

## کاربرد سیستم‌های استنتاج عصبی - فازی تطبیقی و برنامه‌ریزی ژنتیک برای برآورد

## تبخیر تعرق ماهانه در شمال غرب ایران

فرشاد احمدی<sup>۱\*</sup>، سجاد آیشم، کیوان خلیلی و جواد بهمنش

دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب دانشگاه شهید چمران اهواز .

Farshad.paper@yahoo.com

دانشجوی کارشناسی ارشد منابع آب دانشگاه ارومیه.

S.ayashm@ymail.com

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه.

Khalili2006@gmail.com

دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه.

j.behmanesh@urmia.ac.ir

## چکیده

تبخیر و تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است که تخمین دقیق آن در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شبیه‌سازی تولیدات گیاهی و مدیریت منابع آب ضروری است. در این مطالعه به منظور برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از دو مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) و سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی (ANFIS) در مقیاس زمانی ماهانه، شش ایستگاه سینوپتیک در منطقه شمال غرب کشور در دوره آماری ۳۸ ساله (۲۰۱۰-۱۹۷۳) انتخاب شد. در ابتدا مقادیر تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع برای ایستگاه‌های منتخب توسط روش فائو- پنمن- موتیث محاسبه و به عنوان خروجی مدل‌ها در نظر گرفته شد. سپس یک رابطه رگرسیونی بین متغیرهای اقلیمی مختلف موثر در پدیده تبخیر و تعرق به دست آمد و الگوهای مختلف ورودی برای مدل‌های مورد استفاده مشخص گردید که بر این اساس رطوبت نسبی با داشتن کمترین تاثیر از ورودی‌ها حذف شد. همچنین در مطالعه حاضر سعی گردید تا نقش حافظه در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع بررسی و از تاخیرهای یک، دو، سه و چهار ماهه نیز به عنوان ورودی برای مدل‌ها استفاده شد. به طور کلی برای هر مدل نه الگوی ورودی ایجاد شد که نتایج حاصله نشان دهنده دقت بالا و خطای کم هر دو مدل در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع بوده و کارایی مدل ANFIS بهتر از روش GP بود.

واژه‌های کلیدی: برنامه‌ریزی ژنتیک، تبخیر و تعرق مرجع، سیستم استنتاج عصبی - فازی تطبیقی.

۱ - آدرس نویسنده مسئول: گروه مهندسی آب دانشگاه ارومیه

\* - دریافت: آبان ۱۳۹۳ و پذیرش: خرداد ۱۳۹۴

## مقدمه

مهندسی آب از جمله برآورد تبخیر و تعرق به کار گرفته شده است.

زارع ایبانه و همکاران (۱۳۸۸) از شبکه عصبی مصنوعی<sup>۴</sup> و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه همدان استفاده کردند. نتایج حاصله نشان‌دهنده برتری مدل ANFIS با ورودی‌های درجه حرارت بیشینه و کمینه و تعداد ساعات آفتابی بوده است. زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۰) تبخیر و تعرق واقعی گیاه سیر را با استفاده از روش‌های شبکه عصبی مصنوعی، سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی و روش تلفیقی عصبی- ژنتیک<sup>۵</sup> برآورد نمودند.

نتایج نشان داده که روش شبکه عصبی مصنوعی دقیق‌تر از منطق فازی بوده به طوری که الگوریتم ژنتیک در ترکیب با شبکه عصبی توانسته خطای آزمون شبکه را نسبت به عصبی- فازی به میزان ۲۴ درصد کاهش دهد. اما ترکیب منطق فازی نه تنها سبب بهبود نتایج شبکه عصبی مصنوعی نشد، بلکه دقت پیش‌بینی را به میزان ۱۲ درصد کاهش داده است. جی‌ایبینگ (۲۰۰۴) مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با استفاده از سه روش منطق فازی، شبکه عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) برآورد کردند.

نتایج به دست آمده نشان داد که مدل ANFIS با ورودی‌های تعداد ساعات آفتابی و حداکثر دما می‌تواند با دقت زیاد و خطای کمتری تبخیر تعرق گیاه مرجع را پیش‌بینی کند. دوگان (۲۰۰۹) با استفاده از مدل ANFIS تبخیر و تعرق مرجع را در ایستگاه مورگان سانفرانسیسکو محاسبه کرده و دقت بالای این مدل را در برآورد تبخیر و تعرق مورد تایید قرار دادند. طبری و همکاران (۲۰۱۳) دقت مدل‌های ANFIS و ماشین بردار پشتیبان<sup>۶</sup> را در پیش‌بینی تبخیر تعرق گیاه سیب زمینی مورد ارزیابی قرار دادند. ورودی‌های مختلفی برای هر دو مدل معرفی شده و

انجام آبیاری برای تامین نیاز آبی گیاه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ضروری می‌باشد. بنابراین محاسبه دقیق نیاز آبی گیاه (ETc) جهت بهینه‌سازی مصرف آب، برنامه‌ریزی آبیاری و مصرف ضروری است. محاسبه ETc نیز در بسیاری از پروژه‌های منابع آب، آبیاری و زهکشی مورد نیاز بوده و اندازه‌گیری مستقیم آن تقریباً دشوار، زمان‌بر و پرهزینه است (سامر و جاکوبز ۲۰۰۵). تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر (ETc) اغلب از طریق ضرب تبخیر و تعرق مرجع (ET<sub>0</sub>) در ضریب گیاهی به دست می‌آید.

ET<sub>0</sub> را می‌توان از روش‌های تئوری و تجربی محاسبه کرد. از بین روش‌های مختلف، معادله پنمن - مانیتث به طور گسترده‌ای جهت محاسبه ET<sub>0</sub> در دوره- های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد (آلن و همکاران ۱۹۹۸). نسخه اصلاح شده معادله فائو- پنمن- مونیتث<sup>۱</sup> هم اینک مبنای نرم‌افزارهایی همچون CropWat بوده که در محاسبات تبخیر- تعرق کاربرد فراوانی دارد.

در سال‌های اخیر روش‌های جعبه سیاه<sup>۲</sup> و مبتنی بر داده در حل مسائلی از مهندسی آب که اطلاعات کافی جهت برآورد مدل وجود داشته باشد به طور چشم‌گیری گسترش یافته‌اند. روش سیستم‌های فازی- عصبی تطبیقی<sup>۳</sup> (ANFIS) به عنوان رهیافتی معتبر در مدل‌سازی فرآیندهایی نظیر تبخیر و تعرق که ماهیتی غیرخطی داشته و عوامل اقلیمی مختلفی همچون دما، بارش، تعداد ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد در آن دخیل هستند، مطرح می‌شود.

سیستم‌های فازی- عصبی تطبیقی جزء روش- های جعبه سیاه بوده و بدون در نظر گرفتن فرآیند فیزیکی حاکم بر سیستم و تنها با کمک داده‌های ورودی و خروجی قادر به ایجاد رابطه بین آن دو می‌باشد. در سال- های گذشته مدل ANFIS در بخش‌های مختلف

4 - Artificial Neural Networks (ANN)  
5 - Adaptive Neural Network Based Genetic Algorithm (ANNGA)  
6 - Support vector Machine

1 - Fao Penman-Monteith  
2 - Black Box  
3 - Adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS)

ساعتی، آیتک و همکاران (۲۰۰۸) برای تعیین رابطه بارش- رواناب، قربانی و همکاران (۲۰۱۰) در روندیابی سیلاب و ظهیری و عظمت الله (۲۰۱۴) در پیش‌بینی دبی مقاطع مرکب رودخانه‌ها اشاره کرد.

با عنایت به موارد فوق می‌توان دریافت که تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی همچون تبخیر و تعرق مرجع در تعیین نیاز آبی گیاهان و پروژه‌های آب و خاک بسیار مهم بوده و از دیرباز مورد توجه محققین امر قرار گرفته است. بدین منظور، روش‌های متعددی از جمله مدل‌های تجربی- نیمه تجربی، سری‌های زمانی و مدل‌های هوشمند توسعه یافته‌اند که در این میان مدل‌های هوشمند با الهام گرفتن از طبیعت قادر به تخمین پارامترهای مربوط به پدیده‌های طبیعی با دقت قابل قبول می‌باشند و نیز دقت قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارند. لذا در این تحقیق سعی گردیده است که عملکرد دو مدل هوشمند سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی (ANFIS) و برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع شمال غرب کشور مورد بررسی قرار گیرد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

برای محاسبه تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع در منطقه شمال غرب کشور شامل استان‌های آذربایجان غربی و شرقی، زنجان و کردستان، ایستگاه‌های سینوپتیک موجود در این مناطق مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت شش ایستگاه با دارا بودن اطلاعات کافی و طولانی مدت در دوره آماری ۳۸ ساله (۲۰۱۰-۱۹۷۳) انتخاب شدند. در جدول (۱) مشخصات ایستگاه‌های منتخب ارائه شده است و شکل (۱) نیز موقعیت مکانی ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

در نهایت بر اساس شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا و خطای انحراف میانگین، مدل SVM با در نظر گرفتن ورودی‌های درجه حرارت متوسط، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، تعداد ساعات آفتابی و سرعت باد عملکرد بهتری در مقایسه با سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی داشته ولی دقت هر دو مدل بسیار نزدیک به هم گزارش شده بود.

برنامه‌ریزی ژنتیک<sup>۱</sup> شاخه‌ای از الگوریتم‌های تکاملی است که توانایی مدل‌سازی فرآیندهای کاملاً غیرخطی و پویا را دارد. روش برنامه‌ریزی ژنتیک اولین بار توسط کوزا (۱۹۹۲) بسط داده شد. این روش جزء روش‌های الگوریتم تکاملی محسوب می‌شود که مبنای آنها بر اساس نظریه تکامل داروین استوار است. الگوریتم‌های یاد شده اقدام به تعریف یک تابع هدف در قالب معیارهای کیفی نموده و سپس تابع یاد شده را برای مقایسه جواب‌های مختلف حل مسئله در یک فرآیند گام به گام تصحیح ساختار داده‌ها به کار می‌گیرند و در نهایت، جواب مناسب را ارائه می‌نمایند. روش برنامه‌ریزی ژنتیک جدیدترین شیوه از بین روش‌های الگوریتم تکاملی می‌باشد که به دلیل دارا بودن دقت کافی، از کاربرد بیشتری برخوردار است (آلویسی ۲۰۰۵).

تفاوت اساسی موجود بین الگوریتم ژنتیک و برنامه‌ریزی ژنتیک به طبیعت هر یک از افراد بر می‌گردد، به نحوی که افراد در الگوریتم ژنتیک، ردیف‌های خطی با طول ثابت می‌باشند (کروموزم‌ها) ولی در برنامه‌ریزی ژنتیک، همانند شاخه‌های مجزا هستند. همچنین در برنامه‌ریزی ژنتیک بر ساختار درختی مجموعه‌ها تاکید می‌شود ولی الگوریتم ژنتیک، بر اساس سیستم ارقام دودویی عمل می‌نماید. روش GP در زمینه‌های مختلف مهندسی آب مورد استفاده محققین قرار گرفته است، از جمله تحقیقات انجام یافته با GP می‌توان به مطالعات فرودنام و همکاران (۱۳۸۸) و گوون (۲۰۰۹) برای پیش‌بینی جریان روزانه رودخانه‌ها، خو و همکاران (۲۰۰۱) در پیش‌بینی رواناب

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های منتخب در دوره آماری ۲۰۱۰-۱۹۷۳

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع (متر)	متوسط دما (C)	متوسط بارش (mm/y)	نوع اقلیم (دومارتن)
		درجه	دقیقه	درجه	دقیقه				
۱	ارومیه	۴۵	۰۵	۳۷	۳۲	۱۳۲۸/۰	۱۱/۹	۳۳۸	نیمه خشک
۲	تبریز	۴۶	۱۷	۳۸	۰۵	۱۳۶۱/۰	۱۲/۸	۲۸۳	نیمه خشک
۳	خوی	۴۴	۵۸	۳۸	۳۳	۱۱۰۳/۰	۱۲/۱	۲۸۹	نیمه خشک
۴	زنجان	۲۹	۴۸	۳۶	۴۱	۱۶۶۳/۰	۱۱/۰	۳۱۱	نیمه خشک
۵	سقز	۴۶	۱۶	۳۶	۱۵	۱۵۲۲/۸	۱۳/۶	۴۸۷	مدیترانه‌ای
۶	سندج	۴۷	۰/۰۰	۳۵	۲۰	۱۳۷۳/۴	۱۳/۶	۴۴۹	نیمه خشک



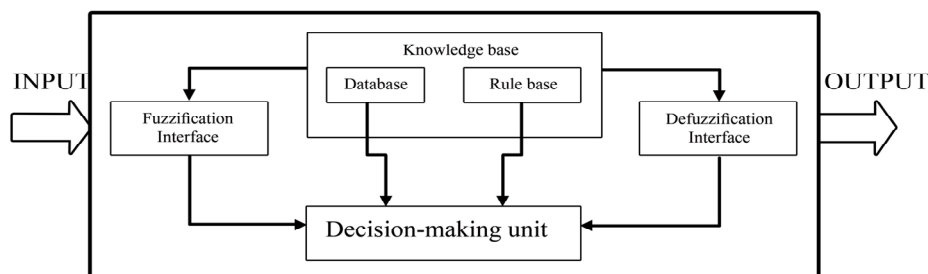
شکل ۱- موقعیت مکانی ایستگاه‌های منتخب

سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی در شکل (۲) نشان داده شده است که دارای مراحل زیر است:

**فازی سازی:** در این مرحله داده‌ها جهت ورود به مرحله بعد فازی‌سازی می‌شوند. **استنتاج:** تمام قوانین تصمیم‌گیری بر روی داده‌های فازی شده اعمال گردیده و با قوانین "اگر و آنگاه" درستی آنها بررسی و تعیین می‌شود. **فازی زدایی:** نتایج فازی به دست آمده از مرحله قبل را با استفاده از روش‌های مختلف همچون مرکز جرم و غیره به مقدار اولیه بر می‌گرداند.

### سیستم استنتاج فازی عصبی- تطبیقی (ANFIS)

روش سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی، یک روش نوین در حل مسایل پیچیده‌ای است که یا الگوریتم مشخصی برای حل آنها وجود ندارد و یا استفاده از روش‌های متعارف مستلزم به کارگیری راه‌حل‌های بسیار طولانی و زمان‌بر می‌باشد. یکی از قابلیت‌های مهم سامانه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی درک رفتار غیرخطی یک سیستم می‌باشد. این روش در سال‌های اخیر در مسایل مختلف مدیریت منابع آب و خاک مورد استفاده قرار گرفته است (نحوی‌نیا و همکاران، ۱۳۸۹). روند



شکل ۲- روند سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی

های ورودی و مجموعه توابع به منظور تولید کروموزومها بود. در مسئله حاضر مجموعه ترمینالها متشکل از مقادیر تخبیر و تعرق ماهانه با تاخیرهای زمانی و اطلاعات اقلیمی در نظر گرفته شد. در این مطالعه از چهار عملگر اصلی که شامل  $\{+, -, \times, \div\}$  و نیز توابع ریاضی  $\{X^2, X^3, \sqrt[3]{X}, \sqrt{X}, \text{Log}(X)\}$  استفاده گردید. گام سوم، شامل انتخاب ساختار و معماری کروموزومها بود. اندازه طول هر راس و تعداد ژن‌ها بر اساس تعداد متغیرهای ورودی انتخاب شد. گام چهارم انتخاب تابع پیوندی بود. در نهایت، در گام پنجم عملگر-های ژنتیک و نرخ هر یک از آنها تعیین گردید.

#### انتخاب داده‌های ورودی

توانمندی پیش‌بینی مدل‌های هوشمند به انتخاب صحیح نوع اطلاعات ورودی در لایه اول بستگی دارد. بنابراین در مطالعه حاضر دو حالت برای داده‌های ورودی در نظر گرفته شد. در حالت اول به منظور بررسی نقش و توانایی حافظه در پیش‌بینی تخبیر و تعرق، از تاخیرهای زمانی یک، دو، سه و چهار ماهه استفاده گردید و هدف پاسخ به این سوال بود که آیا می‌توان از حافظه تخبیر و تعرق برای پیش‌بینی و مدل‌سازی خود پدیده نیز استفاده کرد؟ در حالت دوم داده‌های اقلیمی موثر در تخبیر و تعرق توسط روش رگرسیون شناسایی شد و ترکیبات مختلف ورودی با داده‌های اقلیمی ایجاد و به مدل‌ها معرفی گردید. در این حالت متغیری که کمترین ضریب رگرسیون را به خود اختصاص داده بود حذف گردید تا از خطا و پیچیدگی مدل کاسته شود. به طور کلی نه الگو در دو حالت ایجاد و به مدل‌ها معرفی گردید.

#### معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل‌های مورد نظر از معیارهای ضریب همبستگی و جذر میانگین مربعات خطا استفاده شد:

نخستین گام در پی‌ریزی شبکه استنتاج تطبیقی عصبی-فازی برای پیش‌بینی تخبیر- تعرق مرجع ماهانه، انتخاب داده‌های ورودی وابسته و نرمال‌سازی داده‌ها قبل از ورود به مدل ANFIS می‌باشد. نرمال‌سازی داده‌ها که به منظور افزایش دقت و سرعت شبکه در پاسخ به پیام-های ورودی می‌باشد، با استفاده از رابطه زیر انجام شد (سبزی‌پرور و همکاران، ۱۳۸۹):

$$X_n = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

که در آن:

$X_n$ : مقدار نرمال شده،  $X_i$ : مقدار واقعی متغیر،  $X_{\min}$ : کمینه مقدار واقعی متغیر و  $X_{\max}$ : بیشینه مقدار واقعی متغیر است. داده‌ها پس از استاندارد شدن و قرار گرفتن در محدوده صفر و یک، به دو دسته داده آموزش (۸۰ درصد) و داده آزمون (۲۰ درصد) تقسیم شدند. در این مطالعه به منظور توسعه مدل ANFIS از نرم افزار متلب استفاده شد.

#### برنامه‌ریزی ژنتیک (GP)

در مطالعه حاضر از برنامه GeneXpro Tools (فریرا ۲۰۰۱) برای توسعه و اجرای مدل‌های مبتنی بر برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده شد. برنامه‌ریزی ژنتیک به استنتاج برنامه‌های رایانه‌ای با اندازه‌ها و شکل‌های مختلف می‌پردازد. یکی از نقاط قوت GP آن است که معیار تنوع ژنتیکی بسیار ساده بوده و لذا عملگرهای ژنتیک در سطح کروموزوم عمل می‌نمایند. همچنین یکی دیگر از نقاط قوت این روش، عبارت است از طبیعت منحصر به فرد چند ژنی بودن آن که زمینه ارزیابی مدل‌های پیچیده‌ای را که شامل چندین زیرمدل می‌باشند فراهم می‌آورد (فریرا ۲۰۰۱). فرآیند مدل‌سازی تخبیر تعرق ماهانه گیاه مرجع شمال غرب کشور در تحقیق حاضر به شکل زیر صورت گرفت.

گام اول، انتخاب تابع برازش مناسب بود که در این مطالعه تابع جذر میانگین مربعات خطا به عنوان تابع برازش انتخاب گردید. گام دوم، انتخاب مجموعه متغیر-

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{0i}(FPM) - \overline{ET_0(FPM)})(ET_{0i}(cal) - \overline{ET_0(cal)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (ET_{0i}(FPM) - \overline{ET_0(FPM)})^2 \sum_{i=1}^n (ET_{0i}(cal) - \overline{ET_0(cal)})^2}} \quad (2)$$

$$RMSE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n ((ET_{0i}(FPM) - ET_{0i}(cal))^2)}{n} \right)^{0.5} \quad (3)$$

شد و با تاخیرهای یک، دو، سه و چهار ماهه الگوهای مورد نظر ساخته شد. در حالت دوم با ارائه مدل رگرسیونی، ارتباط بین متغیرهای مستقل هواشناسی و تبخیر و تعرق مرجع برای هر یک از ایستگاه‌ها مشخص گردید. جدول (۲) رابطه رگرسیونی را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. با توجه به این جدول چنین استنباط می‌شود که تابش خورشیدی و رطوبت نسبی به ترتیب بیشترین و کمترین اثرگذاری را در تبخیر و تعرق مرجع دارا بودند (به دلیل داشتن بزرگترین و کوچکترین ضرایب). جدول (۳) ترکیب‌های مختلف ورودی و متغیر-های انتخاب شده برای مدل‌های ANFIS و GP را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌گردد رطوبت نسبی به دلیل تاثیرگذاری کم از ترکیبات ورودی کنار گذاشته شد.

که در آن:  $ET_{0i}(FPM)$  مقادیر مشاهداتی تبخیر و تعرق مرجع (به دست آمده از معادله فائو - پنمن - مانیتث) در گام زمانی  $i$ ام،  $ET_{0i}(cal)$  مقدار محاسبه شده در همان زمان،  $n$  تعداد داده‌ها،  $\overline{ET_0(FPM)}$  میانگین مقادیر مشاهداتی و  $\overline{ET_0(cal)}$  میانگین مقادیر محاسباتی می‌باشد. هر چه مقدار ضریب همبستگی بالاتر و RMSE کمتر باشد، نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر خواهند بود.

## نتایج

### داده‌های ورودی به مدل‌ها

در این تحقیق نه الگو با ترکیبات مختلف از داده‌های موجود به مدل‌های ANFIS و GP معرفی گردید. در حالت اول فقط از حافظه تبخیر و تعرق استفاده

جدول ۲- معادله کلی رگرسیون برای تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	معادله رگرسیون	ضریب همبستگی
۱	ارومیه	$ET_0 = 0.141T_{max} - 0.045T_{min} - 0.005RH_{ave} + 0.009U_2 + 0.053n + 0.141R$	۰/۸۶
۲	تبریز	$ET_0 = 0.0316T_{max} + 0.078T_{min} - 0.024RH_{ave} + 0.019U_2 + 0.093n + 0.119R$	۰/۸۱
۳	خوی	$ET_0 = 0.0365T_{max} + 0.064T_{min} - 0.018RH_{ave} + 0.027U_2 - 0.023n + 0.127R$	۰/۸۳
۴	زنجان	$ET_0 = 0.042T_{max} + 0.046T_{min} - 0.006RH_{ave} + 0.013U_2 - 0.145n + 0.120R$	۰/۸۴
۵	سقز	$ET_0 = 0.036T_{max} + 0.061T_{min} - 0.002RH_{ave} + 0.003U_2 - 0.038n + 0.158R$	۰/۸۸
۶	سنندج	$ET_0 = 0.078T_{max} + 0.018T_{min} - 0.004RH_{ave} + 0.005U_2 + 0.014n + 0.142R$	۰/۸۷

\*: در روابط فوق  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر در روز)،  $T_{max}$  و  $T_{min}$ : دمای هوای کمینه و بیشینه (درجه سانتی‌گراد)،  $RH_{ave}$  متوسط رطوبت نسبی (درصد)،  $U_2$  سرعت باد در ارتفاع دو متری (کیلومتر بر روز)،  $n$ : تعداد ساعات آفتابی (ساعت) و  $R$  تابش خورشیدی ( $MJ/m^2/day$ ) می‌باشد.

جدول ۳- الگوهای مختلف معرفی شده به مدل‌های GP و ANFIS

حالت‌های ورودی	شماره الگو	الگو	الگوهای ورودی به مدل‌های GP و ANFIS
حالت اول: استفاده از حافظه سری تبخیر و تعرق	۱	M1	ET0(t), ET0(t-1)
	۲	M2	ET0(t), ET0(t-1), ET0(t-2)
	۳	M3	ET0(t), ET0(t-1), ET0(t-2), ET0(t-3)
	۴	M4	ET0(t), ET0(t-1), ET0(t-2), ET0(t-3), ET0(t-4)
حالت دوم: استفاده از داده‌های اقلیمی	۵	M5	ET0, Tmin, Tmax
	۶	M6	ET0, Tmin, Tmax, Tave
	۷	M7	ET0, Tmin, Tmax, Tave, R
	۸	M8	ET0, Tmin, Tmax, Tave, R, U2
	۹	M9	ET0, Tmin, Tmax, Tave, R, U2, n

جدول ۴- نتایج تحلیل آماری الگوهای مختلف ورودی مدل ANFIS در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع

ایستگاه	مرحله	معیارهای ارزیابی	الگوهای ورودی								
			M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1
ارومیه	آموزش	R	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۹۲	۰/۹۶۹	۰/۹۶۶	۰/۹۸۶	۰/۹۸۱	۰/۹۶۸	۰/۸۰۷
	صحت	RMSE	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۲۵	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۳۳	۰/۳۹	۰/۵۰	۱/۰۸
	سنجی	R	۰/۹۸۰	۰/۹۹۱	۰/۹۹۵	۰/۹۶۳	۰/۹۷۵	۰/۹۵۴	۰/۹۷۱	۰/۹۵۶	۰/۷۹۴
	سنجی	RMSE	۰/۴۴	۰/۲۹	۰/۴۲	۰/۷۲	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۵۵	۰/۶۵	۱/۱۸
تبریز	آموزش	R	۰/۹۹۸	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۸۴	۰/۹۸۲	۰/۹۸۶	۰/۹۸۱	۰/۹۶۵	۰/۷۹۲
	صحت	RMSE	۰/۱۱	۰/۱۴	۰/۳۱	۰/۴۹	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۵۴	۰/۷۲	۱/۱۵
	سنجی	R	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۶	۰/۸۶۵	۰/۸۷۹	۰/۹۶۷	۰/۹۷۳	۰/۹۵۴	۰/۷۸۴
	سنجی	RMSE	۰/۷۲	۰/۲۴	۱/۲۳	۱/۴۴	۱/۳۸	۰/۷۸	۰/۷۰	۰/۸۸	۱/۵۹
خوی	آموزش	R	۰/۹۹۷	۰/۹۹۶	۰/۹۸۴	۰/۹۵۳	۰/۹۵۱	۰/۹۷۹	۰/۹۶۷	۰/۹۵۰	۰/۷۹۰
	صحت	RMSE	۰/۰۴	۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۵۳	۰/۵۴	۰/۳۶	۰/۴۶	۰/۵۳	۰/۹۶
	سنجی	R	۰/۹۹۳	۰/۹۹۵	۰/۹۸۲	۰/۹۳۹	۰/۹۵۹	۰/۹۴۳	۰/۹۶۵	۰/۹۳۹	۰/۷۸۵
	سنجی	RMSE	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۶۲	۰/۷۷	۰/۶۳	۰/۷۴	۰/۵۷	۰/۷۳	۱/۱۳
زنجان	آموزش	R	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۷۶	۰/۹۴۷	۰/۹۴۳	۰/۹۸۳	۰/۸۵۸	۰/۷۳۷	۰/۸۰۴
	صحت	RMSE	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۴۶	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۳۹	۱/۱۰	۲/۱۱	۱/۱۴
	سنجی	R	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۷۶	۰/۹۷۵	۰/۹۵۶	۰/۸۵۸	۰/۹۴۶	۰/۷۸۸
	سنجی	RMSE	۰/۲۳	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۶۵	۱/۱۳	۰/۶۹۳	۱/۱۷
سقز	آموزش	R	۰/۹۹۵	۰/۹۹۹	۰/۹۷۸	۰/۹۴۸	۰/۹۴۷	۰/۹۸۱	۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	۰/۹۵۸
	صحت	RMSE	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۴۴	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۴۷	۰/۶۰
	سنجی	R	۰/۹۹۲	۰/۹۹۴	۰/۹۸۵	۰/۹۳۶	۰/۹۷۹	۰/۹۷۹	۰/۹۶۱	۰/۹۶۳	۰/۹۵۶
	سنجی	RMSE	۰/۳۰	۰/۲۷	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۳۹	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۷۰
سندج	آموزش	R	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۸۱	۰/۹۵۶	۰/۹۵۳	۰/۹۸۲	۰/۹۷۵	۰/۹۵۶	۰/۸۰۱
	صحت	RMSE	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۴۵	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۴۴	۰/۵۲	۰/۶۹	۱/۲۷
	سنجی	R	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۳	۰/۹۷۴	۰/۹۷۲	۰/۹۷۷	۰/۹۷۱	۰/۹۶۷	۰/۷۹۲
	سنجی	RMSE	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۲۶	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۵۶	۰/۵۹	۱/۲۷

شد. در جدول (۴) نتایج ارزیابی الگوهای مختلف ورودی

ANFIS برای مدل‌سازی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع در مراحل آموزش و صحت‌سنجی ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که در کل عملکرد ANFIS در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع بسیار مناسب می‌باشد. اگر صرفاً از حافظه خود سری تبخیر و تعرق ماهانه برای پیش‌بینی استفاده گردد، بر

#### نتایج مدل‌سازی ANFIS

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع با استفاده از ANFIS، داده‌های ۳۰ سال (از ژانویه ۱۹۷۳ تا دسامبر ۲۰۰۲) برای آموزش و هشت سال (از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۰) به عنوان داده‌های صحت‌سنجی انتخاب شدند. به طور کلی ۸۰ درصد داده‌ها برای آموزش و ۲۰ درصد نیز برای تست در نظر گرفته

نتایج مدل‌سازی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک

در مطالعه حاضر برای مدل‌سازی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع با استفاده از روش GP، داده‌های ۳۰ سال (از ژانویه ۱۹۷۳ تا دسامبر ۲۰۰۲) برای آموزش و هشت سال (از ژانویه ۲۰۰۳ تا دسامبر ۲۰۱۰) به عنوان داده‌های صحت‌سنجی انتخاب شدند. انتخاب جمعیت‌های اولیه تصادفی مختلف و تاثیرگذار در پدیده (که در برنامه-ریزی ژنتیک به عنوان داده‌های آموزشی از آنها یاد می‌شود) به منظور آموزش ماهیت ساز و کار حاکم بر پدیده نه تنها سبب پیچیدگی الگو و افزایش حافظه درگیر خواهد شد، بلکه سبب کاهش دقت الگو نیز می‌شود. لذا در الگوسازی تبخیر و تعرق نیز بایستی سعی نمود موثرترین داده‌های مشاهداتی را به عنوان داده‌های آموزشی انتخاب کرد.

در این مطالعه برای انتخاب هرچه بهتر و دقیق‌تر اطلاعات ورودی، از روش رگرسیون و حافظه‌سازی برای سری تبخیر و تعرق کمک گرفته شد و الگوهای ورودی به صورت M1 تا M9 جدول (۲) مانند روش ANFIS به مدل GP ارائه شد. جدول (۵) مقایسه شاخص‌های آماری مربوط به نتایج حاصل از کاربرد روش برنامه‌ریزی ژنتیک در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع، برای الگو-های مختلف ورودی را نشان می‌دهد. با توجه به این جدول می‌توان نتیجه گرفت که در کل عملکرد GP در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع مناسب می‌باشد.

حال اگر از حافظه خود سری تبخیر و تعرق ماهانه برای مدل‌سازی استفاده گردد، براساس جدول (۵) مشاهده می‌شود که دقت مدل‌سازی رفته رفته تا چهار تاخیر زمانی رو به بهبود بوده و در تمامی ایستگاه‌ها در گام زمانی چهارم بیشینه دقت و کمترین خطا براساس شاخص‌های RMSE و R حاصل می‌گردد. با انجام مقایسه بین حالتی که از حافظه سری به عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌شود (حالت اول) نسبت به حالتی که از متغیرهای هواشناسی در تخمین مقادیر تبخیر و تعرق بهره

استاد جدول (۵) مشاهده می‌شود که دقت در ایستگاه-های سنندج و زنجان در تاخیر چهارم زمانی به بیشترین مقدار خود می‌رسد و در ایستگاه‌های سقز، تبریز، ارومیه و خوی در گام زمانی سوم بیشینه دقت بر اساس شاخص-های RMSE و R حاصل می‌گردد. با انجام مقایسه بین حالتی که از حافظه سری به عنوان ورودی‌های مدل استفاده می‌شود (حالت اول) نسبت به حالتی که از متغیرهای هواشناسی در تخمین مقادیر تبخیر و تعرق بهره گرفته می‌شود (حالت دوم) می‌توان نتیجه گرفت حالت دوم از دقت بیشتری برخوردار است اما اختلاف دقت بین دو حالت آنچنان زیاد نبوده و می‌توان با بیشتر کردن میزان خطای قابل قبول در شرایطی که داده‌های هواشناسی به طور کامل در دسترس نباشد از حافظه تبخیر و تعرق به عنوان ورودی‌های مدل استفاده کرد.

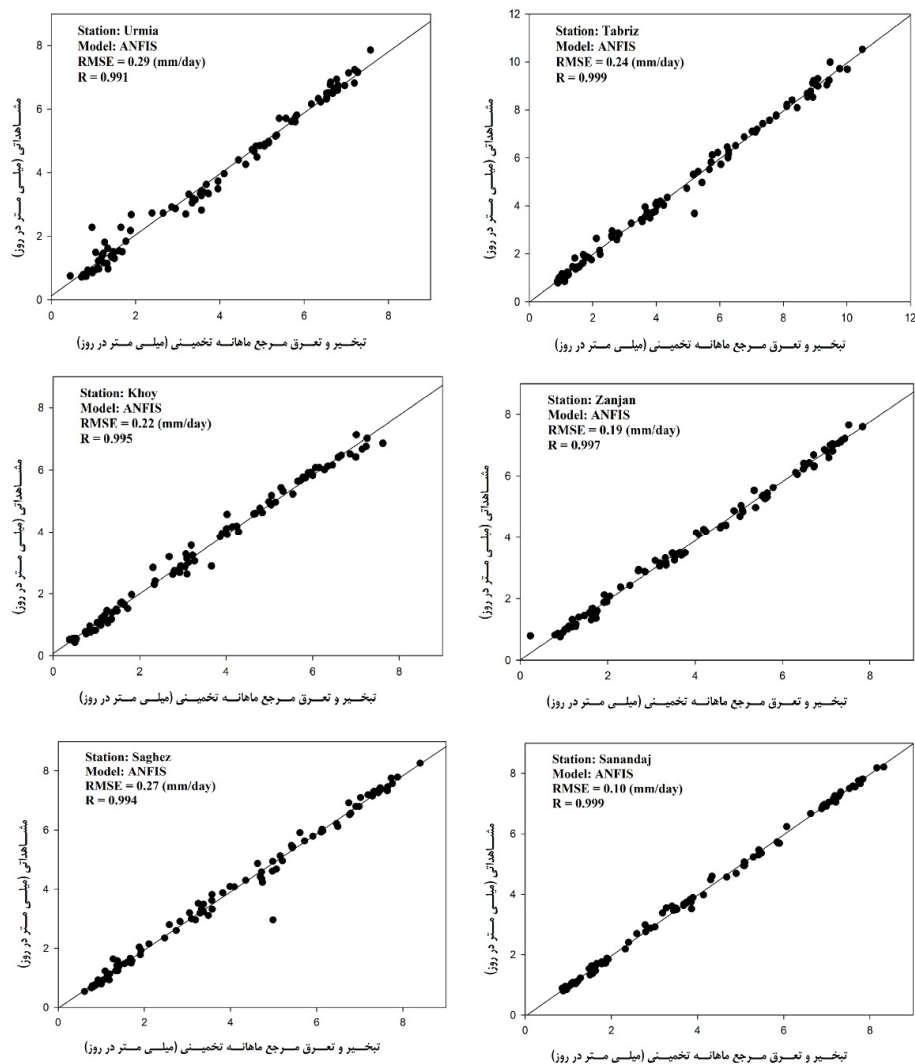
همچنین جدول (۴) نشان می‌دهد که مدل ANFIS با ورودی‌های دمای بیشینه، متوسط و کمینه، تابش خورشیدی و سرعت باد (M8) بهترین عملکرد را برای تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته است. الگوی M5 نیز با ورودی‌های دمای بیشینه و کمینه پایین‌ترین دقت و بیشترین خطا را در تخمین تبخیر و تعرق ماهانه برای تمامی ایستگاه‌ها ارائه کرده است. بررسی و مقایسه مقادیر پارامترهای RMSE و R ارائه شده در جدول (۴) برای مدل M8 نیز نشان می‌دهد که اختلاف تک تک مقادیر پیش‌بینی شده در مرحله صحت‌سنجی برای سیستم استنتاج عصبی- فازی تطبیقی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه شده از رابطه پنمن- فائو- مانتیث متناظر است. مقدار RMSE برای کل مدل‌های ANFIS ارائه شده بین ۱/۵۹ تا ۰/۰۴ میلی‌متر در روز متغیر بود، که این مقادیر کم نشان دهنده دقت بالای پیش‌بینی می‌باشد. شکل (۳) نمودارهای پراکندگی مقادیر مشاهداتی و تخمینی حاصل از الگوی M8 را برای ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



ورودی‌های دمای بیشینه، متوسط، کمینه و تابش خورشیدی) و برای ایستگاه تبریز الگوی M6 (با ورودی-های دمای بیشینه، متوسط و کمینه) بهترین عملکرد را داشته است. شکل (۴) نمودارهای پراکندگی مقادیر مشاهداتی و تخمینی را در بهترین حالت مدل GP برای هر ایستگاه نشان می‌دهد.

گرفته می‌شود (حالت دوم) به مانند مدل ANFIS، حالت دوم از دقت بیشتری برخوردار است.

طبق جدول (۵)، مدل GP برای ایستگاه‌های ارومیه و خوی با ورودی‌های دمای بیشینه، متوسط و کمینه، تابش خورشیدی و سرعت باد (M8)، برای ایستگاه‌های زنجان، سقز و سنندج الگوی M7 (با



شکل ۳- نمودارهای پراکندگی مقادیر مشاهداتی و تخمینی حاصل از الگوی M8 مدل ANFIS برای ایستگاه‌های مورد مطالعه

جدول ۵- نتایج تحلیل آماری الگوهای مختلف ورودی مدل GP در پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع

ایستگاه	مرحله	معیارهای ارزیابی	الگوهای ورودی								
			M9	M8	M7	M6	M5	M4	M3	M2	M1
ارومیه	آموزش	R	۰/۹۸۰	۰/۹۷۹	۰/۹۶۹	۰/۹۵۸	۰/۹۵۳	۰/۹۷۱	۰/۹۶۴	۰/۹۵۶	۰/۸۴۹
	صحت	RMSE	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۶۲	۰/۴۸	۰/۵۴	۰/۶۱	۱/۰۹
	سنجی	R	۰/۹۸۲	۰/۹۸۹	۰/۹۷۰	۰/۹۷۳	۰/۹۶۶	۰/۹۶۵	۰/۹۵۰	۰/۹۴۱	۰/۸۴۴
	سنجی	RMSE	۰/۵۵	۰/۵۰	۰/۷۸	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۰	۰/۷۰	۰/۷۶	۱/۱۷
تبریز	آموزش	R	۰/۹۵۱	۰/۹۷۲	۰/۹۷۶	۰/۹۷۶	۰/۹۶۲	۰/۹۶۷	۰/۹۵۳	۰/۹۵۴	۰/۸۳۹
	صحت	RMSE	۰/۸۶	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۰	۰/۸۱	۰/۷۰	۰/۸۷	۰/۸۴	۱/۵۳
	سنجی	R	۰/۹۳۹	۰/۹۷۲	۰/۹۷۷	۰/۹۷۹	۰/۹۶۹	۰/۹۶۵	۰/۹۴۱	۰/۹۴۶	۰/۸۳۹
	سنجی	RMSE	۱/۱۱	۰/۷۰	۰/۸۳	۰/۶۲	۰/۸۶	۰/۷۴	۱/۰۴	۰/۸۹	۱/۶۰
خوی	آموزش	R	۰/۹۳۷	۰/۹۷۸	۰/۹۸۰	۰/۹۴۱۴	۰/۹۴۳	۰/۹۶۶	۰/۹۶۲	۰/۹۴۲	۰/۸۴۲
	صحت	RMSE	۰/۶۲	۰/۳۸	۰/۳۵	۰/۶۱	۰/۵۹	۰/۴۷	۰/۵۰	۰/۶۱	۰/۹۷
	سنجی	R	۰/۹۳۴	۰/۹۸۸	۰/۹۷۸	۰/۹۵۰	۰/۹۵۲	۰/۹۶۲	۰/۹۵۶	۰/۹۲۳	۰/۸۳۴
	سنجی	RMSE	۰/۸۴	۰/۵۵	۰/۶۰	۰/۶۸	۰/۷۱	۰/۶۱	۰/۶۷	۰/۸۰	۱/۱۳
زنجان	آموزش	R	۰/۹۷۱	۰/۹۷۳	۰/۹۷۱	۰/۹۵۳	۰/۹۳۹	۰/۹۴۷	۰/۹۶۱	۰/۹۵۸	۰/۸۴۶
	صحت	RMSE	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۶۵	۰/۷۰	۱/۲۷
	سنجی	R	۰/۹۸۸	۰/۹۷۸	۰/۹۸۸	۰/۹۷۰	۰/۹۶۸	۰/۹۶۶	۰/۹۶۰	۰/۹۵۷	۰/۸۴۳
	سنجی	RMSE	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۶۱	۰/۶۸	۰/۷۲	۱/۲۷
سقز	آموزش	R	۰/۹۶۱	۰/۹۶۷	۰/۹۶۵	۰/۹۲۰	۰/۹۷۱	۰/۹۶۵	۰/۹۷۱	۰/۹۵۷	۰/۸۵۲
	صحت	RMSE	۰/۶۰	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۷۷	۰/۸۵	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۶۳	۱/۱۳
	سنجی	R	۰/۹۷۱	۰/۹۸۶	۰/۹۹۰	۰/۹۶۷	۰/۹۶۲	۰/۹۶۵	۰/۹۶۲	۰/۹۴۹	۰/۸۳۶
	سنجی	RMSE	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۶۰	۰/۶۸	۰/۷۵	۱/۳۰
سنندج	آموزش	R	۰/۹۷۱	۰/۹۷۳	۰/۹۷۱	۰/۹۵۳	۰/۹۳۹	۰/۹۴۷	۰/۹۶۱	۰/۹۵۸	۰/۸۴۶
	صحت	RMSE	۰/۵۷	۰/۵۶	۰/۵۷	۰/۷۲	۰/۸۳	۰/۷۹	۰/۶۵	۰/۷۰	۱/۲۷
	سنجی	R	۰/۹۸۸	۰/۹۷۸	۰/۹۸۸	۰/۹۷۰	۰/۹۶۸	۰/۹۶۹	۰/۹۶۶	۰/۹۴۷	۰/۸۴۳
	سنجی	RMSE	۰/۴۵	۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۶۰	۰/۶۳	۰/۵۸	۰/۶۱	۰/۸۲	۱/۲۸

\* واحد RMSE بر حسب میلی متر در روز می‌باشد.

## نتیجه‌گیری و بحث

طوری که مدل ANFIS برای رسیدن به بیشینه دقت خود از متغیرهای دمای بشینه، متوسط و کمینه، تابش خورشیدی و سرعت باد (M8) استفاده می‌کند. اما مدل GP در ایستگاه‌های ارومیه و خوی با الگوی M8، برای ایستگاه‌های زنجان، سقز و سنندج با الگوی M7 و برای ایستگاه تبریز با الگوی M6 بهترین عملکرد را داشته است.

در همه ایستگاه‌ها مدل ANFIS از دقت بالا و خطای کمتری نسبت به مدل GP برخوردار بود. همچنین مدل ANFIS از پارامترهای ورودی بیشتری (نسبت به مدل GP) برای پیش‌بینی تبخیر و تعرق استفاده می‌کند. عملکرد بهتر مدل ANFIS در مطالعات مرادی و

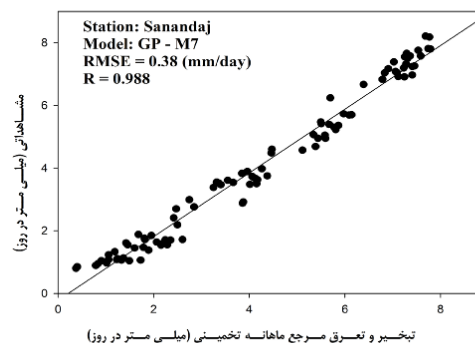
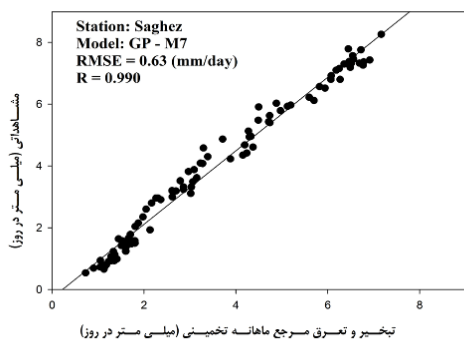
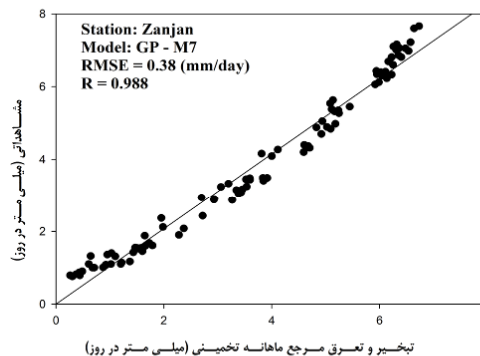
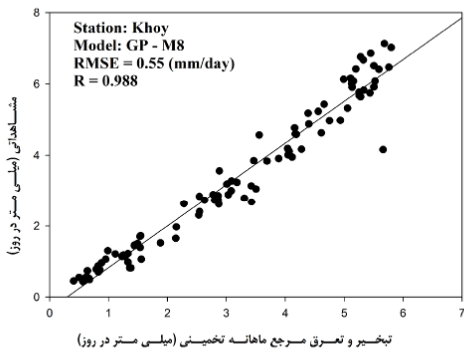
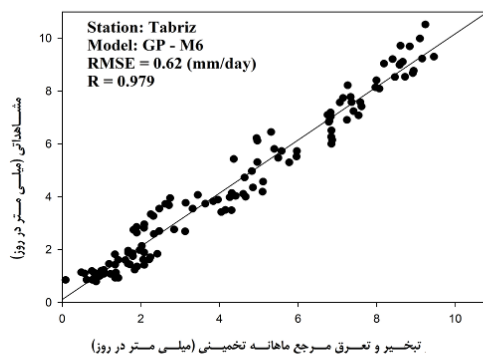
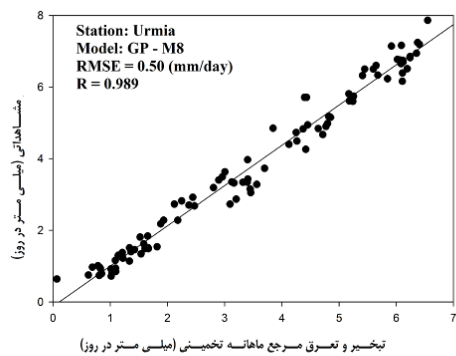
در این تحقیق از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه، تبریز، خوی، زنجان، سقز و سنندج در دوره آماری ۳۸ ساله (۲۰۱۰-۱۹۷۳) برای پیش‌بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی ژنتیک و ANFIS استفاده شد. به طور کلی می‌توان نتایج حاصل از مطالعه حاضر را به شرح زیر ارائه نمود:

با توجه به نتایج تحلیل‌های آماری و شاخص-های RMSE و R، دو مدل GP و ANFIS از دقت بسیار خوب و قابل قبولی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های شمال‌غرب کشور برخوردار هستند. با دقت بیشتر در جداول (۵) و (۷) می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد هر دو مدل نزدیک به هم بوده و با ورودی‌های مختلفی به بالاترین دقت در مدل‌سازی دست می‌یابند. به

بینی تبخیر تعرق ماهانه گیاه مرجع بررسی گردد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان خطای قابل قبول می‌توان از حافظه نیز برای تخمین تبخیر و تعرق استفاده کرد که در این حالت مدل ANFIS عملکرد بهتری نسبت مدل GP دارد.

در مطالعه‌ای، وروانی و همکاران (۱۳۹۲) در نتایج خود گزارش کردند که مدل رگرسیون درختی مقدار تبخیر و تعرق متوسط ماهانه را در نواحی گرم و خشک دست پایین و در نواحی مرطوب دست بالا برآورد می‌کند از این رو پیشنهاد می‌گردد مطالعه‌ای مشابه با مدل‌های ANFIS و GP در مناطق گرم و خشک و نیمه خشک کشور صورت گرفته و کارایی این مدل‌ها در برآورد تبخیر و تعرق اقلیم‌های متفاوت بررسی گردد.

همکاران (۱۳۹۱)، زارع ایبانه و همکاران (۱۳۹۰) و دوگان (۲۰۰۹) نیز به مانند مطالعه حاضر تایید شده است. این که کدامیک از مدل‌ها بهتر بوده و کدام الگو می‌بایست انتخاب شود می‌تواند بسته به نظر کارشناس و دسترسی به داده‌های اقلیمی تعیین گردد. به عنوان مثال برای ایستگاه تبریز اگر بیشینه دقت مد نظر باشد و تمامی داده‌های اقلیمی در دسترس باشند، می‌توان مدل ANFIS با الگوی M8 را انتخاب کرد ولی اگر داده‌های تابش، سرعت باد و ساعات آفتابی به هر دلیلی کنار گذاشته شود مدل GP با الگوی M6 بهترین انتخاب خواهد بود. در مواردی مانند پیش‌بینی جریان رودخانه، از حافظه سری جریان برای پیش‌بینی استفاده می‌گردد که دلیل آن نبود داده‌های بیشتر و یا بررسی اثر حافظه می‌باشد. در این تحقیق نیز سعی گردید اثر حافظه در پیش-



شکل ۴- نمودارهای پراکندگی مقادیر مشاهداتی و تخمینی در بهترین حالت مدل GP

### فهرست منابع

۱. زارع ایبانه ح، قاسمی ع، بیات ورکشی م، محمدی ک، سبزی‌پرور ع، ۱۳۸۸. ارزیابی کارایی دو نرم افزار شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی تبخیر- تعرق گیاه مرجع. مجله دانش آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۲، صفحات ۲۰۱-۲۱۲.
۲. زارع ایبانه ح، بیات ورکشی م، معروفی ص، ۱۳۹۰. محاسبه تبخیر و تعرق واقعی گیاه سیر به روش مدل‌سازی چنگانه تحت شرایط کاشت لایسمتر. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۸، شماره ۲، صفحات ۱۴۱-۱۵۸.
۳. مرادی ح، تمنا م، انصاری ح، نادریان‌فر م، ۱۳۹۱. ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی جهت برآورد تبخیر تعرق مرجع ساعتی (مطالعه موردی: منطقه فریمان). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۱، صفحات ۱۵۳-۱۶۸.

۴. فربودنام ن، قربانی م. ع، اعلمی م. ت، ۱۳۸۸. پیش‌بینی جریان رودخانه با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (مطالعه موردی: رودخانه ليقوان). مجله دانش آب و خاک، جلد ۱۹، شماره ۴، صفحات ۱۰۷-۱۲۳.
۵. قربانی م. ع، شیرج، کاظمی ه، ۱۳۸۹. تخمین بیشینه، متوسط و کمینه دمای شهر تبریز با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی. مجله دانش آب و خاک، جلد ۲۰، شماره ۱، صفحات ۸۷-۱۰۴.
۶. نحوی نیا م. ج، لیاقت ع، پارسی نژاد، م. ۱۳۸۹. کاربرد مدل‌های تجربی و آماری در پیش‌بینی میزان نفوذ آب در آبیاری جویچه‌ای. نشریه آب و خاک، جلد ۲۴، شماره ۴، صفحات ۷۶۹-۷۸۰.
۷. وروانی ه، مرادی م. ا، و وروانی ج، ۱۳۹۲. برآورد تبخیر و تعرق ماهانه گیاه مرجع توسط مدل رگرسیون درختی در نواحی مختلف آب و هوایی ایران. نشریه پژوهش آب در کشاورزی. جلد ۲۷، شماره ۴، صفحات ۵۳۴-۵۲۳.
8. Allen R.G, Pereira L.S., Raes D, and Smith M, 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56. Rome, Italy, 300p.
9. Alvisi S, Mascellani G, Franchini M, and Bardossy A, 2005. Water level forecasting through fuzzy logic and artificial neural network approaches. Hydrology and Earth System Sciences, 2: 1107-1145.
10. Aytek A, and Kisi O, 2008. A genetic programming approach to suspended sediment modeling. Journal of Hydrology, 351: 288-298.
11. Dogan E, 2009. Reference evapotranspiration estimation using adaptive neuro-fuzzy inference system. Journal of Irrigation and Drainage, 58: 617-628.
12. Eswari S, Raghunath P. N, and Suguna K, 2008. Ductility performance of hybrid fibre reinforced concrete. American Journal of Applied Sciences, 5(9): 1257-1262.
13. Ferreira C, 2001. Gene expression programming: A new adaptive algorithm for solving problems. Complex Systems, 13(2): 87-129.
14. Ghorbani M.A., Kisi O, and Aalinezhad M, 2010. A probe into the chaotic nature of daily streamflow time series by correlation dimension and largest Lyapunov methods. Applied Mathematical Modelling, 34: 4050-4057.
15. Guven A, 2009. Linear genetic programming for time-series modeling of daily flow rate. Journal of Earth System Science, 118(2): 157-173.
16. Jia Bing C, 2004. Prediction of daily reference evapotranspiration using adaptive neurofuzzy inference system. Trans of the Chinese society of Agricultural Engineering, 20: (4) 13-16.
17. Koza J. R, 1992. Genetic Programming: on the programming of computers by means of natural selection. Cambridge, MA: MIT Press.
18. Khu S.T, Liong S.Y, Babovic V, Madsen H, and Muttil N, 2001. Genetic programming and its application in real-time runoff forming. Journal of American Water Resources Association, 37 (2): 439-451.
19. Sumner D. M, and Jacobs J. M, 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. Journal of Hydrology, 308: 81-104.
20. Tabari H, Martinez C, Ezani A, and Hosseinzadeh Talaei P, 2013. Applicability of support vector machines and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling potato crop evapotranspiration. Irrigation Science, 31(4): 575-588.
21. Zahiri A, Azamathulla H, 2014. Comparison between linear genetic programming and M5 tree models to predict flow discharge in compound channels. Neural Computing and Applications, 24: 413-420.