

تعیین بهترین مدل سیستم استنتاج انطباقی فازی - عصبی (ANFIS) در تخمین تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن در اقلیم نیمه‌خشک ساحلی هرمزگان

محمد نکوآمال کرمانی^{1*}، رسول میرعباسی نجف-آبادی²

تاریخ دریافت: 94/09/17 تاریخ پذیرش: 94/10/29

1- کارشناس ارشد مهندسی آب، مرکز تحقیقات هواشناسی استان هرمزگان، بندرعباس

2- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: nekoomal1358@gmail.com

چکیده

تخمین دقیق تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET₀) به‌عنوان بخش مهمی از چرخه هیدرولوژی نقش بسزایی در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی مناطق خشک ایفا می‌کند. در این مطالعه، دقت و قابلیت مدل سیستم استنتاج انطباقی فازی-عصبی (ANFIS) در تخمین تبخیر-تعرق موردبررسی قرار گرفت. بدین‌منظور، داده‌های هواشناسی در مقیاس زمانی روزانه شامل درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی، کمبود فشار بخار، سرعت باد و تابش خورشیدی مربوط به ایستگاه سینوپتیک شهر میناب استان هرمزگان بین سال‌های 2006 تا 2011 مورداستفاده قرار گرفت. مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده با روش پنمن-مانتیت فائو (PM) 56 به‌عنوان مقادیر مرجع در نظر گرفته شد و در واسنجی مدل ANFIS استفاده گردید. همچنین با استفاده از ورودی‌های مختلف، دقت مدل مذکور با مدل‌های تجربی از قبیل هارگریوز-سامانی (HS) و بلانی-کریدل (BC) مقایسه شد. به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های ANFIS، HS و BC از آماره‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین (R²) جهت مقایسه با روش استاندارد پنمن-مانتیت فائو استفاده گردید. نتایج نشان داد که در بین روش‌های به‌کار گرفته‌شده در این مطالعه، مدل ANFIS روش مناسب‌تری جهت تخمین ET₀ در منطقه میناب هست و ترکیب با 6 ورودی (با 3 تابع عضویت و مدل گوسی ترکیبی)، با مقادیر آماری R²=0/99، MAE= 0/03 (میلی‌متر بر روز) و RMSE= 0/04 (میلی‌متر بر روز) نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده است. همچنین در این تحقیق ترکیب با 2 ورودی (با 3 تابع عضویت و مدل گوسی ترکیبی) برای ایستگاه‌هایی که فقط عامل دما را اندازه‌گیری می‌کنند، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: بلانی-کریدل، پنمن-مانتیت فائو، تبخیر-تعرق گیاه مرجع، هارگریوز-سامانی

Determination of the Best Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Model for Estimating Grass Reference Crop Evapotranspiration in Coastal Semi-arid Climate of Hormozgan

M Nekooamal Kermani^{1*}, R Mirabbasi Najafabadi²

Received: 8 December 2013 Accepted: 19 January 2016

1- M.Sc of Water Engineering, Meteorology Research Center of Hormozgan Province, Bandar Abbas, Iran

2- Assistant Professor, Department of Water Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*Corresponding Author, Email: nekooamal1358@gmail.com

Abstract

Accurate estimation of reference crop evapotranspiration (ET_o) plays an important role in water resources management and planning in dry regions. In this study, accuracy and ability of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) in estimating ET_o was evaluated. Daily meteorological data, including air temperature, relative humidity, sunshine hours, vapor pressure deficit, wind speed and solar radiation of Minab synoptic station, Hormozgan province, during 2006 to 2011 were used for modeling. The evapotranspiration values estimated by the FAO-56 Penman-Monteith equation (PM) were considered as the reference values for calibrating ANFIS model. The performance of the developed model with different input combinations was also compared with the empirical models, namely, Hargreaves-Samani (HS) and Blaney-Criddle (BC). The root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE) and the coefficient of determination (R²) were used for comparing the results of ANFIS, HS and BC methods with reference method (FAO-56 Penman-Monteith equation). The results showed that the ANFIS was a more appropriate method for estimating the ET_o in Minab and this model with 6 inputs (with 3 membership functions and Gaussian mixture model) had a better performance than the other considered methods with the R², MAE and RMSE values of 0.99, 0.03 (mm day⁻¹) and 0.04 (mm day⁻¹), respectively. Also, the ANFIS model with 2 inputs (with 3 membership functions and Gaussian mixture model) was the best model for the stations which had only the measured temperature data.

Keywords: Blaney-Criddle, FAO-56 Penman-Monteith, Hargreaves-Samani, Reference crop evapotranspiration

تولید نماید (علیزاده 1381). تبخیر- تعرق یکی از بخش‌های مهم سیکل هیدرولوژی است و تخمین دقیق این پارامتر به منظور مطالعاتی نظیر بیلان آبی، مدیریت و طراحی سیستم‌های آبیاری و مدیریت منابع آب موردنیاز است (لینسلی 1982). این دو پدیده هر دو ماهیت تبخیری داشته و چون تفکیک آن‌ها از یکدیگر امکان‌پذیر نیست، مجموعاً به نام تبخیر- تعرق (ET) در نظر گرفته می‌شود

مقدمه

انتقال آب از سطح خاک به هوا را تبخیر و خارج شدن آن از روزنه‌های گیاه را تعرق گویند. منظور از تعیین تبخیر و تعرق، برآورد مقدار آبی است که باید به یک پوشش زراعی داده شود تا گیاه در طول دوره رویش صرف تبخیر و تعرق نموده و بدون آنکه با کم‌آبی مواجه شود، رشد خود را تکمیل و بیشینه مقدار محصول را

بین متغیرها برقرار کنند، می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) و عصبی- فازی (ANFIS) اشاره نمود. این روش‌ها در دهه‌های اخیر توسط محققان بسیاری موردسنجش و تأیید قرار گرفته‌اند. کرم‌الدینی و همکاران (2011) دقت و توانایی مدل ANFIS را در تخمین تبخیر- تعرق بررسی نمودند. ایشان مقدار این پارامتر را با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمان و لایسیمتر و روش‌های ANFIS، هارگریوز-سامانی، ایرماک، پرستلی- تیلور، مک کینگ و لینارک محاسبه و با یکدیگر مقایسه نمودند و به این نتیجه رسیدند که مدل ANFIS با چهار ورودی (درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی) و مقادیر $R^2=0/99$ و خطای (RMSE) 0/28 میلی‌متر بر روز بیشترین دقت را داشته است. کومار و همکاران (2012) در منطقه نگار هندوستان با استفاده از داده‌های روزانه متوسط رطوبت نسبی، تابش خورشیدی، متوسط دما و سرعت باد، مقدار تبخیر را با استفاده از روش شبکه‌های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) تخمین زدند. ایشان پس از مقایسه نتایج حاصل با مقادیر تبخیر اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر، نتیجه گرفتند که هر دو مدل با دقت خوبی میزان تبخیر را تخمین زده‌اند، ولی مدل ANFIS نتایج نسبتاً بهتری نسبت به مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی داشت. کوچکزاده و بهمنی (1384) از شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت برآورد ETo استفاده کردند. ایشان همچنین چند روش دیگر شامل بلانی- کریدل، جنس- هیز اصلاح شده و هارگریوز- سامانی را با روش PM مقایسه کردند. نتایج حاصل نشان داد که شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌تواند در مقایسه با سایر روش‌ها از دقت بالاتری برخوردار باشد. شایان‌نژاد (1385) دقت روش‌های شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش پنمن- مانتیث فائو (PM) را در تخمین ETo با داده‌های لایسیمتری ایستگاه همدان مورد ارزیابی قرار داد. نتایج نشان داد که روش شبکه‌های عصبی مصنوعی خطای کمتری نسبت به روش PM

(آلن و همکاران 1998). چون تعیین ET واقعی گیاه موردنظر کار بسیار دشواری است و معمولاً نتایج مطلوبی را به‌دنبال ندارد، به‌همین منظور از نمایه تبخیر- تعرق مرجع (ETo) به‌عنوان توان بیشینه تبخیری در محل استفاده می‌شود. پس از برآورد ETo و ضرب آن در ضریب گیاهی می‌توان تبخیر- تعرق پتانسیل واقعی را به‌دست آورد. به‌طورکلی از دو روش مستقیم و غیرمستقیم جهت اندازه‌گیری تبخیر- تعرق گیاه استفاده می‌شود. در روش مستقیم از دستگاهی به‌نام لایسیمتر استفاده می‌شود. نصب و نگهداری این دستگاه پرهزینه است. لذا در دهه‌های اخیر، از روش‌های غیرمستقیم جهت تعیین تبخیر- تعرق استفاده می‌گردد. تاکنون چندین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع توسط محققان توسعه داده شده است که از جمله می‌توان به روش‌های بلانی- کریدل و هارگریوز- سامانی اشاره نمود. روشن و همکاران (1390)، فرهودی و شمسی‌پور (1379) و بیات ورکشی و همکاران (1388) از این روش‌ها جهت برآورد تبخیر- تعرق استفاده نموده‌اند. یکی از روش‌های مورد تأیید سازمان خواروبار جهانی (FAO)، فرمول پنمن- مانتیث فائو 56 (PM) هست. این روش بر اساس ارتباط بین پارامترهای هواشناسی و ETo پایه‌گذاری شده است. بسیاری از محققان، برتری این روش را نسبت به سایر روش‌های ترکیبی و تجربی بیان کرده‌اند (اسمیت و همکاران 1997، پرییرا و پریوت 2004، برینجینا و گاولین 2005، لویز و همکاران 2006، گاولین و همکاران 2007، بین و همکاران 2008 و رحیمی خوب 2010). تحقیقات زیادی در سال‌های گذشته جهت برآورد تبخیر- تعرق توسط این روش صورت گرفته است. پرییرا و همکاران (2006)، بین و همکاران (2008) و رحیمی خوب (2010) مدل پنمن- مانتیث را به‌عنوان روش مرجع مورد استفاده قرار داده‌اند. برای یافتن رابطه‌ای بین ETo و متغیرهای هواشناسی، می‌توان از روابط غیرخطی استفاده نمود (کیسی 2006، مقدم‌نیا و همکاران 2009). از روش‌هایی که قادرند روابط غیرخطی

روش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) را جهت تخمین ETo، در مقابل روش PM با استفاده از داده‌های لایسیمتری دانشگاه شیراز مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که این روش با مقادیر $R^2=0/99$ و $RMSE=0/05$ میلی‌متر بر روز در مقابل روش PM، نتایج بهتری در برداشت. انگبینی و هنربخش (1389) مقادیر تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با استفاده از روش‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) در مقایسه با روش پنمن-مانتیث فائو (PM) محاسبه و نتیجه گرفتند که روش ANFIS جهت برآورد این پارامتر مناسب‌تر از روش ANN هست. انصاری و مرادی (1389) مدلی فازی جهت برآورد ETo ساعتی با کم‌ترین داده‌های ورودی در سراسر کشور ایران ارائه نمودند. مقایسه نتایج حاصل با داده‌های لایسیمتر نشان داد که مدل فازی می‌تواند با تنها یک ورودی (دما)، ETo را با دقت بالایی ($R^2=0/95$) و $RMSE=0/07$ میلی‌متر بر روز) تخمین بزند. شادمانی و معروفی (1390) با استفاده از آمار روزانه ایستگاه هواشناسی کرمان و روش‌های رگرسیون خطی، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) و استیفنز-استوارت مقادیر تبخیر را محاسبه نمودند. داده‌های ورودی شامل متوسط دما، فشار، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد بود. نتایج حاصل از روش‌های مختلف با داده‌های تشت تبخیر مقایسه گردید و مشخص شد که مقادیر برآورد شده توسط روش ANFIS از دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های مورد استفاده برخوردار بود ($R^2=0/85$) و $RMSE=1/61$ میلی‌متر بر روز). مساعدی و قبائی (1390) مقادیر تبخیر روزانه از تشت تبخیر در شیراز را با روش‌های ANFIS، استیفنز-استوارت و ماکیانو محاسبه نمودند. پس از مقایسه خروجی‌های مختلف مشخص گردید که روش ANFIS با مقادیر $R^2=0/95$ و $RMSE=1/34$ میلی‌متر بر روز بهترین روش جهت برآورد تبخیر در این منطقه هست. هدف از مطالعه حاضر،

داشت. عصارى و همکاران (1388) تبخیر- تعرق گیاه مرجع را با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی در محیط گلخانه شبیه‌سازی کردند. ایشان نتایج این روش را با داده‌های میکرو لایسیمتر واقع در گلخانه مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که این روش با داده‌های ورودی تابش، دمای کمینه، دمای بیشینه، ساعت آفتابی و فشار بخار واقعی می‌تواند تخمین مناسبی از ETo در گلخانه داشته باشد. صیادی و همکاران (1388) روش شبکه‌های عصبی با تابع پایه شعاعی (RBF) و شبکه‌های پرسپترون چند لایه (MLP) را به‌طور ماهانه در مقابل روش PM در ایستگاه تبریز مورد مقایسه قرار دادند. با بررسی انجام‌شده مشخص گردید که می‌توان تنها با استفاده از دو پارامتر میانگین دما و سرعت باد، تبخیر- تعرق را با دقت قابل قبولی ($R^2=0/98$ و $RMSE=0/05$ میلی‌متر بر روز) تخمین زد. مفتاح هلقی و همکاران (1388) با استفاده از آمار روزانه ایستگاه هواشناسی گنبد و روش سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) مقادیر تبخیر را محاسبه کردند. نتایج حاصل پس از مقایسه با مقادیر تشت تبخیر نشان داد که این روش دارای دقت بسیار بالایی جهت تخمین تبخیر در منطقه هست. زارع ایبانه و همکاران (1388) در منطقه همدان و با استفاده از آمار روزانه هواشناسی مقادیر تبخیر- تعرق را با روش‌های ANN و ANFIS محاسبه و با داده‌های لایسیمتر مقایسه کردند. داده‌های ورودی شامل دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی بودند. نتایج این تحقیق نشان داد که هر دو روش به‌خوبی مقادیر ETo را تخمین زده‌اند و هیچ تفاوت معنی‌داری بین دو روش وجود ندارد، اما روش ANFIS کمی بهتر است. بیات و ورکنشی و همکاران (1388) جهت محاسبه ETo در منطقه همدان از چهار روش PM، بلانی کریدل، ANN و ANFIS استفاده کردند. نتایج با داده‌های لایسیمتری مقایسه گردید و مشخص گردید که روش ANN با ضریب همبستگی 0/95 و با آرایش 1-3-6 بهترین عملکرد را در برآورد ETo داشته است. قبائی سوق و همکاران (1389)

هوا، دمای تر، دمای بیشینه، بارندگی و دمای سطح خاک) اندازه‌گیری شده در این ایستگاه به‌عنوان اطلاعات اولیه انتخاب و پس از تعیین همبستگی با تبخیر - تعرق خروجی از مدل پنمن - مانتیث فائو (PM)، فقط 6 پارامتر (جدول 2) که دارای بالاترین ضریب همبستگی بودند، انتخاب شدند. این پارامترها شامل میانگین دمای هوا (T)، میانگین رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین (U_2)، ساعات آفتابی (N)، کمبود فشار بخار اشباع ($e_a - e_d$) و تابش خالص روی سطح گیاه (R_n) می‌باشند. سپس جهت تعیین کفایت داده‌ها، از شاخص KMO و آزمون بارتلت در نرم‌افزار SPSS استفاده گردید. شاخص KMO شاخصی از کفایت نمونه‌گیری است که کوچک بودن همبستگی جزئی بین متغیرها را بررسی می‌کند و از این طریق مشخص می‌سازد که آیا تعداد داده‌های موردنظر برای تحلیل عاملی کافی هستند یا خیر؟ این شاخص در دامنه صفر تا یک قرار دارد و اگر مقدار شاخص بزرگ‌تر از 0/6 باشد، تعداد داده‌های موردنظر مناسب است (مومنی و فعال قیومی 1387). نواقص آماری عمدتاً مربوط به دما، ساعات آفتابی و رطوبت بودند. جهت بازسازی داده‌های گم‌شده از روش همبستگی و ایجاد رگرسیون خطی با ایستگاه‌های مجاور (ودان، جاسک، کهنوج و بندرعباس) استفاده گردید.

روش‌های مورد استفاده

روش‌های ترکیبی و تجربی

در این مقاله، از روش ترکیبی پنمن - مانتیث فائو و روش‌های تجربی بلانی - کریدل (1950) و هارگریوز - سامانی (1982) استفاده گردیده است که به‌ترتیب در فرمول‌های 1، 4 و 5 آورده شده‌اند. فرمول محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع با روش پنمن - مانتیث فائو به صورت زیر می‌باشد (آلن و همکاران 1998):

$$ET_o = \frac{0.408D(R_n - G) + g[890/(T + 273)]U_2(e_a - e_d)}{D + g(1 + 0.34U_2)} \quad [1]$$

بررسی کارآمدی سیستم استنتاج انطباقی فازی - عصبی (ANFIS) در تخمین تبخیر - تعرق گیاه مرجع در منطقه میناب در مقایسه با روش مینای پنمن - مانتیث فائو (PM) و تعیین بهترین مدل ANFIS هست. همچنین دقت مدل مذکور با مدل‌های تجربی از قبیل هارگریوز - سامانی (HS) و بلانی - کریدل (BC) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. ارائه مدلی که بتواند تنها با پارامتر دما، ET_o را به‌خوبی تخمین بزند، از دیگر اهداف مطالعه حاضر بوده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

داده‌های مورد استفاده در این مطالعه مربوط به ایستگاه سینوپتیک میناب، واقع در مجاورت شهرستان میناب استان هرمزگان، با موقعیت جغرافیایی 27 درجه و 6 دقیقه عرض شمالی و 57 درجه و 5 دقیقه طول شرقی و ارتفاع 15 متر از سطح دریا است. بر اساس روش دومارتن، این شهرستان دارای آب‌وهوای خشک با تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های نسبتاً معتدل هست. مشخصات اقلیمی این شهرستان در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- پارامترهای هواشناسی ایستگاه میناب (دوره آماری 2006-2011).

پارامتر	مقدار
متوسط کمینه دما ($^{\circ}C$)	13/4
متوسط بیشینه دما ($^{\circ}C$)	40/3
متوسط دمای روزانه ($^{\circ}C$)	28/1
بیشینه سرعت باد (ms^{-1})	20/0
متوسط رطوبت نسبی (%)	77/3
متوسط بارش سالانه (mm)	192/5
متوسط تبخیر سالانه از تشت (mm)	2403/9

جهت انجام این مطالعه از دوره آماری شش‌ساله (2006 لغایت 2011) در مقیاس روزانه استفاده گردید. در ابتدا 11 پارامتر هواشناسی (شامل میانگین دمای هوا، میانگین رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی، کمبود فشار بخار اشباع، تابش خالص روی سطح گیاه، فشار

را نسبت به روش پنمن - مانیتث حفظ کرده است. تبخیر - تعرق گیاه مرجع با روش هارگریوز - سامانی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$ET_o = 0.0162 (Kt) \cdot Ra \cdot (TD)^{0.5} (T + 17.8) \quad [5]$$

$$Kt = 0.075 \left(\frac{S}{TD} \right) \quad [6]$$

که در آن، T میانگین دمای روزانه (°C)، ETo تبخیر - تعرق گیاه مرجع چمن (mmday⁻¹)، S درصد ساعات تابش آفتاب، TD تفاوت متوسط دمای بیشینه و کمینه روزانه (°C) و Ra تابش برون زمینی (میلی‌متر) است.

روش سیستم استنتاجی انطباقی فازی-عصبی (ANFIS)

در این مطالعه، از منطق فازی برای پیوسته کردن متغیرهای ورودی به شبکه، که شامل اطلاعات مربوط به فرایند تبخیر - تعرق هست، استفاده شد. این سیستم نوعی شبکه انطباقی چندلایه، متشکل از عناصر اصلی و توابع سیستم‌های منطق فازی است. در مجموع سیستم ANFIS متشکل از ساختار 5 لایه با تعدادی متغیر ورودی است که هر ورودی دو یا چند تابع عضویت دارد. شکل 1 نمونه‌ای از شبکه ANFIS شامل دو ورودی v و d، یک خروجی f و دو قانون را نشان می‌دهد که قوانین آن به صورت روابط 7 و 8 ارائه شده است.

$$\text{IF } (v) \text{ IS } (V_1) \text{ AND } (d) \text{ IS } (D_1) \text{ THEN } f = P_1v + Q_1d + r_1 \quad [7]$$

$$\text{IF } (v) \text{ IS } (V_2) \text{ AND } (d) \text{ IS } (D_2) \text{ THEN } f = P_2v + Q_2d + r_2 \quad [8]$$

ساختار مناسب ANFIS متناسب با داده‌های ورودی، نوع توابع عضویت ورودی و خروجی، قوانین و تعداد توابع عضویت انتخاب می‌گردد. روش آزمون اصلی در این سیستم، روش پسرانتشار خطا¹ است که در ترکیب با کمترین مربعات خطا، روش ترکیبی هیبرید به دست می‌آید. پس از محاسبه خطا، مقدار خطا به سمت ورودی‌ها پخش و پارامترها تصحیح می‌شوند (شادمانی و معروفی 1390). در ANFIS قوانین ثابت هست و آنچه

که در آن ETo تبخیر - تعرق گیاه مرجع (mmday⁻¹)، Rn تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJm⁻²day⁻¹)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (°C)، U₂ سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (ms⁻¹)، e_a - e_d کمبود فشار بخار در ارتفاع 2 متری (kPa)، D شیب منحنی فشار بخار (kPaC⁻¹)، g ضریب رطوبتی (kPaC⁻¹) و G شار گرما به داخل خاک (MJm⁻²day⁻¹) می‌باشند. در رابطه بالا e_d و e_a به ترتیب از روابط 2 و 3 محاسبه می‌گردند.

$$e_a = 0.611 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \quad [2]$$

$$e_d = 0.611 \exp \left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right) \quad [3]$$

که در آن T و T_{min} به ترتیب متوسط دمای هوا و کمینه دمای هوا (°C) می‌باشند. در این مطالعه، به علت عدم دسترسی به لایسیمتر جهت برآورد دقیق پارامتر تبخیر - تعرق و همچنین با توجه به تأیید روش پنمن - مانیتث فائو 56 به عنوان یکی از روش‌های پایه جهت محاسبه تبخیر - تعرق گیاه مرجع، از این روش به عنوان روش مبنا جهت مقایسه سایر روش‌ها استفاده گردیده است (رحیمی خوب 2010).

به علت پیچیدگی‌های معادله پنمن - مانیتث، متخصصان سعی کرده‌اند، با استفاده از رابطه چند پارامتر اساسی با تبخیر - تعرق، یک سری روابط تجربی به دست آورند. در این مقاله، از دو روش بلانی - کریدل اصلاح شده و روش هارگریوز - سامانی استفاده شده است. روش بلانی - کریدل اصلاح شده در معادله 4 ارائه شده است.

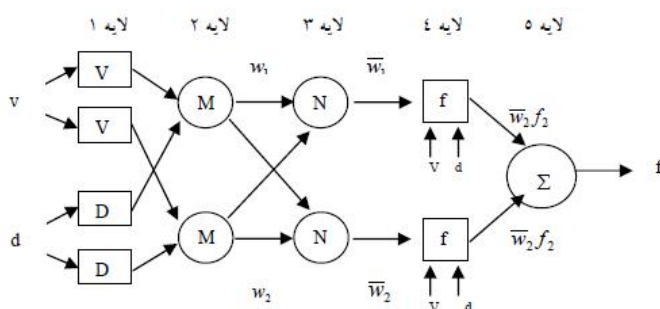
$$ET_o = a + b[P(0.46T + 8.13)] \quad [4]$$

که در آن، ETo تبخیر - تعرق گیاه مرجع (mm day⁻¹)، P ضریب مربوط به طول روز (درصد)، T متوسط ماهانه درجه حرارت (°C) و a و b ضرایب اقلیمی هستند. با توجه به بررسی‌های FAO 56 در بسیاری از ایستگاه‌های کم - آمار (مانند کشور ایران) روش بلانی - کریدل برتری خود

به‌عنوان تابع خروجی استفاده گردید. برای تخمین ET_o با توجه به تعداد ترکیبات ورودی و نوع تابع عضویت، در مجموع 48 آرایش مختلف اجرا گردید و از قانون آزمون ترکیبی استفاده شد.

بهینه‌سازی می‌شود توابع عضویت است (کریم‌الدینی 2011).

در این مطالعه، از جعبه ابزار نرم‌افزار MATLAB جهت اجرای برنامه ANFIS استفاده شده است. توابع عضویت مثلثی، ذوزنقه‌ای، زنگوله‌ای عمومی و گوسین ترکیبی به‌عنوان توابع ورودی و توابع عضویت خطی



شکل 1- ساختار مدل ANFIS با دو ورودی و یک خروجی (جانگ 1993).

در روابط بالا n تعداد داده‌ها، ET_o مقدار تبخیر - تعلق محاسبه‌شده از روش مرجع (معادله پنم - مانتیث)، ET_a میانگین تبخیر - تعلق پنم - مانتیث فائو و ET_m تبخیر - تعلق حاصل از هریک از روش‌های تجربی هست. R_r در معادله 12، نشان‌گر نسبت بین تبخیر - تعلق محاسبه‌شده از هریک از روش‌ها با تبخیر - تعلق مرجع هست. رحیمی‌خوب (2010) نیز از این معادله استفاده کرده است. در نهایت با ترسیم نتایج نمودار رگرسیونی مطابق مدل خطی، مناسب بودن عملکرد روش به‌کار رفته، ارزیابی گردید. در مدل‌های خطی $Y=A+BX$ هرچه ضریب عرض از مبدا (A) به صفر و شیب خط (B) به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده مطلوب‌تر بودن مدل است (رضائی 1383 و ایرمارک و همکاران 2003).

تحلیل حساسیت

برای تعیین میزان تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای ورودی بر مقدار تغییرات متغیر خروجی، تحلیل حساسیت انجام می‌گیرد. در تحلیل حساسیت، با تغییر یک متغیر ورودی در دامنه موردقبول و ثابت نگه‌داشتن

معیارهای ارزیابی نتایج

به‌منظور ارزیابی عملکرد روش‌های ANFIS، HS و BC با روش استاندارد پنم - مانتیث فائو (PM)، از آماره‌های متداول سنجش خطا از قبیل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و ضریب تبیین (R^2) استفاده شده است. آماره‌های مذکور در معادلات 9 تا 11 ارائه شده‌اند. هرچه آماره‌های مربوط به خطا به صفر و ضریب تبیین به 1 نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل مورد بررسی به روش مرجع نزدیک‌تر خواهد بود. مهاوش (2011)، ترائر و همکاران (2008) و کریم‌الدینی و همکاران (2011) از این آماره‌ها جهت تعیین عملکرد مدل‌های تبخیر - تعلق استفاده نموده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum [ET_o - Tm]^2} \quad [9]$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum |ET_o - Tm| \quad [10]$$

$$R^2 = \frac{\hat{a} [ET_o - ET_a]^2 - \hat{a} [ET_o - ET_m]^2}{\hat{a} [ET_o - ET_a]^2} \quad [11]$$

$$R_r = \frac{ET_m}{ET_o} \quad [12]$$

خرداد تا 10 تیر) به مقدار 9/84 میلی‌متر در روز هست. با بررسی پارامترهای اقلیمی مربوط به این ماه که در شکل 2 آورده شده است، می‌توان این مقدار تبخیر-تعرق را تحت تأثیر افزایش دما، کمبود فشار بخار، سرعت باد، ساعات آفتابی، تابش و کاهش رطوبت نسبی دانست. بر طبق جدول 2، همبستگی بالا بین دما و کمبود فشار بخار با تبخیر-تعرق در منطقه به‌خوبی نشان می‌دهد که بیشترین تأثیر بر تغییرات ET_0 مربوط به این دو عامل هست. همچنین کم‌ترین میزان ET_0 مربوط به ماه ژانویه (12 دی تا 10 بهمن) به‌میزان 3/65 میلی‌متر در روز است که می‌توان آن را تحت تأثیر کاهش دما، کمبود فشار بخار، سرعت باد، ساعات آفتابی، تابش و افزایش رطوبت نسبی دانست.

در روش ANFIS داده‌های ورودی به مدل به سه دسته تقسیم می‌گردند:

1- داده‌های آموزش

2- داده‌های آزمون

3- داده‌های اعتبارسنجی

در این مطالعه، 60% داده‌های کل به مرحله آموزش و 40% باقی‌مانده به‌طور مساوی بین مراحل آزمون و اعتبارسنجی تقسیم گردید. بر اساس جدول 3 شش ترکیب ورودی برای مدل ANFIS در نظر گرفته شد.

جدول 3- ترکیب‌های مختلف داده‌های ورودی به ANFIS.

پارامترها	شماره ترکیب
T	1
$e_a - e_d$, T	2
R_n , $e_a - e_d$, T	3
RHavg, R_n , $e_a - e_d$, T	4
N, RHavg, R_n , $e_a - e_d$, T	5
U_2 , N, RHavg, R_n , $e_a - e_d$, T	6

جدول 4 نتایج آماری بهترین مدل برای ترکیب‌های مختلف ورودی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، با کاهش ورودی‌ها (از شش ورودی به 1 ورودی) میزان خطا افزایش یافته و

سایر متغیرها، نسبت به برآورد مقدار متغیر خروجی اقدام می‌گردد. درصد تغییرات متغیر خروجی، نشان‌گر میزان اهمیت متغیر ورودی مربوطه هست (طبری و همکاران 2010، شادمانی و معروفی 1390).

نتایج و بحث

در این مطالعه، جهت تعیین تبخیر-تعرق توسط روش ANFIS، با توجه به دوره آماری مذکور، در کل 2190 رکورد داده جهت مدل‌سازی تبخیر-تعرق جمع-آوری گردید. جدول 2 نتایج حاصل از اجرای نرم‌افزار SPSS در تعیین ارتباط بین متغیرهای وابسته و متغیر مستقل (ET_0) بر اساس ضریب همبستگی پیرسون، برای انتخاب متغیرهای مختلف ورودی را نشان می‌دهد.

جدول 2- همبستگی بین پارامترهای ورودی و

تبخیر-تعرق در روش ANFIS.

پارامتر	U_2	N	RHavg	R_n	$e_a - e_d$	T
ET_0	0/41	0/44	-0/46	0/74	0/8	0/91

بر اساس جدول 2 بیشترین ضریب همبستگی مربوط به متوسط دما (T) و پس‌از آن کمبود فشار بخار ($e_a - e_d$) و تابش خالص (R_n) هست. درحالی‌که کم‌ترین ضریب همبستگی مربوط به سرعت باد در ارتفاع 2 متری از سطح زمین (U_2) در منطقه است. ضریب همبستگی منفی رطوبت نسبی، نشان‌دهنده وجود رابطه عکس بین این پارامتر و تبخیر-تعرق هست (با افزایش رطوبت نسبی ET_0 کاهش می‌یابد). با کاهش رطوبت میزان آب موجود در لایه‌های نزدیک سطح گیاه کم می‌شود، این امر موجب افزایش کمبود فشار بخار اشباع می‌گردد. در نتیجه، کمبود رطوبت توسط تبخیر از سطح گیاه برطرف می‌شود. شادمانی و معروفی (1390) نیز به رابطه عکس رطوبت و تبخیر اشاره نموده‌اند.

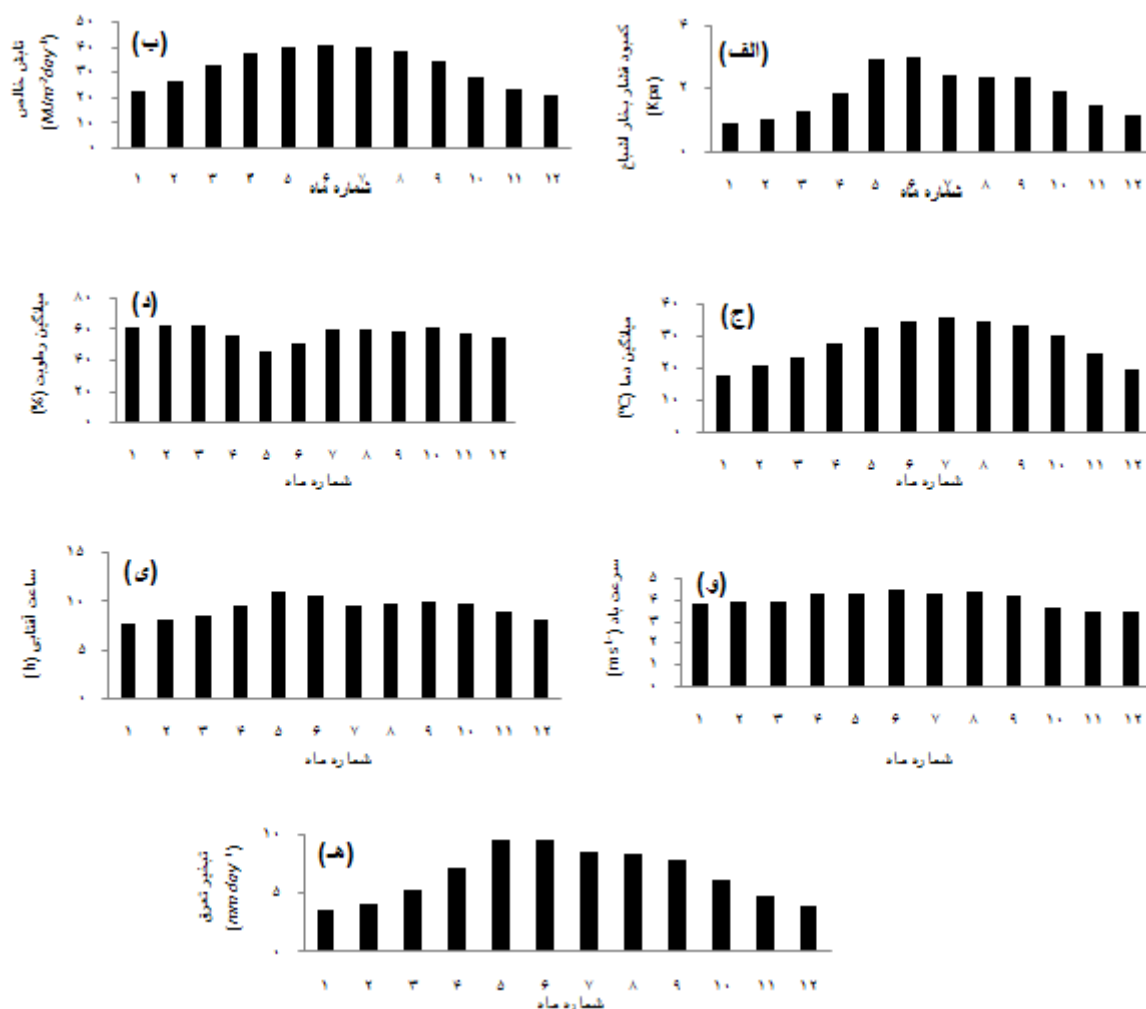
شکل 2 میزان تبخیر-تعرق ماهانه شهرستان میناب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود بیشترین میزان ET_0 مربوط به ماه ژوئن (12

از آنجائی که در این تحقیق ترکیب شماره 2 بر اساس تنها پارامتر دما و ترکیب شماره 6 بهترین نتایج را حاصل کرده است، به طور جداگانه این دو ترکیب در مراحل آزمون و اعتبارسنجی مورد بررسی بیشتری قرار داده شدند. جدول‌های 6 و 7 نتایج مربوط به ترکیب شماره 2 و 6 را نشان می‌دهند.

همان‌طور که در جدول 5 نشان داده شده است، ساختار گوسی ترکیبی با آرایش 3 تابع عضویت، بهترین مدل در روش ANFIS برای تعیین ET_0 بر اساس پارامتر دما (ترکیب شماره 2) هست. بر اساس جدول 6، مقادیر R^2 ، MAE و RMSE در مرحله آزمون به ترتیب 0/88 و 0/64 میلی‌متر بر روز و 0/87 میلی‌متر بر روز و به دنبال آن در مرحله اعتبارسنجی $R^2=0/89$ ، MAE=0/66 و RMSE=0/92 میلی‌متر بر روز می‌باشند. این در حالی است که بر اساس این جدول تابع عضویت دوزنقه‌ای با مقادیر $R^2=0/84$ ، MAE=0/77 و RMSE=1 میلی‌متر بر روز در مرحله آزمون و $R^2=0/85$ ، MAE=0/87 و RMSE=1/02 میلی‌متر بر روز در مرحله اعتبارسنجی، نامناسب‌ترین مدل در روش ANFIS جهت برآورد تبخیر - تعرق هست.

شکل 3 نمودار پراکنش مقادیر تبخیر - تعرق محاسبه شده با روش مرجع (PM) و محاسباتی توسط ANFIS را در ساختار گوسی ترکیبی، برای ترکیب 2 در مرحله اعتبارسنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود برازش مناسبی ($R^2=0/89$) بین مقادیر روش مرجع و برآورد شده حاصل گردیده است. شکل مربوطه یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که عرض از مبدأ آن 0/06 و شیب خط 0/96 هست. این رابطه به صورت $ET_{OPM}=0/957(ET_{ANFIS})+0/06$ ارائه می‌گردد.

مقادیر R^2 کاهش می‌یابد. بهترین نتایج مربوط به ترکیب شماره 6 (متغیرهای متوسط دما، کمبود فشار بخار، تابش خالص، متوسط رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع 2 متری) و ضعیف‌ترین نتایج مربوط به ترکیب شماره 1 (متغیر دما) بوده است. این روند در مرحله اعتبارسنجی مدل نیز اتفاق افتاده است. اما ترکیب بر مبنای پارامتر دما که همان ترکیب شماره 2 است، نتایج مطلوبی در برآورد ET_0 نشان می‌دهد. این ترکیب با مقادیر $R^2=0/88$ ، MAE=0/64 میلی‌متر بر روز و RMSE=0/87 میلی‌متر بر روز در مناطقی که فقط پارامتر دما اندازه‌گیری می‌شود، می‌تواند با دقت مناسبی ET_0 را محاسبه نماید. اختلاف مقادیر R^2 بین ترکیب‌های شماره 2 و 6 در مرحله آزمون 0/12 و اختلاف MAE و RMSE به ترتیب 0/61 و 0/83 میلی‌متر بر روز هست. به دلیل اینکه ترکیب شماره 6 به عنوان روش مطلوب در نظر گرفته شده است، در نتیجه هرچه اختلاف خطاهای مربوطه، به صفر نزدیک‌تر باشد، نشان‌گر کارایی بهتر ترکیب شماره 2 هست. جدول 5 بهترین ساختارهای درونی مدل ANFIS را برای کلیه ترکیب‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، به جز در ترکیب شماره 1 در بقیه ترکیب‌ها تابع عضویت گوسی ترکیبی و آرایش توابع 3 عضوی برای منطقه میناب به دست آمده است. این نتایج با یافته‌های کریم‌الدینی و همکاران (2011) که تابع گوسی با 2 تابع عضویت جهت تخمین تبخیر، شادمانی و معروفی (1390) تابع گوسی زنگوله‌ای با 3 تابع عضویت جهت برآورد تبخیر (هر دو در منطقه کرمان)، مساعدی و بقایی (1390) تابع گوسین با 3 تابع عضویت جهت تخمین تبخیر در منطقه شیراز و زارع ابیانه و همکاران (1388) تابع گوسی با 2 تابع عضویت را جهت برآورد ET_0 در منطقه همدان گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد.



شکل 2- نمودارهای اقلیمی شهرستان میناب: الف- کمبود فشار بخار اشباع، ب- تابش خالص، ج- میانگین دما، د- میانگین رطوبت نسبی، و- سرعت باد، ی- ساعات آفتابی و ه- تبخیر- تعرق.

جدول 4- نتایج آماری ترکیب‌های مختلف ورودی در تخمین ETo.

مرحله اعتبارسنجی			مرحله آزمون			شماره ترکیب ورودی
R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	
0/73	1/08	1/39	0/66	1/17	1/49	1
0/90	0/66	0/92	0/88	0/64	0/87	2
0/91	0/52	0/76	0/91	0/52	0/76	3
0/91	0/52	0/76	0/92	0/48	0/68	4
0/92	0/50	0/75	0/95	0/39	0/56	5
0/99	0/07	0/14	0/99	0/03	0/04	6

جدول 5- بهترین ساختار ANFIS برای ترکیب‌های مختلف ورودی در تخمین ETo.

شماره ترکیب ورودی	تابع عضویت	تعداد تابع عضویت	آرایش مدل
1	دوزنقه	2	2
2	گوسی ترکیبی	3	3-3
3	گوسی ترکیبی	3	3-3-3
4	گوسی ترکیبی	3	3-3-3-3
5	گوسی ترکیبی	3	3-3-3-3-3
6	گوسی ترکیبی	3	3-3-3-3-3-3

جدول 6- نتایج آماری در مراحل آزمون و اعتبارسنجی برای ترکیب شماره 2.

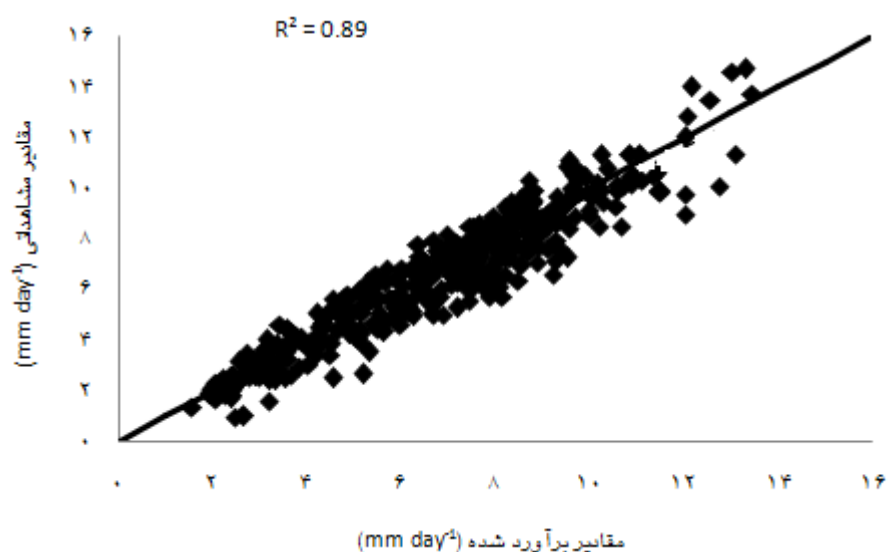
مرحله اعتبارسنجی			مرحله آزمون			آرایش	تابع عضویت
R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mmday ⁻¹)		
0/89	0/66	0/92	0/88	0/64	0/87	3-3	گوسی ترکیبی
0/85	0/87	1/02	0/84	0/77	1/00	3-3	دوزنقه
0/87	0/67	0/95	0/88	0/65	0/87	3-3	زنگوله‌ای عمومی
0/86	0/75	0/99	0/86	0/73	0/96	3-3	مثلثی

جدول 7- نتایج آماری در مراحل آزمون و اعتبارسنجی برای ترکیب شماره 6.

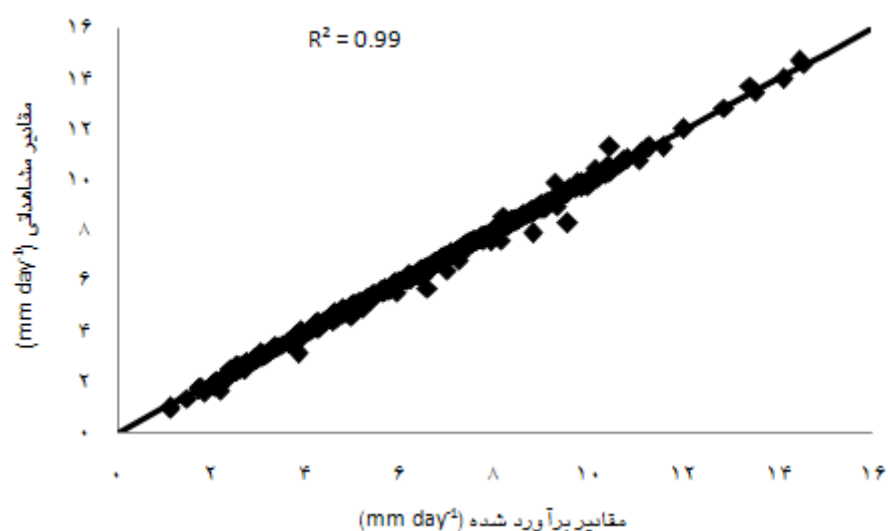
مرحله اعتبارسنجی			مرحله آزمون			آرایش	تابع عضویت
R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	R ²	MAE (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)		
0/99	0/07	0/14	0/99	0/03	0/04	3-3-3-3-3-3	گوسی ترکیبی
0/84	0/46	1/05	0/97	0/28	0/42	3-3-3-3-3-3	دوزنقه
0/98	0/15	0/28	0/99	0/08	0/12	3-3-3-3-3-3	زنگوله‌ای عمومی
0/92	0/36	0/72	0/98	0/22	0/30	3-3-3-3-3-3	مثلثی

تعداد 6 ورودی می‌تواند به خوبی تبخیر- تعرق را برآورد نماید. شکل مربوطه یک رابطه خطی را نشان می‌دهد که عرض از مبدأ آن 0/04 و شیب خط 1 است. این رابطه به صورت $ETo_{PM} = (ETo_{Anfis}) + 0/04$ تعیین گردید. بر اساس موارد ذکر شده ساختار گوسی ترکیبی برای دو ترکیب 2 و 6 بهترین و ساختار دوزنقه‌ای ناکارآمدترین ساختار تعیین گردید.

در شکل 4 نمودار پراکنش مقادیر روش مرجع (PM) و محاسباتی توسط ANFIS در ساختار مثلثی برای ترکیب 6 در مرحله اعتبارسنجی نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، برازش بسیار مناسبی $R^2 = 0/99$ مابین مقادیر مشاهداتی (روش PM) و برآورد شده (ANFIS ترکیب 6) در مرحله اعتبارسنجی حاصل گردیده است. این شکل نشان می‌دهد که مدل با



شکل 3- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی (روش مرجع PM) و برآورد شده (ANFIS) برای ترکیب شماره 2.



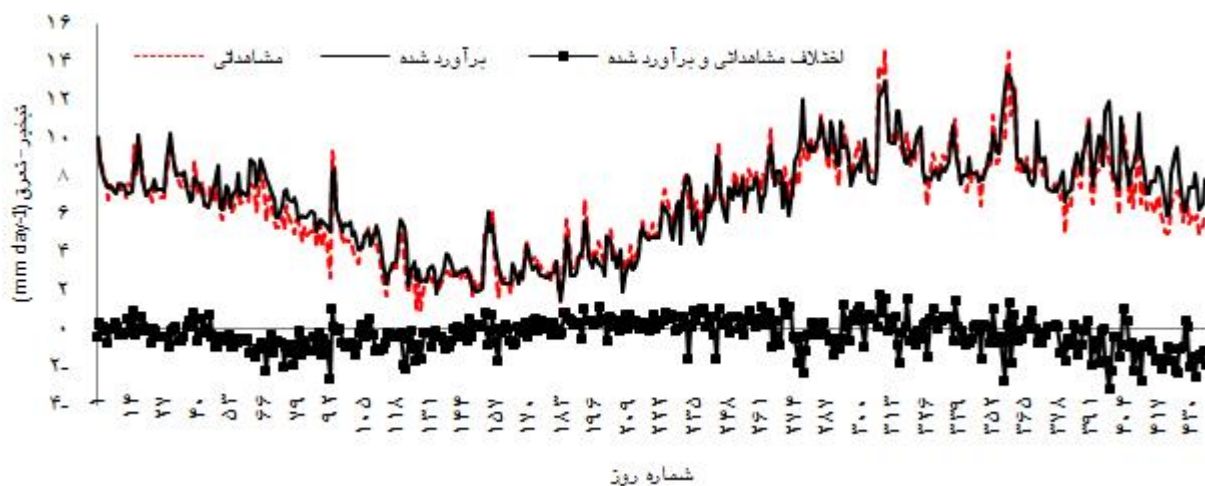
شکل 4- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی (روش مرجع PM) و برآورد شده (ANFIS) برای ترکیب شماره 6.

اساس معادله 12 محاسبه شده است و همان‌طور که قبلاً گفته شد، نشان‌گر نسبت بین تبخیر- تعرق محاسبه شده از هریک از روش‌ها با تبخیر- تعرق مرجع هست. اما مدل در ماه‌های گرم سال (سه ماه تابستان) ET_0 را بیشتر از مقدار مشاهداتی تخمین زده است (بیش‌برآورد)، زیرا مقدار $R_f=1/03$ است. به‌طور متوسط در این ماه‌ها مدل 3% بیشتر از حد انتظار مقدار ET_0 را تخمین می‌زند. همچنین مدل در ماه‌های سرد سال (سه ماه زمستان)

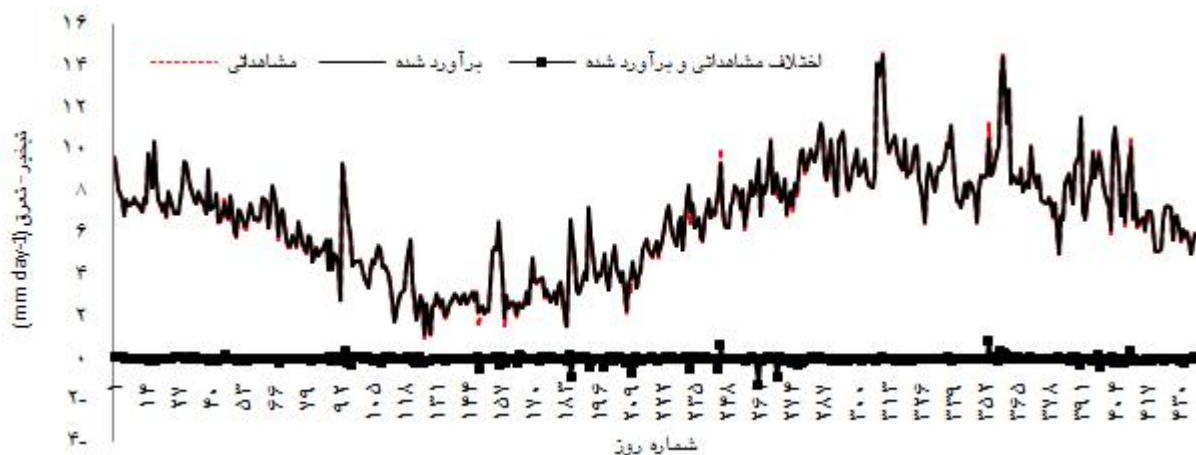
شکل‌های 5 و 6 مقادیر ET_0 محاسبه شده از روش PM و تخمین زده شده از روش ANFIS را نشان می‌دهند. با توجه به معادله 12 (R_f)، می‌توان مقادیر بیشتر (بیش-برآورد) یا کمتر (کم‌برآورد) از مقادیر تخمین زده مشاهداتی (PM) را محاسبه کرد. همان‌طور که در شکل 5 مشاهده می‌شود ترکیب 2 (دو ورودی) با مقدار $R_f=1$ تطابق مناسبی با مقادیر مشاهداتی در طول دوره اعتبارسنجی دارد. قابل‌ذکر است که در اینجا مقدار R_f بر

شکل 6 مقادیر برآورده شده توسط ترکیب 6 (شش ورودی) را در مقابل مقادیر مشاهداتی روش PM در طول دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود ET_o برآورد شده تطابق بسیار خوبی با مقادیر مشاهداتی (روش PM) دارد ($R_r=0/99$) این مدل هم در ماه‌های گرم سال و هم در ماه‌های سرد سال به خوبی مقدار ET_o را تخمین زده است. مقادیر R_r برای ماه‌های گرم و سرد به ترتیب 0/99 و 1/01 است و تأیید می‌نماید که مدل تطابق مناسبی دارد. دلیل این امر در برگرفتن پارامترهای بیشتری از جمله تابش، باد و ساعات آفتابی توسط ترکیب 6 هست. این امر باعث شده است که تأثیر بادهای گرم محلی (لوار) و تابش در تخمین ET_o دیده شود. مطالب مذکور در تطابق کامل با یافته‌های ترائر و همکاران (2008)، رحیمی‌خوب (2010) و تاراکیچ و همکاران (2007) می‌باشند.

ET_o را کمتر از مقدار مشاهداتی تخمین زده است (کم-برآورد)، زیرا مقدار $R_r=0/96$ هست. به‌طور متوسط در ماه‌های سرد مدل 15% مقدار ET_o را کمتر از مقدار مشاهداتی تخمین می‌زند. رحیمی‌خوب (2010) نیز در مقاله خود از شاخص R_r استفاده نموده است. می‌توان دلیل این امر را تأثیر زیاد دما، رطوبت، تابش و بادهای گرم محلی (موسوم به لوار) بر روی تبخیر-تعرق دانست. زیرا در ماه‌های گرم، دما و تابش افزایش و رطوبت کاهش می‌یابد. تغییرات پارامترهای اقلیمی این مطلب را تصدیق می‌نمایند (شکل 2). به دلیل اینکه این ترکیب بر اساس پارامتر دما هست، نتوانسته است تأثیر دیگر پارامترها را نشان دهد. در نتیجه در نقاط بیشینه یا کمینه تبخیر-تعرق، مدل ANFIS نتوانسته است به خوبی عمل نماید. دلیل این موضوع، تغییر ناگهانی در پارامترهای هواشناسی مانند دما، رطوبت و باد است. تغییرات سریع روزانه این پارامترها باعث به وجود آمدن پرش‌های ناگهانی در نمودار ET_o می‌شود.



شکل 5- مقادیر مشاهداتی (PM) و برآورد شده (ANFIS) و اختلاف این دو برای ترکیب شماره 2.



شکل 6- مقادیر مشاهداتی (PM) و برآورد شده (ANFIS) و اختلاف این دو برای ترکیب شماره 6.

روش‌های تجربی

کارآمدی مدل BC را در تخمین ET_0 نشان می‌دهد. به-عنوان نمونه، این و همکاران (2008)، و روشن و همکاران (1390) برتری روش بلانی- کریدل را در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید کرده‌اند.

با بررسی نتایج جدول 9 و با توجه به شکل‌های 4 و 6 می‌توان گفت مدل ANFIS با ساختار گوسی ترکیبی و 3 تابع عضویت و 6 ورودی توانسته است تبخیر- تفرق را در منطقه میناب، در صورت در دسترس بودن کلیه پارامترهای هواشناسی، به‌خوبی تخمین بزند. اما همان‌طور که گفته شد در بسیاری از نقاط ایران دسترسی به کلیه پارامترهای هواشناسی غیرممکن است. در این مطالعه سعی شده روشی مناسب جهت تخمین ET_0 با کم‌ترین پارامترهای اقلیمی معرفی گردد. دو روش HS و ترکیب شماره 2 روش ANFIS، بر اساس پارامتر دما مقادیر ET_0 را برآورد کرده‌اند.

همان‌طور که در جدول 9 مشاهده می‌گردد، روش HS مقادیر ET_0 را $1/092$ میلی‌متر بر روز کمتر از ترکیب شماره 2 و $2/012$ میلی‌متر بر روز کمتر از روش مبنا (PM)، برآورد کرده است. این در حالی است که $R^2=0/68$ نشان می‌دهد که همبستگی مناسبی بین مقادیر مشاهداتی (PM) و روش HS وجود ندارد. شکل 10 کارآیی بهتر ترکیب شماره 2 را نسبت به روش HS نشان می‌دهد.

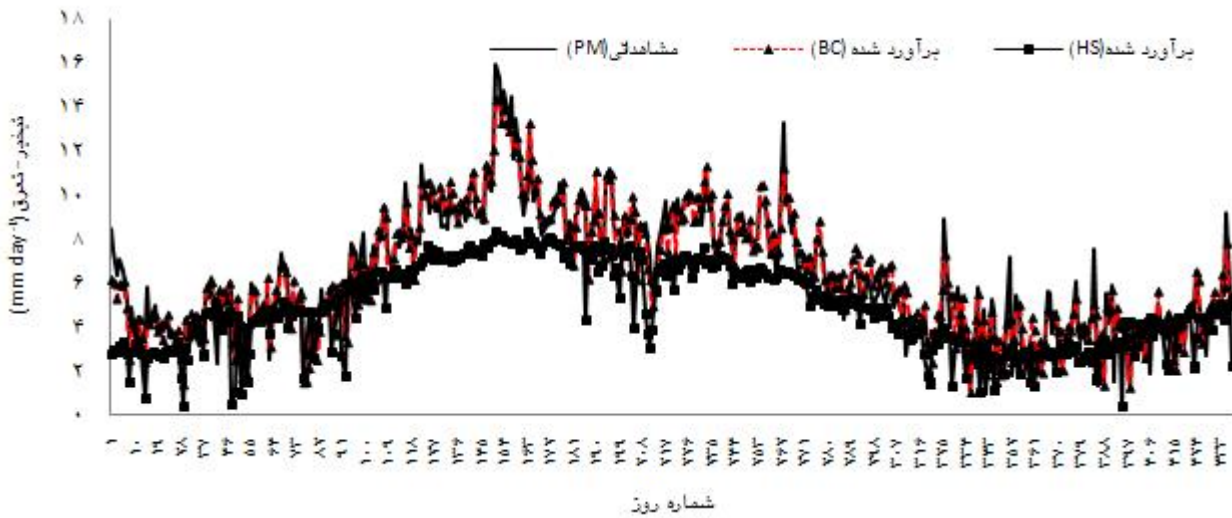
در این مطالعه از دو روش تجربی بلانی- کریدل (BC) و هارگریوز- سامانی (HS) استفاده گردیده است. روش BC مبتنی بر پارامترهای ورودی میانگین دما، سرعت باد، رطوبت کمینه و درصد ابرناکی و روش HS مبتنی بر پارامتر دما می‌باشند. جدول 8 نتایج حاصل از تخمین ET_0 توسط این دو روش را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج این جدول روش BC تخمین بهتری نسبت به روش HS دارد. مقدار R^2 ، RMSE و MAE برای روش بلانی- کریدل به ترتیب $0/93$ ، $0/69$ و $0/51$ میلی‌متر بر روز می‌باشند.

شکل 7 مقادیر ET_0 تخمین زده شده توسط دو روش BC و HS را در مقابل مقادیر مشاهداتی روش PM نشان می‌دهد. با توجه به جدول 8 و مقدار $R_f=1/05$ ، روش BC به‌طور کلی ET_0 را بیشتر از مقدار مشاهداتی تخمین زده است (بیش‌برآورد). اما نزدیکی مقدار R_f به عدد 1 بیان‌گر تطابق مناسب این مدل است. روش HS به‌طور کلی مقدار ET_0 را کمتر از مقدار مشاهداتی برآورد کرده است. این مطلب را مقدار $R_f=0/80$ تأیید می‌کند.

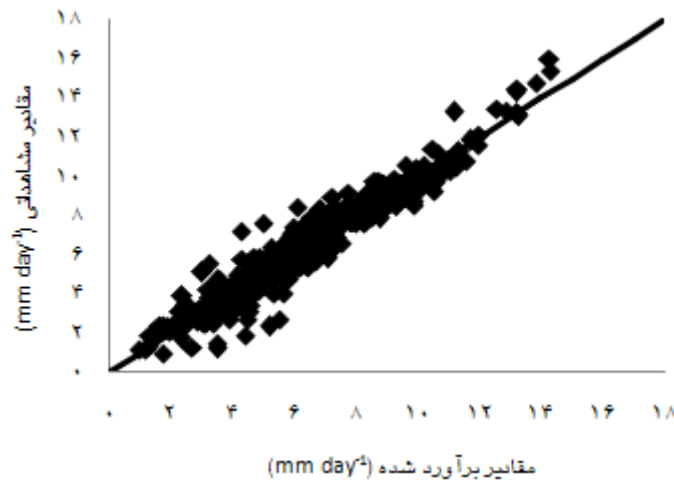
شکل‌های 8 و 9 مقادیر برآورد شده (HS و BC) را در مقابل مقادیر مشاهداتی (PM) نشان می‌دهند. پراکنش نقاط روی خط نیمساز 45 درجه در شکل 8،

جدول 8- نتایج آماری برای روش‌های تجربی BC و HS در تخمین ETo.

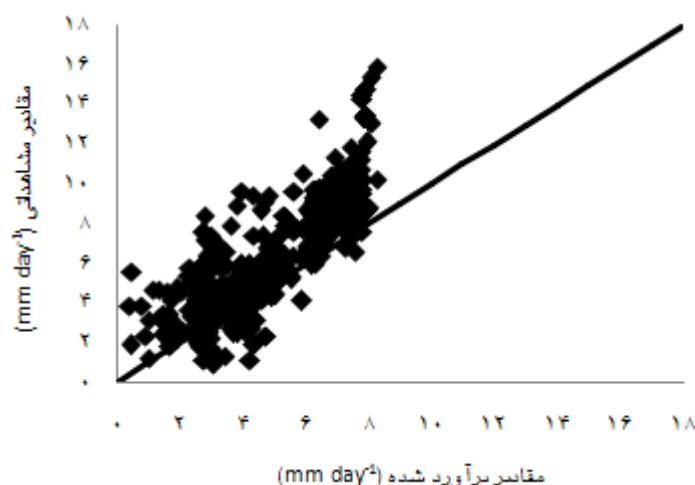
مدل تجربی	RMSE (mmday ⁻¹)	MAE (mmday ⁻¹)	R ²	R _r
بلانی - کریدل	0/69	0/51	0/93	1/05
هارگریوز - سامانی	2/01	1/55	0/68	0/80



شکل 7- نمودار تبخیر- تعرق برآورد شده از دو روش تجربی BC و HS در مقابل تبخیر- تعرق مرجع PM.



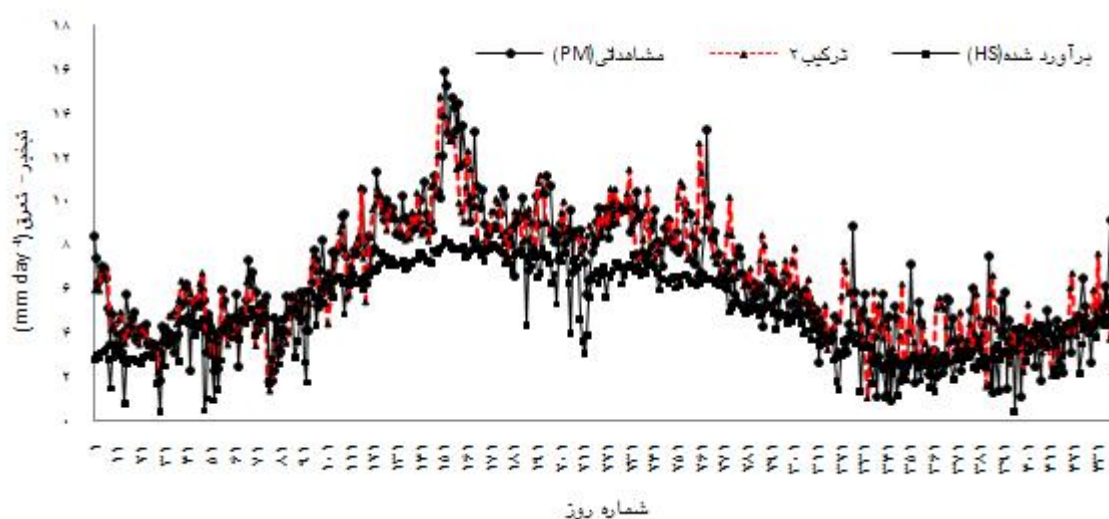
شکل 8- همبستگی بین مقادیر مشاهده‌ای (PM) و برآورد شده (BC) (خط ممتد نیمساز 45 درجه هست).



شکل 9- همبستگی بین مقادیر مشاهداتی (PM) و برآورد شده (HS) (خط مممتد نیمساز 45 درجه هست).

جدول 9- نتایج آماری برای روش‌های تجربی BC و HS و ترکیب‌های 2 و 6 روش ANFIS در تخمین ETo.

نام روش	RMSE (mmday ⁻¹)	MAE (mmday ⁻¹)	R ²
ترکیب 6 ANFIS	0/14	0/07	0/99
بلانی- کریدل	0/69	0/51	0/93
ترکیب 2 ANFIS	0/92	0/66	0/89
هارگریوز- سامانی	2/01	1/55	0/68



شکل 10- نمودار تبخیر- تعرق برآورد شده از روش تجربی HS و ترکیب شماره 2 در مقابل تبخیر- تعرق مشاهداتی PM.

در جدول 10 ارائه گردیده است. این جدول نتایج آزمون واریانس و جدول 11 معنی‌دار بودن میانگین تبخیر- تعرق برآورد شده توسط روش توکی (توکی 1977) را نشان می‌دهد.

جهت بررسی این موضوع که آیا اختلاف معنی‌داری در برآورد تبخیر- تعرق به روش‌های مختلف (ترکیب شماره 6، ترکیب شماره 2، بلانی- کریدل و هارگریوز- سامانی) وجود دارد یا خیر؟ تحلیل‌های آماری مربوطه در نرم‌افزار SPSS صورت گرفت و نتایج

بهترین مدل در شرایطی که فقط پارامتر دما اندازه‌گیری شده باشد، جهت برآورد ETo در منطقه میناب تعیین گردید. کومار و همکاران (2011) کریم الدینی و همکاران (2011)، کیسی و اوزترک (2007)، شادمانی و معروفی (1390)، مساعدی و قبائی (1390)، انگبینی و هنربخش (1389)، زارع ابیانه و همکاران (1388)، بیات ورکشی و همکاران (1388) و انصاری و مرادی (1389)، برتری سیستم استنتاج انطباقی عصبی-فازی (ANFIS) را بر سایر روش‌های تجربی در برآورد تبخیر-تعرق گزارش کرده‌اند.

همان‌طور که از جداول 10 و 11 ملاحظه می‌گردد، اختلاف معنی‌داری در سطح 5 درصد بین تبخیر-تعرق برآورد شده با ترکیب 6، 2 و BC با روش PM وجود ندارد، اما اختلاف بین روش HS با روش PM معنی‌دار است. پس از تحلیل‌های آماری گسترده‌تر بر روی نتایج آزمون به روش توکی، مشخص گردید که بین تبخیر-تعرق برآورد شده از روش HS با سایر روش‌ها اختلاف معنی‌داری وجود دارد. اما بر اساس میانگین اختلاف با روش مینا، ترکیب 6 در مدل ANFIS به‌عنوان بهترین روش و همچنین ترکیب 2 در مدل ANFIS به‌عنوان

جدول 10- نتایج آزمون واریانس روش‌های مختلف.

معنی‌دار بودن	F آزمون	میانگین مربعات	درجه آزادی	مجموع مربعات	
0/00	38/38	211/38	4	845/54	بین گروه‌ها
		5/50	2179	12002/16	داخل گروه‌ها
			2183	12847/70	مجموع

جدول 11- اختلاف میانگین مقادیر برآورد شده روش‌های مختلف با روش PM.

معنی‌دار بودن	میانگین اختلاف مدل (i-j)	مدل (j)	مدل (i)
1/00	-0/02	ترکیب 6	پنمن
0/63	-0/66	ترکیب 2	
0/00	-0/22	BC	
0/00	1/21*	HS	

اگرچه درصد حساسیت مدل به رطوبت نسبی و سرعت باد، اختلاف معنی‌داری ندارد. این نتایج با نتایج تحقیق طبری و همکاران (2010) و شادمانی و معروفی (1390) که در اقلیم نیمه‌خشک صورت گرفته، مطابقت دارد.

نتیجه‌گیری کلی

در این مطالعه، برای تخمین ETo روزانه منطقه میناب در استان هرمزگان از مدل ANFIS و معادلات تجربی بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی استفاده گردید. روش پنمن-مانتیث فائو به‌عنوان روش مرجع جهت مقایسه نتایج روش‌های دیگر مورد استفاده قرار گرفت.

تحلیل حساسیت

در پایان جهت تعیین مؤثرترین پارامتر اقلیمی در تخمین تبخیر-تعرق توسط روش ANFIS، تحلیل حساسیت صورت گرفت. جدول 12 نتایج این تحلیل را نشان می‌دهد. در این تحلیل از پارامترهایی که به‌واسطه دما محاسبه می‌شوند (R_n و $ea-ed$) صرف‌نظر شده است. دلیل این امر آن است که این پارامترها همبستگی بسیار بالایی با پارامتر دما دارند. بر اساس نتایج جدول 12 مدل ANFIS (ترکیب‌های 6 و 2) بیشترین حساسیت را به تغییرات دما و کمترین حساسیت را به تغییرات سرعت باد، جهت تخمین ETo در منطقه میناب دارد.

جدول 12- تحلیل حساسیت روش ANFIS نسبت به پارامترهای اقلیمی در تخمین تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه میناب.

متغیر	حساسیت (%)
میانگین دما	12/20
ساعات آفتابی	8/31
رطوبت نسبی	4/40
سرعت باد	3/26

عضویت و مدل گوسی ترکیبی) با مقادیر $R^2=0/99$ ، $MAE=0/03$ میلی متر بر روز و $RMSE=0/04$ میلی متر بر روز نتایج بهتری را نسبت به سایر روش‌ها ارائه کرده است. همچنین در این تحقیق ترکیب شماره 2 (با 3 تابع عضویت و مدل گوسی ترکیبی) برای ایستگاه‌هایی که فقط پارامتر دما را اندازه‌گیری می‌کنند، به‌عنوان مدلی مناسب معرفی گردید. روش هارگریوز- سامانی با مقادیر $R^2=0/68$ ، $MAE=1/55$ میلی متر بر روز و $RMSE=2/01$ میلی متر بر روز نتوانسته است تخمین مناسبی از تبخیر-تعرق ارائه نماید. به‌طورکلی تمامی روش‌ها در نقاط حدی و پرش‌های ناگهانی نتوانسته‌اند تخمینی مناسب از ETo داشته باشند.

در بین روش‌های بکار گرفته‌شده مدل ANFIS به‌عنوان روشی مناسب جهت برآورد ETo در منطقه میناب مشخص گردید. ترکیب شماره 6 (با 3 تابع

منابع مورد استفاده

- انصاری ح و مرادی ح، 1389. ارائه مدل فازی به منظور برآورد تبخیر-تعرق ساعتی گیاه مرجع با استفاده از کمینه داده‌های هواشناسی. نشریه آب و خاک (علوم و منابع کشاورزی)، جلد 25، شماره 2، صفحه‌های 275 تا 286.
- انگبینی س و هنربخش ا، 1389. برآورد تبخیر پتانسیل به کمک سیستم‌های هوشمند (منطق فازی عصبی). مجله پژوهش حفاظت آب و خاک، جلد 17، شماره 3، صفحه‌های 195 تا 201.
- بیات ورکشی م، زارع ابیانه ح، معروفی ص، سبزی پرور ع و سلطانی ف، 1388. شبیه‌سازی تبخیر-تعرق روزانه گیاه مرجع به روش هوش مصنوعی و روش‌های تجربی در مقایسه با اندازه‌گیری لایسیمتر در مناطق اقلیم نیمه‌خشک و سرد همدان. مجله پژوهش حفاظت آب و خاک، جلد 16، شماره 4، صفحه‌های 79 تا 100.
- جمال‌پ، معاضده و طارقیان ر، 1385. تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع با استفاده از شبکه‌های عصبی در منطقه اهواز. صفحه‌های 42 تا 50. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اسفندماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- رضائی ع، 1383. مفاهیم آمار و احتمالات. نشر مشهد، چاپ چهارم، 432 صفحه.
- روشن غر، خوش اخلاق ف و کرم‌پور م، 1390. ارزیابی و اصلاح مدل مناسب تبخیر-تعرق بالقوه برای ایران. پژوهش‌های طبیعی، جلد 78، صفحه‌های 49 تا 68.
- زارع ابیانه ح، بیات ورکشی م، سبزی پرور ع، معروفی ص و قاسمی ع، 1389. ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، جلد 74، صفحه‌های 95 تا 110.
- زارع ابیانه ح، بیات ورکشی م، معروفی ص و امیری چایخان ر، 1388. ارزیابی سیستم‌های هوشمند عصبی در کاهش پارامترهای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع. نشریه آب و خاک (علوم و منابع کشاورزی)، جلد 24، شماره 2، صفحه‌های 297 تا 307.
- شادمانی م و معروفی ص، 1390. مقایسه چند روش برآورد تبخیر روزانه از تشت - مطالعه موردی منطقه کرمان. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال 15، شماره 55، صفحه‌های 69 تا 83.
- شایان نژاد م، 1385. مقایسه دقت روش‌های شبکه عصبی مصنوعی و پنمن - مانیتث در محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل. صفحه‌های 1 تا 7. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، اسفندماه، دانشگاه شهید چمران اهواز.
- صادق‌پور ب و مرادی و، 1389. تحلیل آماری با نرم افزار SPSS و AMOS. نشر دانشگاه مازندران، چاپ اول، صفحه 77.

- صیادی ح، اولادی غفاری، فعالیان، و صدرالدینی ع، 1388. مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی RBF و MLP در برآورد تبخیر و تفرق گیاه مرجع. مجله دانش آب و خاک، جلد 19، شماره 1، صفحه‌های 1 تا 12.
- عصاری م، کوچک زاده م، شهابی فر م، و بیات ک، 1388. تعیین تبخیر- تفرق گیاه مرجع درون گل خانه با استفاده از شبکه‌های عصبی. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد 16، شماره 1، صفحه‌های 107 تا 121.
- علیزاده ا، 1380. رابطه آب و خاک و گیاه. نشر آستان قدس، چاپ دوم، 217 صفحه.
- علیزاده ا، 1386. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ بیست و سوم، 213 صفحه.
- فرهودی ر و شمسی پور ع، 1379. برآورد تبخیر- تفرق پتانسیل منطقه بلوچستان جنوبی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، جلد 39، صفحه‌های 109 تا 114.
- قبائی سوق م، مساعدی ا، حسام م، و هزار جریبی ا، 1389. ارزیابی تأثیر پیش پردازش پارامترهای ورودی به شبکه عصبی مصنوعی (ANNs) با استفاده از روش‌های رگرسیون گام به گام و گاما تست به منظور تخمین سریع‌تر تبخیر- تفرق روزانه. نشریه آب و خاک، جلد 24، شماره 3، صفحه‌های 610 تا 624.
- کوچک‌زاده م و بهمنی ع، 1384. ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز جهت برآورد تبخیر- تفرق گیاه مرجع. مجله علوم کشاورزی، جلد 11، شماره 4، صفحه‌های 88 تا 97.
- بی‌نام، 1381. بررسی و مقایسه انطباقی روش پنمن-مانتیت با روش فائو 24 در ایران. چاپ اول، 37 صفحه.
- مساعدی ا، و قبائی سوق م، 1390. برآورد تبخیر روزانه از تشت تبخیر با استفاده از سیستم انطباقی عصبی- فازی. مجله پژوهش آب ایران، جلد 5، شماره 8، صفحه‌های 161 تا 170.
- مفتاح هلقی م، پیری م و حسام م، 1388. استفاده از سیستم استنتاج فازی- عصبی (ANFIS) در تخمین روزانه از تشت تبخیر. صفحه‌های 115 تا 123. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- مومنی م و فعال قیومی ع، 1387. تحلیل آماری با استفاده از SPSS. نشر کتاب نو، چاپ دوم، 193 صفحه.
- نساجی زواره م و صادقی فر ر، 1386. برآورد تبخیر- تفرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های مختلف. صفحه‌های 102 تا 110. نهمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- Allen R, Pereira L, Raes, D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56, FAO, Rome, Italy.
- Bakhtiari B, Ghahreman N, Liaghat AM and HoogenBoorn G, 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. Journal of Agricultural Science and Technology 13: 223-237.
- Berengena J and Gavilan P, 2005. Reference evapotranspiration estimate in a highly advective semiarid environment. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 131(2): 147-163.
- Blaney HF and Criddle WD, 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil Conservation Service SCS-TP96 44 pp.
- Gavilan P, Berengena J and Allen R, 2007. Measuring versus estimate net radiation and soil heat flux: impact on penman-monteith reference ET estimates in semiarid regions. Agricultural Water Management 89(3): 275-286.
- Hargreaves GH and Samani ZA, 1982. Estimating potential evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 108(3): 225-230.
- Irmak S, Irmak A, Allen RG and Jones JW, 2003. Solar and net radiation based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 129(5): 336-347.
- Jang JSR, 1993. ANFIS adaptive network-based fuzzy inference systems. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics 23: 665-685.
- Karimaldini F, Shui L, Mohamed TA, Abdollahi M and Khalili N, 2011. Daily evapotranspiration modeling from limited weather data using neuro-fuzzy computing technique. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 138(1): 21-34.
- Kisi O, 2006. Daily pan evaporation modeling a neuro-fuzzy computing technique. Journal of Hydrology 329: 636-646.
- Kisi O and Oaturk O, 2007. Adaptive neuro-fuzzy computing technique for evapotranspiration estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 133(4): 368-379.
- Kumar P, Kumar D, Jaipaul A and Tiwari K, 2012. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. Pakistan Journal of Meteorology 8(16): 81-88.
- Linsly RK, Kohler MA and Poulhus JLH, 1982. Hydrology for Engineers. Mc Graw-Hill, London. 210.

- Lopez-Urrea R, Olala F, Fabeiro C and Moratalla A, 2006. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agricultural Water Management* 86: 277-282.
- Moghaddamnia AM, Ghafari Gousheh J, Piri S and Han D, 2009. Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference system techniques. *Advances in Water Resources* 32: 88-97.
- Mohawesh OE, 2011. Evaluation of evapotranspiration models for estimate daily reference evapotranspiration in arid and semiarid environments. *Plant, Soil and Environment* 57: 145-152.
- Pereira A and Pruitt W, 2004. Adaptation of the Thornthwait scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agricultural Water Management* 66: 251-257.
- Pereira AR, Green S and Augusto N, 2006. Penman-Monteith reference evapotranspiration Adopted to estimate irrigation tree transpiration. *Agricultural Water Management* 8: 153-161.
- Rahimikhoob A, 2010. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 101: 83-91.
- Smith M, Allen R and Pereira L, 1997. Revised FAO methodology for crop water requirement. Pp. 26-29. In: *Proceeding of Management of Nutrient and Water in Rain fed Arid and Semiarid Area*, Vienna, Austria.
- Sobirino J, 2005. A simple algorithm to estimate evapotranspiration from DAIS data: application to the DAISEX campaigns. *Journal of Hydrology* 315: 117-125.
- Tabari H, Marofi S and Sabziparvar A, 2010. Estimation of daily pan evaporation using artificial neural network and multivariate non-linear regression. *Irrigation Science* 28: 399-406.
- Trajkovic S, Todorovic B and Stankovic M, 2003. Forecasting of reference evapotranspiration by artificial neural networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 129(6): 454-457.
- Traore S, Wang YM and Kerh T, 2008. Modeling reference evapotranspiration by generalized regression neural network in semiarid zone of Africa. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications* 5(6): 991-1000.
- Tukey JW, 1977. *Exploratory Data Analysis*. Addison-Wesley Publishing Company Reading, Massachusetts. 588.
- Yin Y, Wu S, Zheng D and Yang Q, 2008. Radiation calibration of FAO 56 Penman-Monteith modeling to estimate reference crop evapotranspiration in Chin. *Agricultural Water Management* 95: 77-84.