

مقاله علمی-پژوهشی

برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از ANN و ANFIS در اقلیم نیمه خشک و خشک

محدثه بیدآبادی^۱، حسین بابازاده^{۲*}، جلال شیری^۳، علی صارمی^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۰۲

چکیده

برآورد میزان تبخیر و تعرق (ET_0) که یکی از مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژی و هم‌چنین پارامتری مؤثر در برنامه‌ریزی آبیاری است، از اهمیت بالایی برخوردار است اما بیش‌تر اوقات محدودیت و یا کمبود داده‌های هواشناسی مانع می‌شود تا بتوان از روش پیشنهادی فائو پنمن ماتیت برای برآورد ET_0 استفاده کرد. در مطالعه حاضر به بررسی قابلیت شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) در بهبود تخمین میزان ET_0 در شرایط کمبود داده پرداخته شده است. داده‌های اقلیمی در این مطالعه شامل ساعت تابش، سرعت باد، دمای هوای کمینه، بیشینه و متوسط می‌باشد که در پهنای اقلیمی خشک و نیمه‌خشک از ۱۲ ایستگاه سینوپتیک اخذ گردیده و به‌عنوان ورودی‌های مدل بر اساس معادله FAO56-PM در سه حالت مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از ارزیابی مدل‌ها نشان داد که روش‌های هوش مصنوعی نتایج بهتری را نسبت به روش‌های تجربی ارائه می‌دهند هم‌چنین هر دو مدل ANN و ANFIS با داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد بهترین نتایج را ارائه می‌دهند و پس از آن به ترتیب ورودی‌های دمای کمینه و بیشینه و ورودی‌های دمای متوسط و ساعت تابش قرار می‌گیرند و بین دو مدل ANN و ANFIS، مدل ANFIS نتایج بهتری را نشان داد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم نیمه‌خشک و خشک، ایستگاه سینوپتیک کرمان، تبخیر و تعرق، سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی، شبکه عصبی مصنوعی

مقدمه

مبتنی بر هوش مصنوعی که از داده‌های ورودی کمتری بهره می‌می‌برند می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی مفید و مؤثر در حل این مشکل باشد (کریمی و همکاران، ۱۳۹۲).

در پژوهش معروف پور و همکاران (۱۳۹۶) چهار نوع مدل ANN، ANFIS-GP، ANFIS-SC و GEP جهت معرفی مدلی بهینه برای برآورد تبخیر-تعرق متوسط مرجع ماهانه در غرب و شمال غرب ایران مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که مدل‌های مذکور توانایی این پیش‌بینی را با دقتی قابل قبول دارند و می‌توانند با روش‌های مبتنی بر دما و روش‌هایی که از داده‌های هواشناسی محدود استفاده می‌کنند، از لحاظ دقت رقابت نموده و جایگزینی مناسب برای این روش‌ها باشند.

احمدزاده قره‌گویز و همکاران (۱۳۸۹) از روش‌های عصبی-فازی و نیز شبکه‌های عصبی برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع بهره بردند. ذرتی پور و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک شیراز، به مقایسه چند روش هوش مصنوعی پرداختند و مدل‌های ANN و ANFIS را در شبیه‌سازی، برخوردار از دقت بالا ارزیابی کردند. شیری و همکاران در پژوهش خود با مقایسه روش‌های عصبی-فازی و شبکه‌های عصبی در تخمین میزان تبخیر ایستگاه‌های هواشناسی مختلف در ایالات متحده،

کشور ایران دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که ریزش‌های کم جوی، رگبارهای شدید، وقوع جریان‌های سیلابی و تبخیر و تعرق (ET_0) زیاد از ویژگی‌های آن به‌شمار می‌آید. ET_0 در برنامه‌ریزی‌های آبیاری اهمیت فراوانی دارد و روش‌های متعددی برای برآورد این پارامتر پیشنهاد شده است. روش فائو پنمن-ماتیت (FAO56-PM) به‌عنوان یک روش استاندارد برای تعیین تبخیر-تعرق گیاه مرجع می‌باشد اما نیاز به پارامترهای متعددی برای برآورد دارد. در کشورهای در حال توسعه (نظیر ایران) که امکانات پیشرفته سنجش پارامترهای هواشناسی محدود است استفاده از مدل‌های

^۱ دانشجوی دکترا گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ استاد گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۳ دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

^۴ استادیار گروه علوم و مهندسی آب، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

(* نویسنده مسئول: Email: h_babazadeh@hotmail.com)

روش‌های برآورد استفاده شود.

بالمات و همکاران با پژوهش بر روی داده‌های گلخانه روش ANFIS را با توجه به اینکه به داده‌های کمتری نسبت به روش‌های تجربی برای محاسبه ET_0 نیاز دارد، پیشنهاد دادند. هدف از پژوهش حاضر بررسی قابلیت شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) در بهبود تخمین میزان تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع (ET_0) در اقلیم نیمه‌خشک و خشک ایران در شرایط کمبود داده است.

مواد و روش‌ها

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

شبکه عصبی مصنوعی (ARTIFICIAL NEURAL NETWORK) مدلی ریاضی است که توانایی مدل‌سازی و ایجاد روابط غیرخطی برای درون‌یابی را دارا می‌باشد. (Shiri et al., 2011). در اغلب مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی، از مدل ریاضی سلول عصبی که نرون یا پرسپترون نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد. نرون کوچک‌ترین واحد سازنده شبکه عصبی است. هر شبکه از یک لایه ورودی، یک لایه خروجی و یک یا چند لایه میانی (پنهان) تشکیل شده است. در داخل هر یک از لایه‌های یادشده، تعدادی نرون قرار دارند که با اتصالات وزن داده‌شده به هم مربوط می‌شوند. طی فرآیند آموزش شبکه، این وزن‌ها به‌طور پیاپی تغییر می‌کنند تا خطا به کمترین مقدار خود برسد (فقیه ۱۳۹۴).

در این پژوهش تعداد نرون‌های لایه ورودی برابر تعداد متغیرهای مستقل پارامترهای هواشناسی می‌باشد. هر یک از نرون‌های لایه ورودی در وزنی ضرب می‌شوند. هر نرون از دو بخش تشکیل شده است. در بخش نخست، مجموعه وزنی مقادیر ورودی محاسبه می‌شود و در بخش دوم خروجی بخش نخست در یک تابع ریاضی قرار گرفته و خروجی نرون را محاسبه می‌نماید.

الگوی ورودی به یک گره شبیه یک سلول زیستی است که می‌توان آن را با برداری با M مؤلفه به صورت $X=(X_1, X_2, \dots, X_m)$ نشان داد. مجموع حاصل ضرب ورودی‌ها در وزن‌های نظیرشان را می‌توان با کمیت اسکالر S نشان داد.

$$S = \sum_{m=1}^M W_m X_m = W^T X \quad (1)$$

که در رابطه بالا، $W=(W_1, W_2, \dots, W_m)$ بردار وزن نرون‌هاست. کمیت S سپس وارد یک تابع غیرخطی F می‌شود تا خروجی را نتیجه دهد.

آموزش شبکه‌های عصبی به دو طریق آموزش می‌گیرد، آموزش تحت نظارت که در آن خروجی مشخصی به هر ورودی اختصاص داده می‌شود و آموزش بدون نظارت که خروجی از قبل تعیین شده‌ای ندارد. روند استفاده از مدل شامل سه مرحله آموزش، صحت‌سنجی و تست

به‌دقت نسبی سیستم عصبی-فازی در مقایسه با شبکه‌های عصبی پی‌برند. حقی زاده و همکاران (۱۳۹۸) به مقایسه مدل هیبریدی ANFIS-PSO و مدل تجربی تورک در تخمین تبخیر و تعرق مرجع در پل دختر - لرستان پرداختند و مدل ANFIS-PSO را با دقت بالاتری اعلام کردند. بختیاری و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی خود در برخی از ایستگاه‌های منتخب اقلیم نیمه‌خشک ایران، روش‌های ماشین بردار پشتیبان و شبکه تطبیقی مبتنی بر سیستم استنتاج فازی را در ۹ ترکیب متغیرهای هواشناسی به‌عنوان مدل‌های با بهترین عملکرد گزارش کرده‌اند.

کریمی پور و بنی طالبی (۱۳۹۹) در پژوهش خود به آنالیز حساسیت داده‌های ورودی پرداختند و دما (T) (دمای کمینه، بیشینه و میانگین)، R_a ، R_s ، سرعت باد در ارتفاع دو متری (U_2) و R_n را به‌عنوان پارامترهای اثرگذار معرفی کردند و نشان دادند که ترکیب‌های مختلف این پارامترهای ورودی می‌تواند منجر به برآورد دقیق‌تر ET_0 شود. در این پژوهش، بر اساس نتایج آنالیز حساسیت، شش ترکیب با پارامترهای مذکور انتخاب شده بود و دما در تمامی این ترکیب‌ها به‌عنوان متغیر ورودی به کار برده شد که نشان‌دهنده اهمیت پارامتر دما می‌باشد. دما، از جمله پارامترهای هواشناسی می‌باشد که اندازه‌گیری آن به نسبت راحت‌تر است و حتی در ایستگاه‌هایی که کمبود داده وجود دارد، به دست آوردن آن با احتمال بیشتری مواجه است.

(کریمی و همکاران، ۱۳۹۲) در پژوهش خود، لزوم بررسی روش محاسباتی عصبی - فازی در اقلیم‌های متفاوت را بیان داشته و اظهار داشتند که هرگونه اظهارنظر قطعی در زمینه کاربرد روش محاسباتی عصبی - فازی منوط به انجام تحقیقات وسیع در مقیاس جهانی و در اقلیم‌های مختلف خواهد بود. به همین دلیل، در پژوهش حاضر سعی شده با نگاهی به اقلیم و خشک و نیمه‌خشک ایران، روش‌های ANFIS و ANN، تحت شرایط کمبود داده موردبررسی قرار گیرند.

آلگورتای و آلساما در پژوهش خود به بررسی و پیش‌بینی ET_0 در یک پارک در نزدیکی شهر ملبورن با استفاده از ANN پرداختند، از داده‌های برداشت‌شده از پارک و ایستگاه‌های هواشناسی نزدیک به محل استفاده کردند و برای محاسبه ET_0 از معادله Penman-Montieth استفاده کردند. در آخر اعلام کردند که نتایج آن‌ها نشان می‌دهد تغییرات آب و هوایی باعث افزایش بزرگی تبخیر و تعرق مرجع (ET_0) می‌شود.

گنزالز و همکاران مطالعه‌ای برای تعریف مدلی مناسب برای برآورد ET_0 که با منطقه نیمه‌خشک در جنوب هند سازگار باشد، پرداختند. در این پژوهش بهترین نتایج را با استفاده از روش RITCHIE به دست آوردند اما نتایج حاصل از روش ANFIS را نیز امیدوارکننده اعلام کردند و نتیجه گرفتند که می‌توان به‌عنوان

محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع و نیز برای ارزیابی دیگر روش‌ها پیشنهاد شده است. این معادله به صورت رابطه زیر است (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + g \frac{900}{T_{mean} + 273} W_s(e_a - e_d)}{\Delta + g(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

ET_o تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر بر روز)، Δ شیب تابع فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، R_n تشعشع خالص خورشیدی (مگا ژول بر مترمربع در روز)، G : چگالی شار حرارتی خاک (مگا ژول بر مترمربع در روز)، G ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)، T_{mean} دمای هوای متوسط (درجه سلسیوس)، W_s متوسط سرعت باد در یک شبانه روز در ارتفاع دو متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، e_a فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)، e_d فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال) می‌باشد.

مقادیر تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع برای ایستگاه‌های منتخب توسط روش فائو-پنمن-مونتیت محاسبه و به عنوان خروجی مدل‌ها در نظر گرفته شد.

معیارهای ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی

معیارهای ارزیابی دقت به منظور ارزیابی کارایی هر شبکه و توانایی آن برای پیش‌بینی دقیق از معیارهای جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. هر چقدر (RMSE) و (MAE) به صفر و (R^2) به یک میل کنند بهترین جواب برای مدل ایجاد خواهد شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Vul_i - \bar{Vul}_i|}{n} \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Vul_i - \bar{Vul}_i)^2} \quad (5)$$

در روابط بالا، Vul_i نتایج آسیب‌پذیری مشاهداتی، نتایج آسیب‌پذیری محاسباتی به وسیله مدل هوش مصنوعی، \bar{Vul}_i میانگین مشاهداتی و n تعداد کل مشاهداتی را نشان می‌دهد (قره‌خانی و همکاران، ۱۳۹۶).

تعیین اقلیم و مشخصات منطقه مورد مطالعه

برای مطالعه حاضر، از آمار ماهانه بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در اقلیم نیمه‌خشک و خشک ایران استفاده شد. ایستگاه‌های به‌گونه‌ای انتخاب شدند که با توجه به شاخص یونپ^۱ در داخل اقلیم خشک و نیمه‌خشک موجود باشند (رابطه ۶).

$$R = \frac{P}{ETP} \quad (6)$$

که در رابطه فوق R شاخص خشکی UNEP، P میانگین بارش

می‌باشد. در واقع مجموعه داده‌هایی که به شبکه داده می‌شود به دو دسته کلی، مجموعه آموزشی شامل دو بخش آموزش و صحت‌سنجی و مجموعه تست تقسیم می‌شوند. توانایی آموزش یافتن و هم‌چنین تصحیح خطاهای محلی در حین پردازش موازی اطلاعات ورودی از مهم‌ترین ویژگی‌های شبکه‌های عصبی می‌باشد.

در این پژوهش داده‌های ورودی در شبکه عصبی مصنوعی شامل داده‌های هواشناسی که از ایستگاه هواشناسی به دست آمده‌اند می‌باشد و داده‌های خروجی شامل داده‌های به‌دست‌آمده از روش پنمن مانیتیت می‌باشد. هم‌چنین با استفاده از اطلاعات هواشناسی، به‌طور مستقیم با استفاده از روش استاندارد فائو پنمن مانیتیت تبخیر و تعرق گیاه مرجع محاسبه می‌شود (Allen et al., 1998) و برای بررسی دقت سایر مدل‌ها از این مقادیر شاهد استفاده به عمل خواهد آمد.

سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (ANFIS)

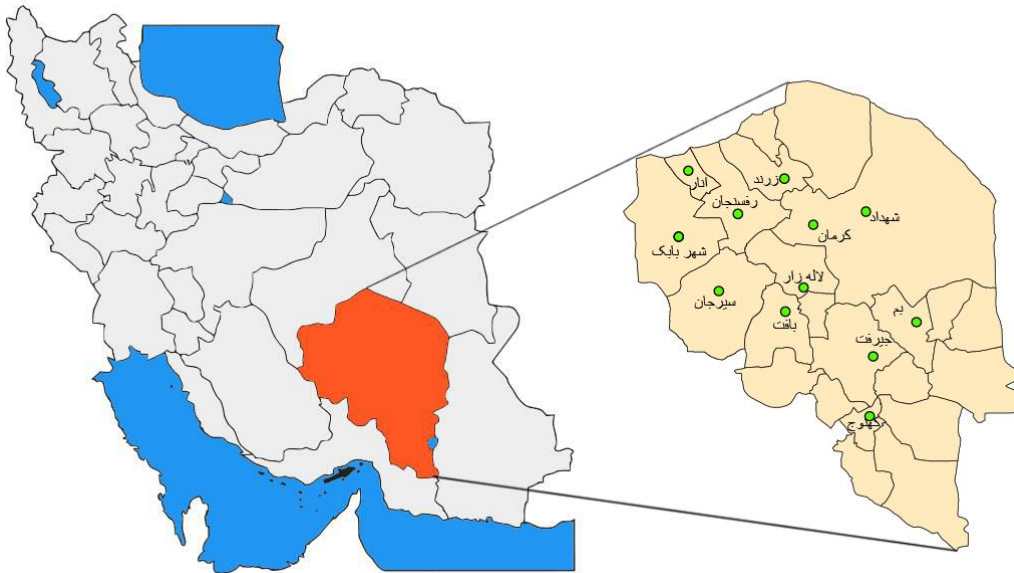
به‌منظور تعیین پارامترهای هواشناسی مؤثر در مقدار تابش خورشیدی، با به‌کارگیری آزمون گاما، اقدام به پیش‌بینی مقدار تابش خورشیدی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج تطبیقی عصبی فازی (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) نمودند. در این مطالعه توانایی شبیه‌سازی تابش خورشیدی از شبکه عصبی مصنوعی بهتر از مدل فازی ارزیابی گردید. (سبزی پرور و بیات و رکشی، ۱۳۸۹) به‌طور کلی ساختار مناسب ANFIS متناسب با داده‌های ورودی، درجه عضویت، قوانین و توابع درجه عضویت خروجی انتخاب می‌گردد. در مرحله آموزش با اصلاح پارامترهای درجه عضویت بر اساس میزان خطای قابل قبول، مقادیر ورودی به مقادیر واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های عصبی-فازی سیستم ANFIS می‌باشد و مهم‌ترین پارامتر قابل تنظیم در ANFIS می‌تواند به شعاع تأثیر اشاره کرد. شعاع تأثیر مشخص‌کننده محدوده نفوذ یک مرکز خوشه در هر یک از ابعاد داده‌هاست (دهقانی و همکاران، ۱۳۹۵).

روش فائو-پنمن-مانیتیت

در بیش‌تر روش‌هایی که برای تعیین میزان تبخیر و تعرق (ET_o) ارائه شده، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع تخمین زده می‌شود و سپس از روی آن تبخیر و تعرق گیاه موردنظر محاسبه می‌شود. روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق با استفاده از داده‌های هواشناسی، به پارامترهای مختلف اقلیمی و فیزیکی نیازمند است. برخی از این داده‌ها، به‌طور مستقیم، در ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شوند. سایر عوامل با داده‌های به‌طور معمول اندازه‌گیری شده، مرتبط هستند و می‌توانند با کمک روابط مستقیم یا تجربی استخراج شوند. معادله فائو-پنمن-مانیتیت به‌منزله روشی استاندارد برای

پهناورترین استان از نظر وسعت است (معدنچی و همکاران، ۱۳۹۸). ایستگاه‌های انار، بافت، بهم، جیرفت، کهوج، کرمان، لاله‌زار، رفسنجان، شهداد، شهر بابک، سیرجان و زرنده به‌عنوان ایستگاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته شد (شکل ۱).

سالانه به میلی‌متر، ETP مقدار میانگین تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه به میلی‌متر می‌باشد (طاووسی و همکاران، ۱۳۹۹). استان کرمان با مساحت ۱۸۲۳۰۱ کیلومترمربع در جنوب شرقی ایران بین ۵۳ درجه و ۲۶ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۲۹ دقیقه طول شرقی و ۲۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۳۲ درجه عرض شمالی قرار دارد که



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

مندرج در فائو-۵۶ استفاده شد.

نتایج و بحث

ابتدا مقادیر ET_0 مربوط به هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی، توسط معادله فائو-پنمن-مانتیت محاسبه شد و در ادامه، مقادیر حاصل از این معادله به‌منظور واسنجی مدل‌های شبکه عصبی (ANN) و عصبی-فازی (ANFIS) مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های آماری بکار گرفته‌شده در این مقاله، میزان انحراف مقادیر ET_0 محاسبه‌شده توسط مدل‌های یادشده و نیز معادلات تجربی را نسبت به مقادیر حاصل از کاربرد معادله فائو-پنمن-مانتیت نشان داده و از این طریق در بررسی دقت هر یک از مدل‌ها بکار بسته می‌شوند. ساختارهای مختلف مدل‌های یادشده مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، بهترین ساختار مدل پس از مراحل متعدد آزمون و خطا تعیین گردید.

تبخیر و تعرق با سه دسته داده ورودی محاسبه شد: دمای کمینه و دمای بیشینه (حالت الف)، دمای متوسط و سرعت باد (حالت ب) و دمای متوسط و ساعات تابش (حالت ج). این روند برای ۱۲ ایستگاه انجام شد که در نتیجه آن، ۳۹ نتیجه توسط هر یک از مدل‌های

داده‌های مورد استفاده عبارت‌اند از: داده‌های موقعیت شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه و داده‌های اقلیمی ماهانه شامل: دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای نقطه شبنم یا رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی. داده‌های این دوازده ایستگاه سینوپتیک از طریق سایت سازمان هواشناسی کشور در بازه زمانی سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۷ اخذ شد.

داده‌های ورودی در شبکه عصبی مصنوعی شامل داده‌های اقلیمی ماهانه (دمای کمینه، دمای بیشینه، دمای نقطه شبنم یا رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت آفتابی) که از ایستگاه هواشناسی به دست آمده‌اند می‌باشد و داده‌های خروجی شامل داده‌های به‌دست‌آمده از روش فائو پنمن مانتیت می‌باشد. ۷۰ درصد از کل داده‌ها هر ایستگاه برای آموزش شبکه و باقی‌مانده داده‌ها نیز جهت تست کردن شبکه استفاده می‌شود.

برآورد داده‌های هواشناسی غیر موجود

صحت سنجی داده‌ها با استفاده از دستورالعمل پیوست ۵۶ مندرج در فائو-۵۶ مورد بررسی قرار گرفت و داده‌های پرت، شناسایی و حذف گردید. برای برآورد داده‌های غیر موجود نیز از دستورالعمل فصل ۵

ANN و ANFIS به تفکیک محاسبه شد. (جدول ۱)

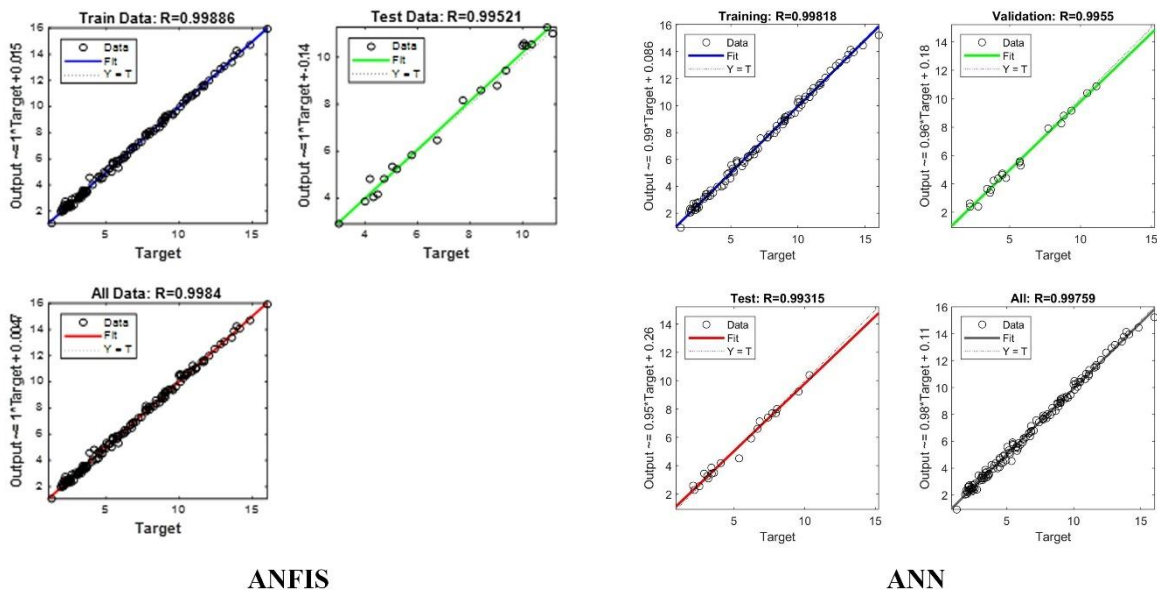
جدول ۱- شاخص‌های آماری مدل‌های ANN و ANFIS در سه حالت الف، ب و ج (واحد MSE: $(mm/month)^2$)

نام ایستگاه	پارامترهای ورودی	ANN		ANFIS	
		MSE	R	MSE	R
انار	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۲۹۶	۰/۶۵۶۰	۰/۹۳۷۲	۰/۵۷۲۶
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۰۱	۰/۱۴۸۹	۰/۹۹۳۹	۰/۰۵۶۳
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۱۶۳	۰/۷۷۱۰	۰/۹۳۰۴	۰/۶۳۱۹
بافت	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۵۶۵	۰/۳۸۴۹	۰/۹۶۶۷	۰/۲۹۰۲
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۸۹۷	۰/۱۲۳۵	۰/۹۹۱۴	۰/۰۷۵۸
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۵۶۳	۰/۴۹۳۵	۰/۹۵۹۵	۰/۳۵۱۵
بم	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۲۴۴	۱/۰۲۱۳	۰/۹۲۸۴	۱/۰۰۲۱
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۴۷	۰/۱۲۲۳	۰/۹۹۵۵	۰/۰۶۴۸
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۲۲۸	۱/۳۹۳۰	۰/۹۲۴۴	۱/۰۵۲۲
جیرفت	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۷۶۸	۰/۲۸۷۵	۰/۹۷۸۷	۰/۲۴۲۹
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۶۵	۰/۰۴۷۰	۰/۹۹۷۵	۰/۰۲۸۵
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۷۵۵	۰/۴۲۰۸	۰/۹۷۶۳	۰/۲۶۹۵
کهنوج	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۳۶۸	۱/۳۰۹۳	۰/۹۴۳۱	۱/۲۸۷۹
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۳۱	۰/۲۱۲۸	۰/۹۹۳۹	۰/۱۴۰۱
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۳۳۵	۱/۴۱۲۵	۰/۹۳۷۷	۱/۴۰۵۲
کرمان	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۷۳۹	۰/۲۵۵۳	۰/۹۷۵۹	۰/۲۴۲۳
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۴۱	۰/۰۶۰۹	۰/۹۹۴۷	۰/۰۵۳۶
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۷۰۱	۰/۴۳۱۲	۰/۹۷۱۷	۰/۲۸۳۵
لاله‌زار	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۶۲۵	۰/۱۶۷۱	۰/۹۶۷۷	۰/۱۴۳۲
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۸۱۳	۰/۰۹۶۱	۰/۹۸۴۶	۰/۰۶۸۵
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۶۸۱	۰/۱۹۷۶	۰/۹۷۸۵	۰/۰۹۵۲
رفسنجان	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۵۷۹	۰/۳۶۸۲	۰/۹۵۲۷	۰/۳۴۷۴
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۱۵	۰/۲۵۹۸	۰/۹۹۲۸	۰/۰۵۱۸
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۴۱۱	۰/۵۱۲۷	۰/۹۶۶۱	۰/۲۶۶۷
شهداد	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۲۸۷	۱/۵۸۷۵	۰/۹۴۵۹	۱/۳۰۴۸
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۷۵	۰/۰۷۱۹	۰/۹۹۸۴	۰/۰۴۰۳
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۳۴۷	۲/۱۴۸۲	۰/۹۵۵۵	۱/۰۷۶۶
شهربابک	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۷۱۴	۰/۳۰۳۹	۰/۹۷۵۰	۰/۲۷۶۴
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۳۱	۰/۰۹۰۸	۰/۹۹۴۲	۰/۰۶۴۶
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۶۱۲	۰/۳۶۵۱	۰/۹۷۴۴	۰/۲۸۲۹
سیرجان	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۶۱۷	۰/۳۴۵۷	۰/۹۶۹۳	۰/۲۹۰۵
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۲۵	۰/۰۷۳۴	۰/۹۹۲۹	۰/۰۶۷۸
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۶۱۷	۰/۴۰۷۱	۰/۹۶۸۸	۰/۲۹۵۱
زرنند	دمای کمینه و بیشینه	۰/۹۳۱۸	۰/۷۲۵۲	۰/۹۵۳۸	۰/۶۰۲۳
	دمای متوسط و سرعت باد	۰/۹۹۵۱	۰/۰۷۴۹	۰/۹۹۷۲	۰/۰۸۳۷
	دمای متوسط و ساعت تابش	۰/۹۲۶۶	۱/۱۵۲۸	۰/۹۴۷۸	۰/۶۶۴۸

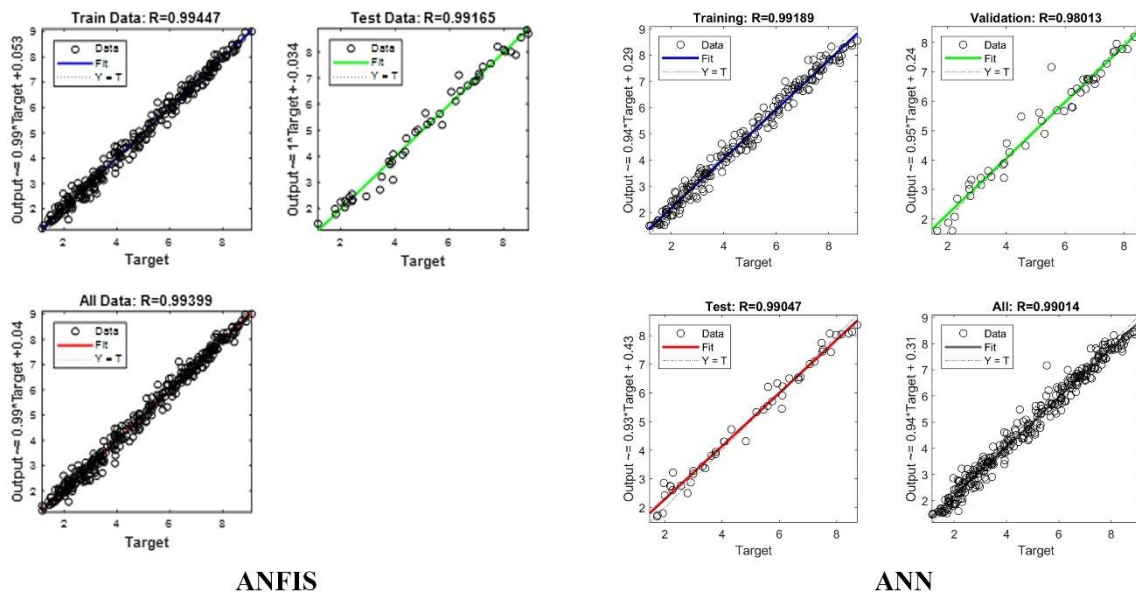
این است که مدل با داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد می‌تواند برای محاسبه تبخیر و تعرق در اقلیم خشک و نیمه‌خشک در شرایطی که با کمبود داده مواجه هستیم قابل‌اتکا باشد. پس از حالت ب، حالت‌هایی که داده‌های ورودی دمای کمینه و بیشینه و حالتی که

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد (حالت ب)، بهترین نتایج را در هر دو مدل نشان دادند. به طوری که در هر ایستگاه، میزان خطای R در حالت ب، به عدد یک نسبت به دو حالت دیگر نزدیک‌تر بود که این نشان‌دهنده

داده‌های ورودی دمای متوسط و ساعت تابش بودند به ترتیب دارای دقت بالاتری بودند.



شکل ۲- نمودار ایستگاه شهداد در حالت ب با دو روش ANFIS و ANN



شکل ۳- نمودار ایستگاه انار در حالت ب با دو روش ANFIS و ANN

بالاتری نسبت به روش ANN است و این نشان‌دهنده آن است که در مدل‌سازی تبخیر و تعرق می‌توان از روش ANFIS نتایج بهتری را کسب کرد. به‌طور مثال در ایستگاه شهداد و در حالتی که داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد بودند، می‌توان مشاهده کرد که علاوه بر این که این حالت از دو حالت دیگر نتایج بهتری دارد در

همچنین با مقایسه نتایج دو روش مدل‌سازی ANFIS و ANN خواهیم دید که خطا R در حالت‌هایی که از روش ANFIS استفاده شده به یک نزدیک‌تر است و مدل دارای دقت بالاتری است به‌طوری که در هر ایستگاه با مقایسه نتایج سه حالت داده‌های ورودی مشاهده می‌شود که نتایج هر حالت در روش ANFIS دارای دقت

تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مناطق بسیار خشک ایران. نشریه آب و خاک. ۲۴(۴): ۶۷۹-۶۸۹.

بختیاری، ب.، محبی دهقانی، ع. و قادری، ک. ۱۳۹۴. برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه با حداقل داده‌های هواشناسی در اقلیم‌های نیمه‌خشک منتخب ایران. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۱(۳): ۱۳۱-۱۴۴.

حقی زاده، ع.، یوسفی، ح.، ابراهیمیان، ط. و یاراحمدی، ی. ۱۳۹۸. مقایسه مدل هیبریدی ANFIS-PSO و مدل تجربی تورک در تخمین تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: پلدختر-لرستان). اکوهیدرولوژی. ۶(۳): ۶۸۵-۶۹۴.

دهقانی، ن.، وفاخواه، م. و بهره‌مند، ع. ۱۳۹۵. مدل‌سازی بارش-رواناب با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی و شبکه فازی-عصبی تطبیقی در حوزه آبخیز کسلیان. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۷(۱۳): ۱۲۸-۱۳۷.

ذرتی پور، ا.، نیسی، ل.، گلابی، م.، بنزاز، ا. و ذرتی پور، ا. ۱۳۹۸. شبیه‌سازی و مقایسه‌ی تبخیر و تعرق پتانسیل به روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، نرو فازی و درخت تصمیم‌گیری M5 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک شیراز). تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۳۶۵-۳۷۱.

سبزی پرور، ع.، و بیات ورکشی، م. ۱۳۸۹. ارزیابی دقت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و عصبی-فازی در شبیه‌سازی تابش کل خورشیدی. مجله پژوهش فیزیک ایران. ۱۰(۴): ۳۴۷-۳۵۷.

طاووسی، ت.، خواجه امیری خالدی، چ. و سالاری قنودی، م. ر. ۱۳۹۹. بازنگری طبقه‌بندی اقلیمی کشور ایران بر پایه متغیرهای اقلیمی. نشریه مدیریت بیابان. ۱۶: ۱۷-۳۶.

فقیه، ه. ۱۳۹۴. ارزیابی شبکه عصبی مصنوعی و مدل‌های فیزیکی تجربی تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع در آب و هوای نیمه‌خشک. نشریه دانش آب و خاک. ۲۵(۲): ۱۳۷-۱۵۲.

قره خانی، م. ندیری، ع. ا. و اصغری مقدم، ا. ۱۳۹۶. استفاده از مدل هوش مصنوعی مرکب نظارت‌شده برای بهبود مدل دراستیک (مطالعه موردی: آبخوان دشت اردبیل). علوم زمین. ۲۶(۱۰۴): ۱۱۳-۱۲۴.

کریمی، س.، شیرینی، ج. و ناظمی، ا. ح. ۱۳۹۲. تخمین تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع با استفاده از سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) و معادله‌های تجربی. نشریه دانش آب و خاک. ۲۳(۲): ۱۳۹-۱۵۸.

کریمی پور، ا. و بنی طالبی، گ. ۱۳۹۹. تحلیل حساسیت داده‌های

روش ANFIS با خطای ۰/۹۹۸۴ نسبت به خطای ANN با مقدار ۰/۹۹۷۵ به عدد یک نزدیک‌تر است و این بدان معنا است که در صورت مدل‌سازی با روش ANFIS و داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد می‌توان بهترین نتایج را در تخمین تبخیر و تعرق در شرایط داده‌های محدود به دست آورد.

هم‌چنین برای نمونه دو ایستگاه شه‌داد و انار که با توجه به جدول در حالتی که داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد بودند به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین خطا بودند که این اعداد در روش ANFIS برابر ۰/۹۹۸۴ و ۰/۹۹۳۹ و در روش ANN برابر ۰/۹۹۷۵ و ۰/۹۹۰۱ بودند که این نشان‌دهنده آن است که خطاها کم هستند. هم‌چنین در هر دو روش مدل‌سازی و در تک‌تک ایستگاه‌ها، این مدل‌ها می‌توانند نتایج مناسبی را ارائه دهند.

روند رگرسیون نتایج ایستگاه شه‌داد و انار که به ترتیب دارای بیش‌ترین و کم‌ترین R در جدول ۱ بودند، به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ در حالت ب، نمایش داده شده است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر توانایی روش محاسباتی شبکه عصبی و عصبی-فازی تطبیقی در تخمین میزان تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط کمبود داده موردبررسی قرار داده شد. نتایج نشان داد که می‌توان به‌طور موفقیت‌آمیزی از این دو روش محاسباتی در تخمین میزان تبخیر و تعرق در اقلیم خشک و نیمه‌خشک به‌جای روش‌های تجربی و سنتی استفاده نمود و نتایج مناسبی به دست آورد.

روش‌های ANFIS و ANN هر دو با داده‌های ورودی دمای متوسط و سرعت باد نسبت به سایر مدل‌ها، در ۱۲ ایستگاه نتایج بهتری را نشان دادند و پس از آن نتایج با داده‌های ورودی دمای کمینه و بیشینه و داده‌های دمای متوسط و ساعت تابش به ترتیب قرار می‌گیرند و در شرایط مشابه نتایجی که از مدل‌سازی با روش ANFIS به دست آمده‌اند قابل‌اتکاتر می‌باشند. با توجه به شرایط کمبود داده و اهمیت برآورد ET_0 در مباحثی مانند برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت زراعی، استفاده از مدل‌های توسعه‌یافته در تخمین میزان تبخیر و تعرق گیاه امری الزامی و اجتناب‌ناپذیر است. هم‌چنین کاربرد و ترکیب روش‌های دیگر مانند تحلیل سری‌های زمانی، کاربرد تحلیل رگرسیونی و ... می‌تواند به بهبود روش‌های دقیق‌تر برای محاسبه این پارامتر مهم در برنامه‌ریزی آبیاری منجر شود.

منابع

احمدزاده قره‌گویز، ک.، میرلطیفی، س. م. و محمدی، ک. ۱۳۸۹. مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) در

- Allen RG., Pereira LS., Raes D. and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration. Guide lines for computing crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56. Rome, Italy.
- Balmat J. F., Lafont F., Moussa Ali A., Pessel N. and Fernandez J., C., R. 2019. Proceedings of the 3rd International Conference on Machine Learning and Soft Computing. Pages 203– 05. <https://doi.org/10.1145/3310986.3310987>
- Gonzalez del Cerro R. T., Subathra M. S. P., Kumar N. M., Verrastro S. and George S. TH. 2021. Modelling the daily reference evapotranspiration in semi-arid region of South India: A case study comparing ANFIS and empirical models. *Information Processing in Agriculture*. 8(1): 173-184.
- Shiri J., Dierickx W., Pour-Ali Baba A., Neamati S. and Ghorbani MA. 2011. Estimating daily pan evaporation from climatic data of the State of Illinois, USA using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) and artificial neural networks (ANN). *Hydrology Research*. 42(6): 491-502.
- هواشناسی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع با حداقل داده‌های هواشناسی با استفاده از مدل‌های موجک-عصبی-فازی، ANN و ANFIS. نشریه حفاظت منابع آب و خاک. ۹(۳): ۴۷-۷۱.
- معدنچی، پ، شاهدی، ک، حبیب نژاد، م، سلیمانی، ک. وفاتحی مرج، ا. ۱۳۹۸. پهنه‌بندی خشک‌سالی‌های اقلیمی و بزرگی خشک‌سالی با استفاده از شاخص SPI و روش زمین‌آمار کریجینگ (مطالعه موردی: استان کرمان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۰(۳۸): ۲۰۵-۲۲۸.
- معروف پور، س، معروف پور، ع. و ثانی خانی، ه. ۱۳۹۶. شبیه‌سازی تخیر-تعرق ماهانه بدون داده‌های اقلیمی با استفاده از محاسبات نرم در غرب و شمال غرب ایران. مجله مهندسی منابع آب. ۱۰(۳۴): ۳۷-۵۰.
- Algetawee H. and Alshama GH. 2021. Modeling of Evapotranspiration (ET_o) in a Medium Urban Park within a Megacity by Using Artificial Neural Network (ANN) Model. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, <https://doi.org/10.3311/PPci.18187>.

Estimation of Reference Crop Evapotranspiration Using ANN and ANFIS in Arid and Semi-Arid Climates

M. Bidabadi¹, H. Babazadeh^{2*}, J. Shiri³, A. Saremi⁴

Received: Aug.20, 2021

Accepted: Sep.24, 2021

Abstract

Estimation of evapotranspiration, which is one of the components of the hydrological cycle and also an effective parameter in irrigation planning, is very important, but often the limitation or lack of meteorological data prevents to use of the proposed method of FAO Penman-Monteith. In the present study, Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (ANFIS) are discussed in Improvement of estimates the ETo data in the absence of data. Climatic data in this study include radiation hours, wind speed, minimum, maximum, and average air temperature, which were used as model inputs based on the FAO56-PM equation in three stances. The data were obtained from 12 synoptic stations in arid and semi-arid climates. The results of evaluating the models showed that artificial intelligence methods provided better results than experimental methods. Also, both ANN and ANFIS models provide the best results with average temperature and wind speed input data, followed by minimum and maximum temperature inputs, medium temperature inputs and irradiation hours, respectively. Between ANN and ANFIS models, the ANFIS model Showed better results.

Key words: Adaptive neuro-fuzzy inference system, Arid and semi-arid climates, Artificial neural network, Evapotranspiration, Kerman synoptic station

¹ Ph.D. Student, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Azad University, Tehran, Iran

² Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Azad University, Tehran, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Science and Research Branch, Azad University, Tehran, Iran

(* - Corresponding Author Email: h_babazadeh@hotmail.com)