

## مقایسه مدل هیبریدی ANFIS-PSO و مدل تجربی تورک در تخمین تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: پلدختر - لرستان)

علی حقی زاده<sup>۱\*</sup>، حسین یوسفی<sup>۲</sup>، طاهره ابراهیمیان<sup>۳</sup>، یزدان یاراحمدی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

۳. کارشناس ارشد مهندسی آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه لرستان

۴. کارشناس ارشد مهندسی اکوهیدرولوژی، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۳/۳۱)

### چکیده

تبخیر و تعرق در حوضه آبخیز یکی از اجزای اصلی چرخه آب و تخمین نیاز آبیاری است. هدف از پژوهش حاضر، تخمین تبخیر و تعرق مرجع (ET<sub>o</sub>) روزانه با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و مقایسه آن با مدل تجربی تورک است. داده‌های ورودی مدل تورک که شامل ساعت آفتابی، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد مربوط به ایستگاه هواشناسی پلدختر می‌شود، از اداره کل هواشناسی استان لرستان دریافت شده و تبخیر و تعرق با استفاده از این روش به دست آمده است. داده‌های ورودی مدل (ANFIS) که شامل دمای میانگین، رطوبت میانگین و گرمای نهان تبخیر می‌شود، با استفاده از روابط به دست آمد و به مدل داده شد. نتایج به دست آمده از هر روش به طور جداگانه با تبخیر محاسبه شده در محل ایستگاه با استفاده از تستک تبخیر مقایسه شد. در مطالعه حاضر عملکرد سیستم عصبی-فازی (ANFIS) بر مبنای الگوریتم بهینه‌سازی (PSO) در دستور کار قرار گرفت و نتایج به دست آمده رضایت‌بخش بود. کارایی روش‌های مقایسه شده با استفاده از آماره‌های ریشه میانگین مجذور خطا RMSE، میانگین مربعات خطا MSE و ضریب تعیین R<sup>2</sup> ارزیابی شد. روش ANFIS-PSO فقط با سه پارامتر دمای میانگین، رطوبت میانگین و گرمای نهان تبخیر قادر به پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع روزانه است و نسبت به مدل تجربی تورک دقت بیشتری دارد، به طوری که مقدار R<sup>2</sup>، RMSE، MSE به ترتیب برای مدل ANFIS ۰/۹۰، ۲/۶۵، ۷/۱۳ و برای مدل تجربی تورک به ترتیب ۰/۶۳، ۶/۲۶، ۳۹/۲۴ است.

**کلیدواژگان:** الگوریتم PSO، تبخیر و تعرق مرجع، سیستم استنتاج عصبی-فازی، مدل تجربی.

## مقدمه

کشور ایران از نظر اقلیمی و شرایط آب‌وهوایی جزء کشورهای خشک و نیمه‌خشک است. سالانه هزاران میلیارد مترمکعب آب شیرین از مخازن سدها که با هزینه زیادی جمع‌آوری شده است، تبخیر می‌شود و املاح و نمک به‌جای‌مانده از آب تبخیرشده، کیفیت آب را کاهش می‌دهد [۱]. تلفات آب از سطوح مرطوب که اساساً از تابش خورشیدی ناشی می‌شود، توان تبخیری محیط را کاهش می‌دهد. تبخیر و تعرق (ET)، یا ترکیب تبخیر از سطح خاک و سطوح گیاهی و تعرق گیاهی، معیار متداولی از تلفات بالقوه آب در محیط به شمار می‌آید [۲]. تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر و تعرق مصرف می‌شود، از عوامل اصلی برنامه‌ریزی به منظور دریافت محصول بیشتر است [۳]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بخش کشاورزی مصرف‌کننده اصلی آب در کشور است، بنابراین با بهبود مدیریت مصرف آب در این بخش و افزایش میزان مصرف آن می‌توان به طور درخور توجهی در مصرف آب صرفه‌جویی کرد. یکی از روش‌های مهم بهبود مدیریت مصرف آب در مزرعه، تخمین دقیق میزان مصرفی گیاه است [۴]. در پدیده تبخیر عوامل متعددی دخالت دارند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، عرض جغرافیایی محل و مقدار مواد محلول در آب اشاره کرد. روش‌های متعددی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع وجود دارد که هر یک با توجه به فرضیات و داده‌های مختلف هواشناسی استفاده شده در آنها، نتایج متفاوتی ارائه می‌دهند. بیشتر این روش‌ها تحت واسنجی‌های محلی به دست آمده‌اند و معلوم شده است که اعتبار جهانی محدودی دارند [۳]. همچنین، ممکن است به دلیل مشکلات فنی و اقتصادی، استفاده از ایستگاه‌های هواشناسی مجهز برای جمع‌آوری و ثبت داده‌های دقیق هواشناسی مقدور نباشد و یا در بعضی ایستگاه‌ها فقط برخی پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شود. از طرف دیگر، اثر متقابل پارامترهای هواشناسی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع و برخی پارامترهای هواشناسی سبب شده است تا روابط ارائه‌شده برای تخمین تبخیر و تعرق به روابطی غیرخطی و پیچیده تبدیل شوند، بنابراین مدلی که بتواند با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی، مقدار تبخیر و تعرق را به صورت دقیق برآورد کند، بسیار مفید خواهد بود [۴]. طی دهه‌های اخیر شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج فازی

(ANFIS) توسط محققان مختلف به منظور مدل‌سازی تبخیر با استفاده از داده‌های هواشناسی در نقاط مختلف دنیا به کار برده شده‌اند. طی تحقیقی در کشور باسک واقع در شمال اسپانیا، از مدل برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه چهار ایستگاه استفاده شد. سپس، روش پنمن مانیتیت به عنوان مرجع انتخاب شده و نتایج GEP با سیستم تطبیقی عصبی فازی استنتاج (ANFIS)، پریستلی - تیلور و مدل هارگریوز سامانی مقایسه شد. نتایج پژوهش یادشده نشان داد GEP بهتر از مدل ANFIS، پریستلی - تیلور و هارگریوز سامانی است و مدل ANFIS به عنوان دومین مدل انتخاب شد [۵]. برآورد میزان تبخیر براساس مدل‌های شبکه عصبی، عصبی - فازی و مقایسه با روش‌های تجربی نشان داد این مدل‌ها نتایج بهتری نسبت به روش‌های تجربی دارند. Terzi برنامه‌نویسی بیان ژن (GEP) و سیستم تطبیقی مبتنی بر استنتاج عصبی - فازی (ANFIS) را به منظور برآورد تبخیر روزانه دریاچه‌ای در بخش جنوب غربی ترکیه با ترکیب ورودی‌های مختلف مقایسه کرد و نشان داد نتایج مدل GEP نسبت به مدل ANFIS بهتر است [۶]. کومار و همکارانش در منطقه نگار هندوستان مقدار تبخیر را با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی - عصبی تخمین زدند. آنها پس از مقایسه نتایج به دست آمده (ANFIS) با مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر، نتیجه گرفتند که هر دو مدل با دقت خوبی میزان تبخیر را تخمین زدند، ولی مدل ANFIS نتایج نسبتاً بهتری نسبت به مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی داشت [۷]. محمدرضاپور به پیش‌بینی تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، برنامه‌ریزی ژنتیک و سیستم استنتاج عصبی - فازی در سیستان و بلوچستان پرداخت. مقایسه بین مدل‌ها در تحقیق یادشده نیز نشان داد در همه ایستگاه‌ها مدل ماشین بردار پشتیبان در مرتبه اول و سپس مدل برنامه‌ریزی بیان ژن و در آخر مدل نروفازی برای تخمین مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه قرار دارند [۸]. حقیقت‌جو و شاهرودی طی پژوهشی به مقایسه روش‌های سیستم استنتاج عصبی - فازی و برنامه‌ریزی بیان ژن در برآورد تبخیر از تشتک در خراسان جنوبی پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل برنامه‌ریزی بیان ژن نسبت به سیستم استنتاج عصبی - فازی کارایی بهتری در برآورد روزانه تبخیر از تشتک دارد [۹]. Citakoglu و همکارانش میانگین

تخمین می‌زند [۱۳]. Kobold و همکارانش از الگوریتم PSO به منظور کالیبراسیون یک مدل بارش-رواناب مفهومی موسوم به HBV در منطقه‌ای کوچک استفاده کردند. هیدروگراف تولیدشده ساعتی بود و تابع هدف به منظور بهینه‌سازی، ضریب Ens منظور شد [۱۴]. کمالی مدل مفهومی HEC-HMS را با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی PSO چندمنظوره (Multi objective PSO) کالیبره کرد. داده‌های استفاده شده در تحقیق ایشان ساعتی بوده و مدل کردن پیک‌های لحظه‌ای در رخداد‌های سیل بررسی شده است [۱۵]. هدف از تحقیق حاضر تعیین دقت مدل ANFIS-PSO در برآورد تبخیر و تعرق واقعی در منطقه پلدختر لرستان است که نسبت به مدل تجربی تورک نتایج رضایت‌بخشی ارائه داد.

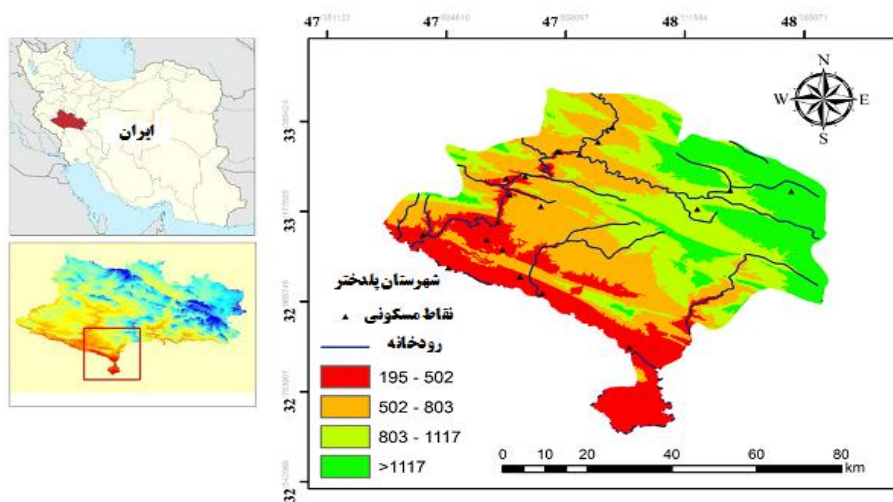
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مطالعه شده

در پژوهش حاضر از داده‌های ایستگاه سینوپتیک پلدختر با مختصات جغرافیایی طول ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی، عرض ۳۳ درجه و ۹۰ دقیقه شمالی، ارتفاع ۲۰۲۲ متر از سطح دریا استفاده شده است. همچنین، به منظور برآورد تبخیر و تعرق روزانه از مدل تجربی تورک و نیز سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی ANFIS-PSO استفاده شد. سپس، نتایج به دست آمده با داده‌های مشاهداتی در محل ایستگاه مطالعه شده مقایسه شد. شکل ۱ موقعیت منطقه مطالعه شده را نشان می‌دهد.

تبخیر و تعرق را با استفاده از مدل‌های عصبی - فازی و شبکه عصبی تخمین زدند. آنها دریافتند که هر دو مدل برآورد بهتری نسبت به روش کلاسیک دارند [۱۰]. شایان‌نژاد در دو منطقه اصفهان و رشت از روش‌های شبکه عصبی و برنامه‌ریزی بیان ژن برای تحلیل حساسیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع نسبت به پارامترهای هواشناسی استفاده کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد در اصفهان و رشت، کمینه و بیشینه دما در مقابل دیگر پارامترها، بیشترین ضریب همبستگی را دارند [۱۱]. نکوآمال به تعیین بهترین مدل سیستم استنتاج انطباقی فازی-عصبی (ANFIS) در تخمین تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن در اقلیم نیمه‌خشک ساحلی هرمزگان پرداخت. نتایج پژوهش ایشان نشان داد بین روش‌های به کار گرفته شده در مطالعه یادشده مدل ANFIS برای تخمین ETo در منطقه میناب مناسب‌تر است [۱۲]. محققان بخش علم و صنعت در زمینه‌های مختلف بخش هیدرولوژی از جمله تخمین بار معلق رودخانه، رابطه بارش رواناب، تعیین فاصله زهکش‌ها و پدیده تبخیر از تشت، از مدل‌های هوش مصنوعی تا حدودی بهره گرفتند. در زمینه مدل کردن تبخیر و تعرق مرجع نیز با استفاده از این مدل‌ها مطالعاتی به انجام رسیده است که به تعدادی از آنها اشاره می‌شود.

آزاد و همکارانش جریان روزانه رودخانه اهرچای را با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی پیش‌بینی کرده و سپس آن را با سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی مقایسه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد روش سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی با دقت بیشتری جریان روزانه رودخانه اهرچای را نسبت به مدل شبکه عصبی



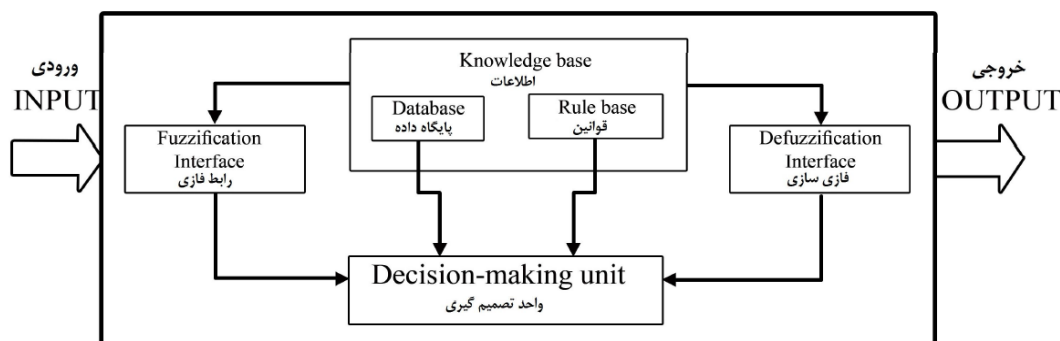
شکل ۱. منطقه مطالعه شده

تقریب‌ساز (توابع حقیقی پیوسته) و با هر مقدار دلخواه درجه دقت در سطح جهانی استفاده شد. این سیستم از نظر عملکرد مشابه سیستم‌های استنتاج فازی است [۱۶]. سامانه استنتاج عصبی - فازی تطبیقی به کار گرفته شده در تحقیق حاضر، معادل مدل فازی از مرتبه سوگونو است [۱۷]. روند سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی دارای مراحل زیر است (شکل ۲):

۱. فازی‌سازی: در این مرحله داده‌ها برای ورود به مرحله بعد فازی‌سازی می‌شوند.
۲. استنتاج: تمام قوانین تصمیم‌گیری روی داده‌های فازی شده اعمال شده و با قوانین «اگر و آن‌گاه» درستی آنها بررسی و تعیین می‌شود.
۳. فازی‌زدایی: نتایج فازی به دست آمده از مرحله قبل را با استفاده از روش‌های مختلفی همچون مرکز جرم و غیره به مقدار اولیه برمی‌گرداند.

### ساختار سیستم ANFIS

نروفازی نوعی سیستم هیبریدی است که از توانایی تصمیم‌گیری منطق فازی با قابلیت حساس‌گری شبکه عصبی ترکیب شده است و سطح پیچیده و زیادی را برای مدل کردن و تخمین پیشنهاد می‌کند. اساساً قسمت فازی مربوط به گروه‌بندی داده‌های ورودی به مجموعه‌هایی که با درجه عضویت مشخص می‌شوند که هر عددی بین صفر و یک می‌تواند باشد و تصمیم‌گیری برای فعالیت بعدی براساس یک سری قوانین و حرکت به مرحله بعدی است. سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) شامل بخش‌هایی از سیستم فازی معمولی خبره می‌شود که محاسبه در هر مرحله به وسیله لایه‌های پنهان نرون و توانایی یادگیری شبکه عصبی ایجاد شده است تا اطلاعات سیستم را افزایش دهد [۱۰]. ANFIS ابتدا توسط جانگ معرفی شد [۱۶] و از آن پس به عنوان یکی از ابزارهای



شکل ۲. معماری سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS)

ها از حاصل ضرب اعداد تصادفی در بازه صفر و یک در اعدادی در محدوده واقعی پارامترها به وجود آیند. تولید مقادیر تصادفی پارامترها به شکل یادشده، به این دلیل اهمیت می‌یابد که محدوده مقادیر پارامترهای مدل نسبت به یکدیگر کاملاً متفاوت است و انتخاب یک سری پارامتر به صورت تصادفی که در محدوده قابل قبول نباشند، می‌تواند به توقف مدل و موفق نشدن در دست‌یابی به همگرایی منجر شود. بنابراین، می‌توان گفت هر چند انتخاب مقادیر اولیه particle ها به صورت تصادفی صورت می‌پذیرد، این انتخاب باید به گونه‌ای باشد که پارامترها در محدوده قابل قبول قرار گیرند. مقادیر پارامترهای ساخته شده در تکرار اول، به صورت جداگانه به مدل معرفی می‌شوند. این کار با نوشتن مقادیر یادشده در یکی از فایل‌های ورودی مدل که

### روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)

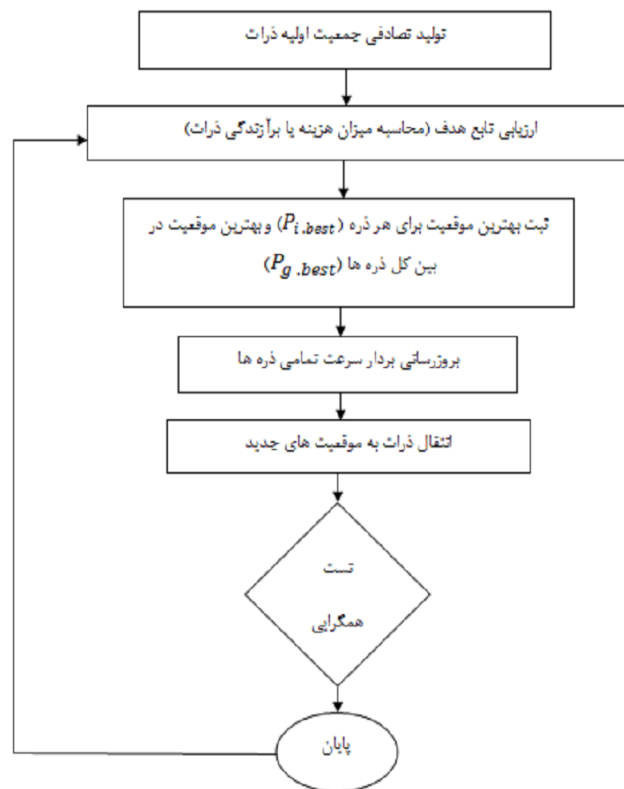
بهینه‌سازی سیستم عصبی - فازی ANFIS با استفاده از الگوریتم PSO در سال ۱۹۹۵ برای نخستین بار به عنوان نوعی روش جست‌وجوی غیر مقطعی برای بهینه‌سازی تابعی مطرح شد. این الگوریتم از روی رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. توسعه برنامه کامپیوتری بر مبنای الگوریتم PSO در مراحل زیر صورت می‌پذیرد: ابتدا باید با استفاده از یک توزیع یکنواخت کاملاً تصادفی مقادیر اولیه بردارهای وضعیت و سرعت particle ها تعیین شود. باید در نظر داشت که مقادیر تصادفی ابتدا توسط کامپیوتر ارائه می‌شود و در بازه صفر و یک تعریف شده‌اند. لازم است برای منطبق شدن این اعداد با مقادیر واقعی پارامترهای مدل ANFIS بردار موقعیت particle ها، در مرحله اول particle

پس از آن، در تکرار دوم دقیقاً مانند تکرار اول، مقادیر تابع هدف برای هر particle ساخته می‌شود و با مقایسه این مقادیر با مقادیر به‌دست‌آمده در تکرار اول pbest برای هر particle تعیین می‌شود. به این صورت که اگر وضعیت ملاقات‌شده توسط particle در مرحله جدید نسبت به وضعیت ملاقات‌شده در مرحله قبل بهتر بود، pbest برای آن particle، هم بهترین وضعیت ملاقات‌شده (بهترین ضریب کارایی به‌دست‌آمده) برای کلیه particle ها به عنوان gbest این مرحله لحاظ می‌شود. به این ترتیب، مقادیر gbest و pbest در هر مرحله از روی مقادیر مربوط به مرحله قبل ساخته می‌شود و مقادیر بردارهای وضعیت و سرعت در هر مرحله با توجه به وضعیت particle ها در مرحله قبل به‌روز می‌شود. در نهایت، با اتمام آخرین مرحله تکرار، gbest مرحله آخر به عنوان بهترین وضعیت و مقدار ضریب کارایی متناظر با آن به عنوان جواب معرفی می‌شود.

$$v_{id}^{n+1} = \lambda \cdot v_{id}^n + w \cdot v_{id}^n + \nu_1^n (p_{id}^n - x_{id}^n) + cc_r (p_{gd}^n - x_{id}^n) r_r^n \quad (1)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (2)$$

دربرگیرنده پارامترهای آن است، صورت می‌پذیرد. باید در نظر داشت که در هر مرحله زمانی، n عدد particle بررسی می‌شود. بنابراین، باید مدل ANFIS، n بار در هر گام زمانی اجرا شود. با هر بار اجرای مدل، یک سری زمانی تبخیر و تعرق شبیه‌سازی‌شده به عنوان خروجی معرفی می‌شود. مقادیر محاسبه‌شده برای تبخیر و تعرق شبیه‌سازی، نظیر به نظیر با تبخیر و تعرق مشاهداتی که مقادیر آن ثابت است، مقایسه می‌شود. به این ترتیب بعد از گام زمانی اول، مدل n بار اجرا می‌شود. این امر بیان می‌کند که در گام زمانی اول به ازای هر particle یک مقدار برای تابع هدف به دست می‌آید. در تکرار اول pbest برای هر particle همان وضعیت فعلی particle لحاظ می‌شود و gbest که بهترین موقعیت ملاقات‌شده particle در مجموعه swarm است، با مقایسه تابع مقادیر هدف مربوط به هر particle و انتخاب بیشترین مقدار، تعیین می‌شود. در تکرار دوم با استفاده از مقادیر pbest و gbest و مقادیر وضعیت و سرعت particle های مرحله قبل (تکرار اول) و براساس رابطه ۱ سرعت مرحله جدید برای particle ها محاسبه می‌شود. سپس، طبق رابطه ۲ وضعیت جدید particle ها تعیین می‌شود.



شکل ۳. فلوجارت الگوریتم PSO

## روش تجربی تورک

به دلیل نبود داده های لایسیمتری از روش تجربی تورک برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، به منظور استفاده در سیستم استنتاج عصبی - فازی و همچنین مقایسه این روش با روش تجربی تورک استفاده شد. تورک معادله ۳ را برای تبخیر و تعرق مرجع ارائه کرد:

$$ET_o = aT \times 0.13 \frac{Tmean}{Tmean + 15} \cdot \frac{23.8856 \times Rs + 50}{\lambda} \quad (3)$$

که در آن:

ETo: تبخیر و تعرق روزانه (mm. d - 1)

Tmean: دمای متوسط روزانه برحسب درجه

سانتی گراد

aT = 1 + (50 - RHmean > 50% برای ۱ برابر

50% RHmean < برای 70)

Rs: تشعشع خورشیدی ( $MJ.M^{-2}.d^{-1}$ )

$\lambda$ : گرمای نهان تبخیر ( $MJ.Kg^{-1}$ )

برای محاسبه تبخیر از روش تورک به علت نبود داده های تابش خورشیدی با استفاده از پارامتر ساعت آفتابی از رابطه ۴ استفاده شد.

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = a + b \left( \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (4)$$

در رابطه یادشده H بیان کننده میانگین تابش کل روزانه و  $H_0$  نشان دهنده تابش اندازه گیری شده در خارج از جو است. a، b ضرایب آنگستروم هستند.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (6)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \epsilon_i^2 \quad (7)$$

## نتایج

فرایند غیر خطی تبخیر روزانه از تشتت به عنوان یکی از عناصر مهم چرخه هیدرولوژی می تواند کارکرد بسیار

زیادی در توسعه پایدار و مدیریت بهینه منابع آب منطقه پلدختر داشته باشد. بنابراین، در تحقیق حاضر کارایی دو مدل ANFIS-PSO و مدل تجربی تورک در شبیه سازی پارامتر غیرخطی تبخیر روزانه از تشتت در ایستگاه سینوپتیک پلدختر در شرایط اقلیمی استان لرستان ارزیابی شد. برای تعیین پارامترهای ورودی مؤثر بر عملکرد شبکه عصبی - فازی، از گزینه الگوریتم PSO استفاده شد.

به منظور مدل کردن تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی، کدنویسی در محیط نرم افزار جامع MATLAB صورت گرفت. در تحقیق حاضر نیز از سیستم استنتاج تطبیقی عصبی - فازی (ANFIS) با الگوریتم PSO استفاده شد. داده های آماری ایستگاه پلدختر شامل ۱۵ سال (۲۰۰۲-۲۰۱۶) داده روزانه بود. پس از صحت سنجی داده ها به سه دسته آموزش (نه سال)، برازش متقابل (سه سال) و آزمایش (سه سال) تقسیم شدند. دسته اول آموزش شبکه را به عهده دارد، با استفاده از داده های برازش متقابل، شبکه نسبت به توقف آموزش تصمیم می گیرد و دسته سوم برای پیش بینی و ارزیابی شبکه استفاده می شود. پارامتر ورودی به ساختار ANFIS شامل دمای میانگین، رطوبت میانگین، گرمای نهان تبخیر و رطوبت نسبی است.

تعداد ۱۱۰۰ الگو برای آموزش مدل ANFIS استفاده شده و از الگوهای باقی مانده به منظور ارزیابی مدل های ایجاد شده با معیارهای مختلف آماری سنجش خطا بهره گرفته شد. در ANFIS قوانین ثابت هستند و آنچه بهینه سازی می شود، شکل تابع عضویت است و ساختار مناسب ANFIS متناسب با داده های ورودی، نوع تابع عضویت، ورودی، خروجی، قوانین و تعداد تابع عضویت انتخاب می شود. در تحقیق حاضر با انتخاب چهار پارامتر دمای میانگین، رطوبت میانگین، گرمای نهان تبخیر و رطوبت نسبی به عنوان پارامترهای ورودی در مدل ANFIS از روش تفکیک شبکه ای موجود در نرم افزار MATLAB استفاده شد که در آن نوع توابع عضویت برای ورودی ها و خروجی ها به روش سعی و خطا توسط کاربر تعیین می شود. بنابراین، توابع عضویت ورودی: گوسی، مثلثی، ذوزنقه ای، زنگوله ای، حلقوی و توابع تفاضل و حاصل ضرب توابع حلقوی و در خروجی توابع عضویت ثابت و خطی آزمایش شدند. همچنین، تعداد توابع عضویت هم از ۲ تا ۵ با روش آزمون و خطا بررسی شد.

به منظور مقایسه بهتر نتایج، نمودار پراکنش مقادیر محاسبه‌شده توسط روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و روش تجربی تورک در برابر مقادیر اندازه‌گیری‌شده تبخیر از تشت در شکل‌های ۴-۹ رسم شده است. شکل ۴ نمودار پراکنش مقادیر تبخیر-تعرق برآوردشده روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و مقادیر مشاهده‌ای تشت را در مرحله آزمون نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، برازش مناسبی ( $R^2 = 0.90$ ) بین مقادیر مشاهداتی و برآوردشده به دست آمده است. شکل ۵ نمودار پراکنش مقادیر تبخیر-تعرق برآوردشده روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و مقادیر مشاهده‌ای تشت را در مرحله آزمایش نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برازش مناسبی ( $R^2 = 0.82$ ) بین مقادیر مشاهداتی و برآوردشده به دست آمده است. شکل ۶ نمودار پراکنش مقادیر تبخیر-تعرق برآوردشده روش تجربی تورک و مقادیر مشاهده‌ای تشت را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برازش ( $R^2 = 0.63$ ) بین مقادیر مشاهداتی و برآوردشده به دست آمده است که نشان‌دهنده دقت کم این روش نسبت به روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) است.

شکل ۷ مقایسه مدل تجربی تورک با داده‌های مشاهداتی تشت تبخیر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل یادشده مشاهده می‌شود، انطباق خوبی بین مدل تجربی تورک با داده‌های مشاهداتی تشت تبخیر برقرار نیست و نشان‌دهنده ضعف این مدل نسبت به سیستم‌های هوش مصنوعی مانند ANN و ANFIS است. شکل‌های ۸ و ۹ مقایسه تبخیر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل ANFIS و تشت تبخیر در دو مرحله آموزش و آزمون را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق مناسب بین داده‌های تشت تبخیر و مدل ANFIS است که دقت مدل ANFIS را نسبت به مدل تجربی تورک تأیید می‌کند.

با بهره‌گیری از معیارهای آماری  $R^2$  و RMSE بهترین مدل منتخب با تابع عضویت گوسی، تعداد توابع عضویت ۳-۳ و تابع عضویت خروجی ثابت انتخاب شد. برای ارزیابی مدل نیز از سه پارامتر ریشه میانگین مجذور خطا RMSE، میانگین مربعات خطای MSE و ضریب تعیین  $R^2$  استفاده شد.

در واقع، شبکه نرو فازی برگرفته از شبکه عصبی ولی پیشرفته‌تر از آن عمل می‌کند و یک پیش‌بینی بهینه‌شده را با توجه به نوعی منطق فازی (در اینجا از منطق فازی ساگینو استفاده شده)، به دست می‌دهد. شبکه عصبی-فازی استفاده‌شده با سه عدد تابع عضویت نوع گوسی نیز در مقابل سایر تعداد توابع عضویت و دیگر انواع آن مانند مثلی، دوزنقه‌ای و... برتری محسوس از نظر معیارهای ارزیابی همچون RMSE، MSE و  $R^2$  دارد (جدول ۱). پارامترهای ورودی به مدل ANFIS شامل گرمای نهان تبخیر، تابش روزانه، دمای حداقل، متوسط رطوبت نسبی می‌شود. آنچه از جدول ۱ استنباط می‌شود، توانایی زیاد مدل ANFIS با الگوریتم PSO در محاسبه تبخیر روزانه از سطح آزاد است، به طوری که روند خوبی در آموزش داده‌ها داشته و در مرحله پیش‌بینی به خوبی داده‌ها را پیش‌بینی کرده است.

نتایج آماری مربوط به روش تجربی تورک نیز در جدول ۲ آورده شده است. پارامترهای مدل تجربی تورک شامل گرمای نهان تبخیر، تابش روزانه، دمای حداقل، متوسط رطوبت نسبی می‌شود. همان‌طور که در جدول‌های ۱ و ۲ مشخص است، دقت مدل ANFIS نسبت به روش تجربی تورک بیشتر است، به طوری که مقدار  $R^2$ ، RMSE، MSE به ترتیب برای مدل ANFIS ۰/۹۰، ۲/۶۵، ۷/۱۳ و برای مدل تجربی تورک به ترتیب ۰/۶۳، ۶/۲۶، ۳۹/۲۴ است. روش ANFIS به دلیل بزرگ بودن ضریب تعیین ( $R^2$ )، و کم بودن مقادیر (MSE، RMSE) در بین دو روش یادشده نتایج بهتری ارائه داد.

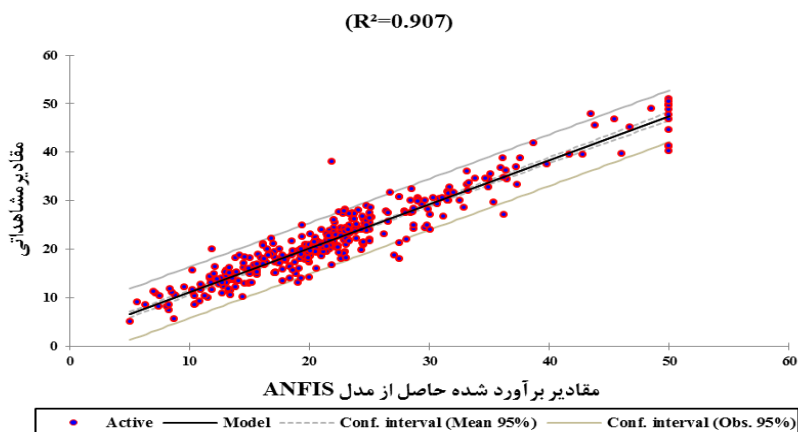
جدول ۱. نتایج به دست آمده از مقایسه کارایی سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی و تشت تبخیر

نام روش	پارامترهای ورودی		$R^2$		MSE		RMSE	
	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون	آموزش	آزمون
ANFIS	۰/۹۰۷	۰/۸۲۰	۲/۶۷۱	۳/۷۴۰	۷/۱۳۵	۱۳/۹۸۸		

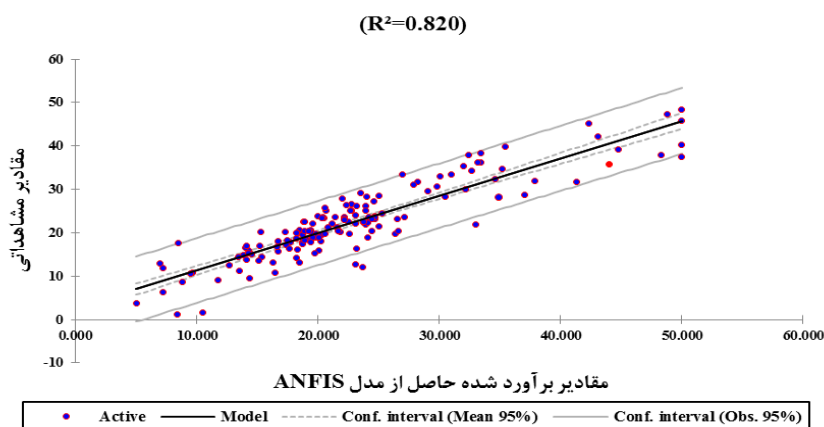
گرمای نهان تبخیر، تابش روزانه،  
 $RH_{mean}$ ،  $T_{mean}$  تبخیر مشاهداتی،

جدول ۲. نتایج به دست آمده از مقایسه کارایی مدل تجربی تورک و تست تبخیر

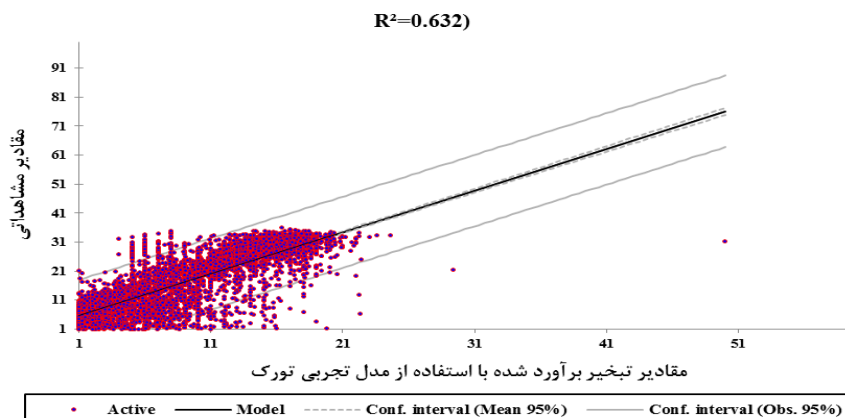
MSE	RMSE	R <sup>2</sup>	پارامتر ورودی	نام روش
۳۹/۲۴۶	۶/۲۶۵	۰/۶۳۲	R <sub>S</sub> , T <sub>mean</sub> , RH <sub>mean</sub> , گرمای نهان تبخیر	مدل تجربی تورک



شکل ۴. مقایسه تبخیر برآورد شده و تبخیر مشاهداتی با استفاده از مدل ANFIS در مرحله TRAIN

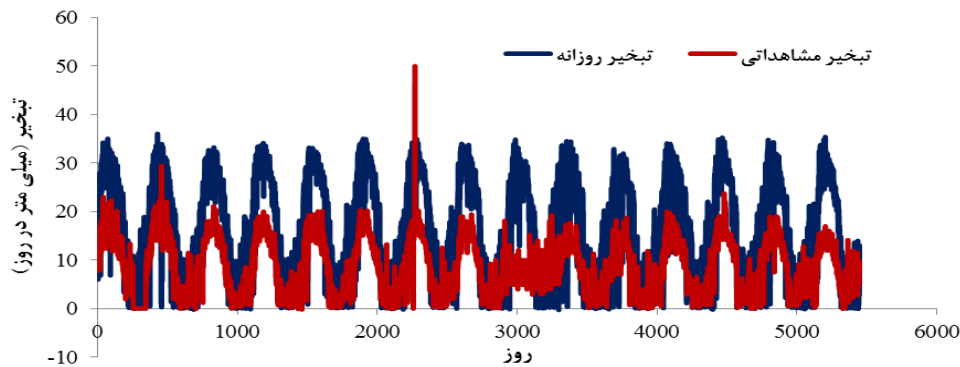


شکل ۵. مقایسه تبخیر برآورد شده و تبخیر مشاهداتی با استفاده از مدل ANFIS در مرحله TEST



شکل ۶. مقایسه تبخیر برآورد شده و تبخیر مشاهداتی با استفاده از مدل تجربی تورک

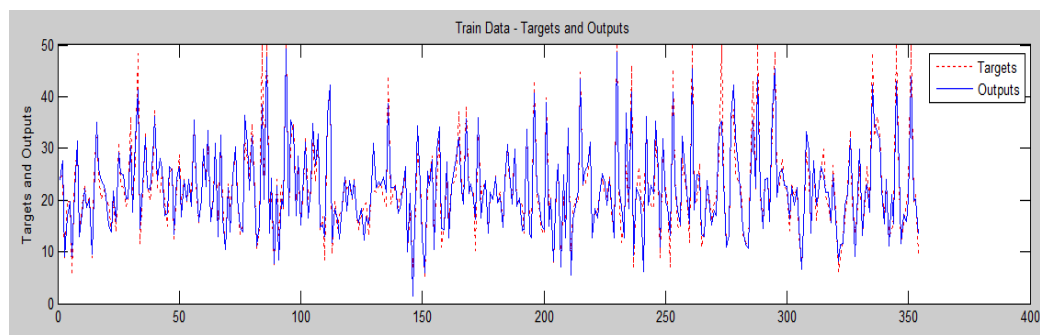




شکل ۷. مقایسه مدل تجربی تورک با داده‌های مشاهداتی



شکل ۸. مقایسه تبخیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ANFIS و تست تبخیر در مرحله TEST



شکل ۹. مقایسه تبخیر شبیه‌سازی شده با استفاده از مدل ANFIS و تست تبخیر در مرحله TRAIN

بر چالش‌های موجود در شبکه‌های عصبی باشد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات می‌تواند صحت پاسخ شبکه را افزایش دهد و از زمان آموزش بکاهد. به طور کلی، نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌ها نشان‌دهنده قدرت و توانایی سیستم استنتاج عصبی-فازی در مدل کردن پدیده تبخیر و تعرق، و دقت بیشتر این روش نسبت به مدل تجربی تورک است. کار تحقیقی مشابهی برای ضریب تست صورت نگرفته است، بنابراین امکان مقایسه مستقیم نتایج به‌دست‌آمده برای دو روش ANFIS و تورک با نتایج سایر محققان میسر نیست، اما تحقیقات مختلفی در

### نتیجه‌گیری

هدف از انجام پژوهش حاضر، شناسایی بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه در اقلیم خشک (مطالعه موردی: پلدختر) است. نتایج به‌دست‌آمده از مقایسه روش تجربی تورک و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) نشان‌دهنده برتری مدل ANFIS با متوسط  $R^2$  و RMSE نسبت به روش تجربی تورک است. در مطالعه حاضر مدل ANFIS نشان داد ابزار مناسبی برای انطباق، یادگیری و دسته‌بندی اطلاعات است و ترکیب این مدل با استفاده از ایده جدید هوش جمعی (PSO) می‌تواند راه‌کاری برای غلبه

- [11]. Shayannejad masumeh najafi; VAM. An Evaluation of Accuracy of Intelligent Methods and Sensitivity Analysis of Reference Crop Evapotranspiration to Meteorological Parameters in Two Different Climates. *Ecohydrology*. 2014;1(1):17-24.
- [12]. M Nekoamal Kermani RMN. Determination of the Best Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Model for Estimating Grass Reference Crop Evapotranspiration in Coastal Semi-arid Climate of Hormozgan. *Water Soil Sci*. 2016;26(2):239-58.
- [13]. Azad MRAP, Sattari and MT. Forecasting daily river flow of Ahar Chay River using Artificial Neural Networks (ANN) and comparison with Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). *J Water Soil Conserv*. 2015;22(1):287-98.
- [14]. Kobold M, Suselj K, Polajnar J, Pogacnik N. Calibration techniques used for HBV hydrological model in Savinja catchment. In: XXIVth Conference of the Danubian Countries on the Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Managemet. 2008. p. 2-4.
- [15]. Kamali Bahareh SJM. HEC-HMS Conceptual Automated Calibration - Simulation and Optimization Approach. In: 5th National Congress on Civil Engineering [Internet]. 2010. Available from: <https://www.tpb.in.com/article/27170>
- [16]. Jang J.S.R., Sun C.T. and ME. Neuro-fuzzy and Software Computing: a Computational Approach to Learning and Machine Intelligence. In: Prentice-Hall, New Jersey. 1997.
- [17]. Drake JT. Communications phase synchronization using the adaptive network fuzzy inference system (anfis). New Mexico State University; 2000.
- [18]. Sattari MT, Farnaz Nahrein VA. M5 Model Trees and Neural Networks Based Prediction of Daily ET<sub>0</sub>(Case Study: Bonab Station). *Iran J Irrigation Drain*. 2013;7(1):104-13.
- [19]. Hozhabr H, Moazed H, ShokriKhoochak S. Estimation of Reference Evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) Using Empirical Models, Artificial Neural Network Modeling and Their Comparison with Lysimeter Data in Urmia Kahrizi Station. *Irrig Water Eng*. 2014;4(3):13-25.

زمینه مقایسه روش سیستم استنتاج تطبیقی عصبی-فازی (ANFIS) و سایر روش های تجربی وجود دارد که می توان به پژوهش های ستاری و همکاران [۱۸] و هژبر و همکاران [۱۹] اشاره کرد که نتایج تحقیق حاضر را تأیید می کند.

#### منابع

- [1]. Karamuz M, Araghi Nezhad S. *Advanced Hydrology*. Tehran: Amirkabir university of technology; 2014. 468 p.
- [2]. Hossein Mirzaei HM. Comparison of Different Estimates of Evapotranspiration Potential. In: First National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. 2006.
- [3]. Sarmad MM-B-ME-M. Estimation of Reference crop Evapotranspiration Using the Least Meteorological Data. *J Water Soil*. 2009;23(1):91-9.
- [4]. Mohammadi KAGG-SMM-K. Comparison of Artificial Intelligence Systems (ANN & ANFIS) for Reference Evapotranspiration Estimation in the Extreme Arid Regions of Iran. *J Water Soil*. 2010;24(4):679-89.
- [5]. Shiri J, Kılıcı Ö, Landeras G, López JJ, Nazemi AH, Stuyt LCPM. Daily reference evapotranspiration modeling by using genetic programming approach in the Basque Country (Northern Spain). *J Hydrol*. 2012;414:302-16.
- [6]. Terzi Ö. Daily pan evaporation estimation using gene expression programming and adaptive neural-based fuzzy inference system. *Neural Comput Appl*. 2013;23(3-4):1035-44.
- [7]. Kumar P, Kumar D, Jaipaul J, Tiwari AK. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive Neuro-Fuzzy inference system techniques. *Pakistan J Meteorol*. 2012;8(16).
- [8]. Mohamadrezapour O. Monthly Forecast of Potential Evapotranspiration Models Using Support Vector Machine (SVM), Genetic programming and Neural- Fuzzy Inference System. *Irrig Water Eng*. 2017;7(3):135-50.
- [9]. Haghghatjou P, Shahroudi ZMZA. Comparison of gene expression programming (GEP) and neuro-fuzzy methods for estimation of pan evaporation (case study: south Khorasan province). *Water Soil Resour Conserv*. 2017;6(4):107-17.
- [10]. Citakoglu H, Cobaner M, Haktanir T, Kisi O. Estimation of monthly mean reference evapotranspiration in Turkey. *Water Resour Manag*. 2014;28(1):99-113.