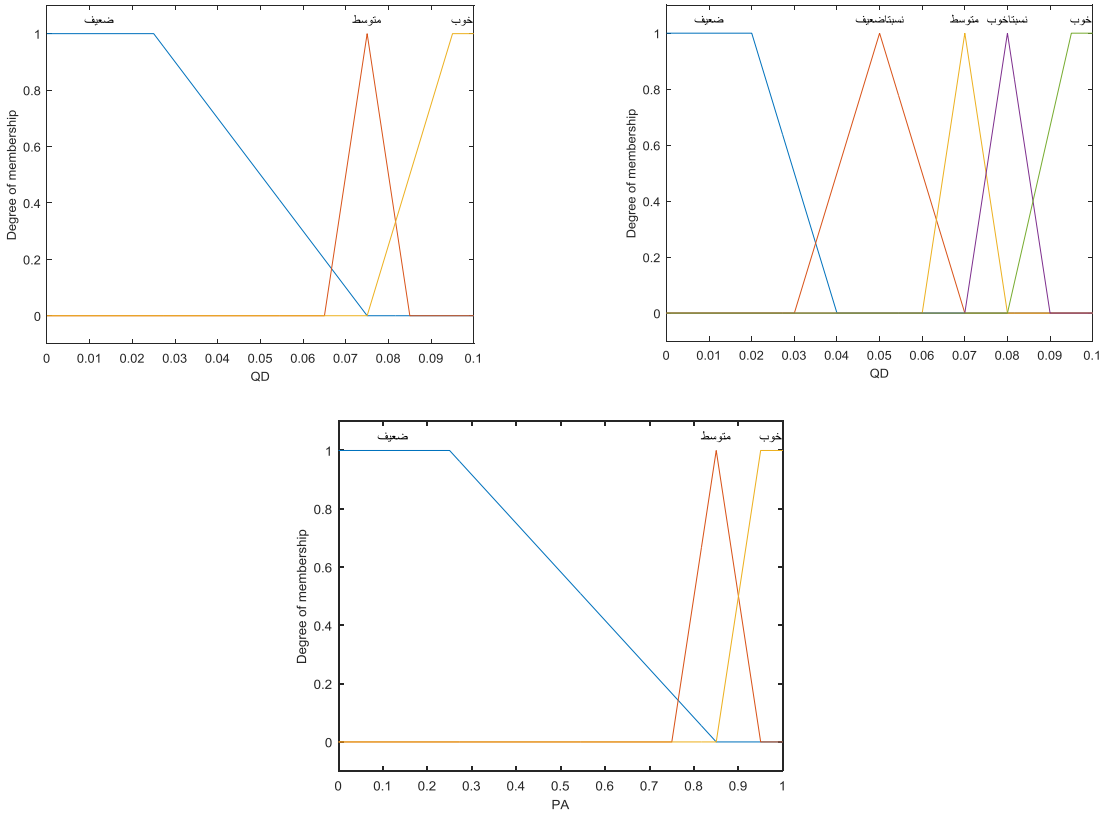
در این روابط، O و $\bar{O}$ مقادیر مشاهداتی و میانگین آنها و P و $\bar{P}$ مقادیر پیش‌بینی‌شده و میانگین آنها توسط مدل‌هاست. معیار NASH و R میزان رابطه بین دو متغیر را نشان می‌دهند، NASH در بازهٔ $-\infty$ تا ۱+، R در بازه ۰ تا ۱ تغییر می‌کنند. نزدیکی این معیارها به یک، نشان‌دهندهٔ رابطهٔ قوی بین دو متغیر است. روابط ۷ تا ۹ نیز مقادیری مثبت هستند و هر چه به صفر نزدیک‌تر باشند، میزان خطای دو متغیر نسبت بهم کمتر و دو متغیر به هم نزدیک‌ترند.

بحث و نتایج

نتایج مدل سیستم استنتاج فازی (FIS)

پس از ساخت مدل‌های فازی پیش‌بینی شاخص کفایت

تحویل آب کشاورزی و اجرای آن، تعداد و نوع بهینهٔ توابع عضویت و قوانین به‌صورت سعی و خطا مشخص شد. دبی تحویلی به آبگیرها 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 تحویل 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 ذوزنقه‌ای 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 درجهٔ هم‌پوشانی آنها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دورهٔ 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.



شکل ۴. توابع عضویت فازی ورودی و خروجی

جدول ۳. نتایج مدل FIS پیش‌بینی شاخص کفایت تحویل و توزیع شبکهٔ آبیاری رودشت

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

نتایج مدل شبکهٔ عصبی (ANN)

پس از آموزش شبکهٔ عصبی چندلایهٔ پرسپترون با استفاده از الگوریتم لونبرگ – مارکوت، بهترین توابع انتقال با کمترین میانگین خطا برای توابع انتقال Purelin و Tansig به دست آمد. به‌منظور بررسی تأثیر تعداد لایهٔ 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 ساخته‌شده حالت‌های مختلف موارد یادشده صورت گرفت. در نهایت، شبکه‌های ساخته‌شده با استفاده از روش k-fold، ۵ مرتبه مورد آموزش و تست قرار گرفتند. نتایج حاصل از آموزش شبکه‌ها، برای یافتن شبکهٔ عصبی بهینه در جدول ۴ همراه معیارهای ارزیابی آماری ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۴ قابل مشاهده است، از میان شبکه‌های آموزش‌دیده‌شده، شبکهٔ ۲ با ۵ نرون در لایهٔ پنهان و مقادیر آماره‌های ارزیابی R=0.99، NASH=0.99، NRMSE=0.001، 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[1] و تعداد زیاد نرون‌ها، سبب بیش‌برازش[2] می‌شود و منحنی برازشی بین این نقاط به‌شدت نوسان می‌کند. بررسی کلی نشان داد با افزایش تعداد نرون در لایهٔ پنهان دقت شبکهٔ عصبی افزایش می‌یابد، همچنین در مواقع استفاده از توابع انتقال Tansig و purelin به‌ترتیب در لایهٔ پنهان و خروجی نسبت به دیگر توابع انتقال، جواب بهتری حاصل می‌شود.

نتایج مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS)

بعد از تهیهٔ 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 ساخته‌شده 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 به‌دست‌آمده 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، 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 شبکهٔ آبیاری رودشت

شبکه	R		NASH		NRMSE		MAPE%		MAE	
	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test	Train	Test
۱	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۲۴	۰/۲۴	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱
۲	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲
۳	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۶	۱/۱۸	۱/۱۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲
۴	۰/۹۱	۰/۹۱	۰/۶۴	۰/۶۴	۰/۲۷	۰/۲۷	۷۳/۱۸	۵۳/۸۶	۰/۰۶۹	۰/۰۶۹
۵	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۳۴	۰/۰۳۴	۸/۷۴	۸/۷۵	۰/۰۱۳	۰/۰۱۳
۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۰۳۸	۰/۰۳۸	۵/۵۳	۵/۵۳	۰/۰۱۵	۰/۰۱۵

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

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

1. Underfitting
2. Overfitting

جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعهٔ 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 داده‌شده، کانال اصلی شبکهٔ آبیاری رودشت که با مشکل نوسان‌های شدید جریان ورودی روبه‌رو است، به‌عنوان نمونهٔ 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 مقایسهٔ 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 قابلی 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 شبکهٔ آبیاری رودشت، بیشترین مطابقت را با شاخص کفایت تحویل آب واقعی داشت و با مقادیر آماره‌های ارزیابی R=0.99، NASH=0.99، NRMSE=0.001، 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، NASH=0.99، NRMSE=0.002، MAPE=0.48% و MAE=0.001 به‌خوبی پیش‌بینی کند.

مقایسهٔ 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 منطقهٔ مطالعه‌شده 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 Ooerational Performance Suffering From Severe Inflow Flucations, Case Study of Roodasht Main Irrigation Canal. 2017; 14-27. [Persian]

[2]. Hosseini SM, Mosaedi A, Golkarian A, Nasseri K. Modeling Some Factros 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 Sysytem(Case study: Zayandeh rud River). Iran Water Resources Research. 2011; 7(2): 92-97. [Persian]

[4]. Koorehpazan Dezfuli, 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, Hoshiaripoor GA, Najararabi 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, Heddam 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, Aburaihan 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, Baghaienia F, Bafandeh Zendeh 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. Priciples 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 Machin and Intergrated 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]