

علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره بیست و دوم، شماره نه، آذر ماه ۹۹

## کاربرد منطق فازی جهت برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل شهرستان گناباد

حسن رضایی<sup>۱</sup>

غلامعباس فلاح قاهری<sup>۲</sup>

[g.fallah@hsu.ac.ir](mailto:g.fallah@hsu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۲/۱۹

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۰

### چکیده

زمینه و هدف: تبخیر- تعرق پتانسیل یکی از اجزای اصلی چرخه ی هیدرولوژیکی است که تعیین صحیح آن در مطالعات بیلان آبی، طراحی سیستم های آبیاری و برنامه ریزی و مدیریت منابع آب برای دست یابی به توسعه ی پایدار نقش به سزایی دارد. تبخیر و تعرق به علت نیاز به عوامل اقلیمی مختلف و اثر متقابل این عوامل بر یکدیگر یک پدیده ی غیرخطی و پیچیده است. یکی از مراحل پیچیده در مدل سازی سیستم های غیرخطی، پیش پردازش پارامتر های ورودی جهت انتخاب ترکیبی مناسب از آن هاست. پیش پردازش داده ها سبب کاهش مراحل سعی و خطا و شناخت مهم ترین پارامتر های مؤثر بر پدیده ی مورد نظر جهت مدل سازی با استفاده از روش های هوش مند می گردد. این پژوهش با هدف استفاده از توان مندی های سیستم استنتاج فازی برای برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از داده های هواشناسی طی دوره ۲۰ ساله (۱۳۷۲-۱۳۹۲) در شهر گناباد صورت گرفت.

روش بررسی: براین اساس پس از بررسی مدل موجود و بررسی ترکیب های مختلف داده های هواشناسی، مدل نهایی برای برآورد تبخیر و تعرق ارایه شد. در این تحقیق در مجموع با داشتن ۲۰ متغیر برای ورودی مدل و یک متغیر برای خروجی مدل (تبخیر و تعرق)، ۵۰ قانون در سیستم استنتاج ممدانی تعریف شد. مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل حاصل از مدل فازی با مدل پنمن - فائو- مونتیت مورد مقایسه قرار گرفت. بحث و نتیجه گیری: کارایی مدل فازی ارایه شده با استفاده از آماره های ریشه میانگین مربعات خطا، خطای انحراف میانگین، ضریب تعیین و معیار جاکوویدز (t) و معیار صباغ و همکاران ( $R^2/t$ ) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل فازی با مدل پنمن - فائو- مونتیت مقایسه گردید. بیش ترین تبخیر و تعرق در ماه ژوئیه اتفاق افتاده است. نتایج حاکی از همبستگی بالا بین این دو مدل فازی ارایه شده و روش پنمن - فائو- مونتیت است.

واژه های کلیدی: تبخیر تعرق پتانسیل، سیستم استنتاج فازی، روش پنمن - فائو- مونتیت، گناباد.

۱- دکتری اقلیم شناسی کشاورزی، مدرس دانشگاه افسری امام علی(ع).

۲- دانشیار دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری. \* (مسول مکاتبات).

## Use of Fuzzy Logic to Determine the Evapotranspiration in Gonabad City

Hasan Rezaei<sup>1</sup>

Gholamabbas Fallah-Ghalhari<sup>2</sup>

[g.fallah@hsu.ac.ir](mailto:g.fallah@hsu.ac.ir)

Accepted: 2016.05.08

Received: 2016.01.30

### Abstract

**Background and Objectives:** Evapotranspiration are the main component of hydrologic cycle and estimation of the amount of evapotranspiration is important to study the water balance, design the irrigation systems and ultimately plan and manage the water resources to achieve the stable development. Evapotranspiration are nonlinear and complicated phenomenon due to requirement for different factors and their interactions. One important step in non-linear system modeling is pre- investigation of inputs to achieve suitable combination of them. Pre-investigation of input data prevents several trial and error steps and helps to understand the most important parameters which affect the phenomenon to be able to modeling the system in an intelligent way. Thereby, this study, has aimed to implement the ability of Fuzzy logic system to estimate Evapotranspiration by using the data from Gonabad weather station in a 21-year period (1993-2014).

**Material and Methods:** To reach this aim, after investigation of available models and different combination of weather information, the final model to estimate Evapotranspiration has been designed. In this model with 20 surface as input and one surface as output or evaporation and transpiration, 50 rules were determined in Mamdani Inference System and the estimated value of Evapotranspiration from the Fuzzy Inference were compared with the results from Fao Penman Monteith (F-P-M).

**Results and Discussion:** Statistical parameters including Root Mean Square Error (RMSE), Main Bias Error (MBE) Coefficient of Determination, Jacovides factor (t) and Sabbagh et al. factor (R2/t) have been used to investigate the efficiency of this model. Comparison of the results from the Fuzzy Model and the results from F-P-M shows a high level of correlation between these two methods indicating the highest level of Evapotranspiration in July (RMSE: 0.08, R2: 0.98, MBE: 0.05, t:0.25 and R2/t: 3.92).

**Key Word:** Evapotranspiration, Fuzzy logic, Gonabad

---

1- Ph.D., Agricultural Climatology, Lecturer in Geography, Imam Ali University, Tehran, Iran

2 -Associate Professor, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Iran,\*(Corresponding Author)

## مقدمه

تبخیر - تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه ی هیدرولوژی است که تعیین صحیح آن در علوم آب از قبیل مطالعات توازن هیدرولوژیکی و طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری از اهمیت بالایی برخوردار است (۱). علاوه بر این مقدار تبخیر و تعرق یکی از داده های اساسی در طراحی شبکه های آبیاری و زهکشی است، زیرا طراحی شبکه های انتقال اعم از کانال های آب رسانی یا زهکشی و نیز سایر قسمت های طرح های آبی، وابسته به مقدار آب مورد نیاز از طریق پدیده ی تبخیر و تعرق است. همچنین طراحی سیستم های آبیاری و تعیین بهترین دوره آبیاری به تخمین مقدار آب مصرفی گیاه که شامل میزان تبخیر از سطح خاک و تعرق از گیاه است، نیازمند می باشد. لذا مساله ی تبخیر و تعرق باید به عنوان یکی از عوامل مهم و مؤثر در طراحی شبکه های آبیاری و زهکشی مدنظر قرارگیرد (۲). تخمین بیش از حد آب مورد نیاز گیاه ضمن هدر دادن آب آبیاری باعث ماندابی شدن اراضی، شست و شوی مواد غذایی خاک و آلوده نمودن منابع آب زیرزمینی می شود. ضمن آن که تخمین کم تر نیز باعث اعمال استرس رطوبتی به گیاه شده و در نتیجه کاهش محصول را به همراه خواهد داشت (۳). انتقال آب به صورت بخار از سطح خاک را تبخیر و از سطح گیاهان را تعرق گویند. از نظر فیزیکی این دو فرآیند مشابه هستند، زیرا در هر دو صورت تغییر حالت آب از مایع به بخار و انتقال آن به جو رخ می دهد. مجموع این دو تلفات را تبخیر و تعرق گویند. (۴). بر اساس استاندارد فائو، تبخیر و تعرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن) در یک دوره زمانی مشخص مصرف نماید، به طوری که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند (۵). تغییرپذیری زیاد تبخیر و تعرق سبب شده که مدل های خطی، عمل کرد مناسبی در این زمینه نداشته باشند و محققان به استفاده از مدل های غیرخطی روی

سبب شده است تا تبخیر و تعرق به صورت پدیده ای غیرخطی و پیچیده بیان شود (۳). برای برآورد دقیق این پارامتر، باید با صرف وقت و هزینه، داده های زیادی اندازه گیری شود. استفاده از روش های غیرمستقیم مانند سیستم های شبکه عصبی<sup>۱</sup> و استنتاج فازی<sup>۲</sup> از راه های چیرگی بر این مشکل می باشد (۶). دیدگاه های کلی در برآورد تبخیر و تعرق شامل سه دسته عمده می باشند. دسته اول، روش های تجربی و ترکیبی با مبنای تئوریک که از سال ۱۹۴۸ با پیشنهاد پنمن<sup>۳</sup> توسعه چشم گیری یافتند. نتیجه تلاش های محققان در این بخش ارایه بیش از ۵۰ مدل مختلف برآورد تبخیر و تعرق بوده است (۷). دسته دوم شامل روش های فرا ابتکاری مانند شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و الگوریتم فازی می باشند که در سال های اخیر مطرح شده اند. این روش ها با جستجوی عمیق در فضای جواب در پی یافتن جواب هایی با کیفیت بالاتر هستند. دسته سوم از ترکیب دو الگوریتم فرا ابتکاری<sup>۴</sup> مانند الگوریتم شبکه های عصبی با الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> و یا الگوریتم شبکه عصبی با منطق فازی می باشند. معمولاً این روش ها برای سری های زمانی مانند تبخیر و تعرق جواب های بهتری نسبت به روش های دسته اول در زمان کوتاه تری تولید می کنند (۸). شبکه های عصبی مصنوعی، الگوریتم ژنتیک و سیستم های استنتاج فازی از الگوریتم های فرا ابتکاری معروف هستند که به اعتقاد Kisi (۲۰۰۷) در حال حاضر از روش های معتبر برآورد تبخیر و تعرق محسوب می شوند (۹). از مهم ترین پژوهش های صورت گرفته در حوزه شبکه عصبی می توان به مطالعات Kisi (۲۰۰۷) و Kumar و همکاران (۲۰۰۸) اشاره کرد که کاربرد روش های غیرمستقیم را در تبخیر و تعرق بررسی کرده اند (۱۰ و ۱۱). بررسی های صورت گرفته، نشان داد که الگوریتم

آوردند و همچنین اثر متقابل عوامل اقلیمی از قبیل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تشعشع، نوع و مرحله رشد گیاه و عوامل دیگر

- 1- Artificial Neural Networks
- 2- Fuzzy Interface System
- 3- Penman
- 4- Push Forward Insertion Heuristic
- 5- Algorithm Genetic

سامانی پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده دو پارامتر دما و سرعت باد به عنوان مؤثرترین عوامل در این مدل شناسایی شد (۳). در پژوهشی دیگر با استفاده از داده های لایسیمتری دقت شبکه عصبی را جهت تخمین مقدار تبخیر و تعرق گیاه سیر با استفاده از پارامترهای هواشناسی، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آن ها نشان داد که شبکه ی عصبی از دقت خوبی برخوردار است و نسبت به پارامتر دمای حداکثر بیشترین حساسیت و حداقل رطوبت نسبی کمترین حساسیت را داراست (۲۱). شایان نژاد و همکاران (۱۳۸۸) از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی به منظور تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اهواز برای سال های ۱۹۵۷ تا ۲۰۰۰ میلادی استفاده کردند (۲۰). Odhiambo و همکاران (۲۰۰۱) روش منطق فازی را برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به کار بردند (۲۲). Jia Bing و همکاران (۲۰۰۴) مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را در منطقه چین با استفاده از منطق فازی و شبکه عصبی مصنوعی و ترکیب این دو مدل برآورد کردند (۲۳).

در پژوهشی Dogan (۲۰۰۹) برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع از سیستم فازی - عصبی تطبیقی استفاده نمود (۲۴). Kisi (۲۰۱۰) از سیستم تلفیقی فازی و الگوریتم ژنتیک برای مدل سازی تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه کالیفرنیا استفاده کرد (۲۵). هر چند مطالعات مورد اشاره در فوق، از داده های ورودی متفاوتی برای مدل فازی استفاده کردند و مدل های ارائه شده فازی با روش های متفاوت برآورد تبخیر و تعرق مقایسه شدند، اما تقریباً نتایج همه این پژوهش ها نشان دادند که مدل فازی ابزار توانمندی برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع روزانه بوده و می توان آن را برای برآورد این پارامتر پیشنهاد نمود. علاوه بر منطق فازی، برخی از محققین از شبکه های عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده کرده و این شبکه ها را به عنوان ابزار مناسبی برای برآورد این پارامتر معرفی کرده اند (۲۶). به طور کلی مدل سازی داده های خروجی با استفاده از مجموعه داده های ورودی همواره دارای مقداری خطا

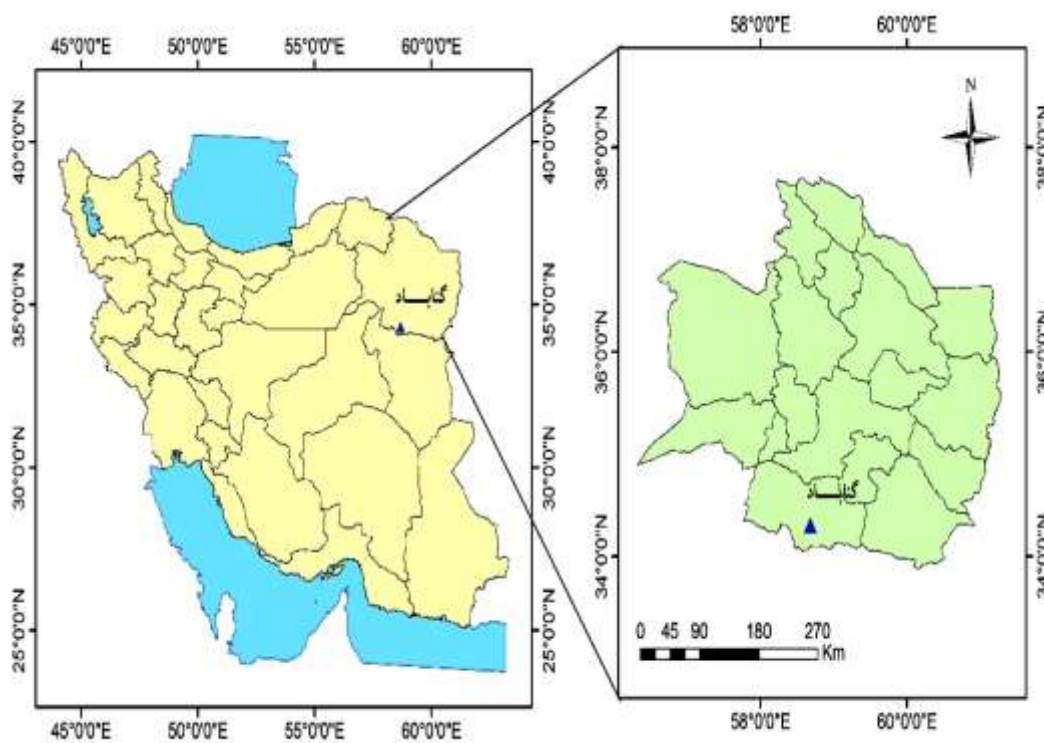
ژنتیک عملکرد خوبی از نظر زمان حل و کیفیت جواب های به دست آمده در حل سری های زمانی داشته است (۱۳ و ۱۲). در پژوهش های Tzimopoulos و همکاران (۲۰۰۸) مقدم نیا و همکاران (۲۰۰۷)، از منطق فازی برای برآورد تبخیر و تعرق و تبخیر استفاده کردند (۱۴ و ۱۵). همچنین Lin و همکاران (۲۰۰۷) دقت و سرعت محاسبات سیستم های فازی را در برآورد فرآیندهای هیدرولوژیکی مناسب و کارا می دانند (۱۶). در طی سال های گذشته محققین همواره درصد مدل کردن پدیده تبخیر و تعرق برآمده اند، به گونه ای که در پنج دهه اخیر عمده مطالعات بر روی توسعه روش های برآورد تبخیر و تعرق و بهبود بخشیدن به عملکرد روش های موجود متمرکز شده است. همچنین پژوهش های زیادی در مورد کاربرد سیستم های فازی در زمینه مهندسی علوم صورت گرفته که می توان به مواردی هم چون مدل سازی خشکسالی، مدیریت مخزن، برآورد رسوب، پیش بینی هوا، پیش بینی رواناب و جریان رودخانه اشاره کرد (۱۷). Sudheer و همکاران (۲۰۰۸) برای محاسبه ی تبخیر و تعرق از داده های ساده شده مانند دمای هوا، تابش برون زمینی و ساعات آفتابی استفاده نموده و نتایج حاصل را رضایت بخش توصیف نمودند (۱۸). Kisi و Ozturk (۲۰۰۷) جهت تخمین مقدار تبخیر و تعرق به روش فائو پنمن-مانتیت از سیستم استنتاج عصبی فازی استفاده نمودند (۱۹). شایان نژاد و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از اطلاعات ۵ ساله ای اقلیمی و لایسیمتری ایستگاه اکباتان همدان تبخیر و تعرق را به سه روش رگرسیون فازی، شبکه های عصبی مصنوعی و روش فائو پنمن-مانتیت محاسبه و با داده های حاصل از لایسیمتر مقایسه و بیان داشتند که روش رگرسیون فازی با ضریب تبیین ۰/۸۸ و مجذور میانگین مربعات خطایی برابر ۰/۷۴ میلی متر بر روز نتایج بهتری را به دست می دهد (۲۰). کوچک زاده و بهمنی (۱۳۸۴) در پژوهشی به ارزیابی عملکرد شبکه های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع در ایستگاه مهرآباد تهران و مقایسه ی آن با روش های فائو-پنمن-مانتیت، بلانی کریدل، جنسن هیز اصلاح شده و هارگریوز

## مواد و روش ها

## منطقه مورد مطالعه

شهرستان گناباد از نظر موقعیت جغرافیایی در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۲۱ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۸ درجه و ۴۱ دقیقه شرقی واقع شده است و ارتفاع آن از سطح دریا ۱۰۵۶ متر است. شکل (۱) موقعیت گناباد را در استان خراسان رضوی و ایران نشان می دهد. دوره آماری مورد مطالعه در این تحقیق، بازه ۱۳۹۲-۱۳۷۲ می باشد. پارامترهای اقلیمی مورد استفاده در این تحقیق برای تدوین مدل فازی پیش بینی تبخیر تعرق پتانسیل شهرستان گناباد در جدول (۱) آورده شده است (۲۷).

خواهد بود که منشأ ایجاد این خطا می تواند ناشی از عدم دقت در اندازه گیری مقادیر پارامترها، عدم کفایت دانش بشری برای اندازه گیری و تشخیص تمام عوامل مؤثر پدیده ی مورد نظر و عدم وجود رابطه ی هموار بین مجموعه داده های ورودی و خروجی باشد. با توجه به نتایج مطالعات فوق در خصوص توانمندی منطق فازی در برآورد تبخیر و تعرق روزانه، هدف اصلی این پژوهش، استفاده از سیستم استنتاج فازی جهت برآورد تبخیر و تعرق ایستگاه گناباد طی دوره ۲۰ ساله (۱۳۷۲-۱۳۹۲) و ارایه مدل فازی مناسب می باشد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهرستان گناباد در ایران و استان خراسان رضوی

Figure 1- Location city Gonabad Razavi Khorasan province in Iran

جدول ۱- داده‌های هواشناسی مورد استفاده در تحقیق و ضریب همبستگی آنها با تبخیر تعرق مرجع

Table 1- Meteorological data used in the study and correlation coefficient of the reference evapotranspiration

همبستگی	واحد	فراسنج	همبستگی	واحد	فراسنج
۰/۹۷	hour	میانگین ساعت آفتابی	۰/۹۹	$MJ.m^{-2}.d^{-1}$	تابش خورشیدی
۰/۷۷	day	تعداد روز ابری	۰/۹۸	$^{\circ}C$	بیشینه دما
۰/۷۵	day	تعداد روز با دید ۲ کیلو متر	۰/۸۹	$^{\circ}C$	کمینه دما
۰/۹۶	m/s	میانگین سرعت باد	۰/۹	%	بیشینه رطوبت
۰/۹۴	$^{\circ}C$	درجه روز سرمایش	۰/۸۸	%	کمینه رطوبت
۰/۸۷	$^{\circ}C$	درجه روز گرمایش	۰/۸۴	hpa	بیشینه فشار
۰/۹۹	hpa	میانگین کمبود اشباع	۰/۹۸	hpa	بیشینه فشار سطح دریا
۰/۹۷	hpa	فشار بخار آب	۰/۸۲	hpa	کمینه فشار ایستگاه
۰/۹۷	$kg^{-1}$	نسبت اختلاط	۰/۸۴	hpa	بیشینه فشار ایستگاه
۰/۹۸	$^{\circ}C$	دمای نقطه شبنم	۰/۷۲	mm	بارندگی

میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)،  $e_s$  فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)،  $e_a$  فشار بخار واقعی هوا (کیلو پاسکال)،  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار اشباع نسبت به دما (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و  $\gamma$  ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و  $G$  شار گرمای خاک (مگاژول بر متر مربع در روز) است که برای تعیین آن از روابط زیر استفاده می‌شود:

(۲) اگر  $R_n > 0$  یا روز هنگام باشد:

$$G = 0.1R_n$$

مدل های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع

مدل فائو- پنمن - مانیتیس

شکل کلی معادله فائو-پنمن-مونتیث جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع به صورت زیر است (۲۸):

(۱)

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

در رابطه فوق،  $ET_o$  تبخیر- تعرق مرجع (میلی متر بر روز)،  $R_n$  تابش خالص ورودی (مگاژول بر متر مربع در روز)،  $T$  میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری (درجه سانتی‌گراد)،  $U_2$

به معنای شهودی، راندمان محاسباتی و ویژگی خاص اشاره نمود (۳۰). به منظور ساخت مدل فازی در این پژوهش، ابتدا پارامترهای ورودی مشخص شده، سپس پارامترهای مورد نظر با استفاده از فازی سازها (توابع عضویت) فازی شده و با تشریح قواعد استنتاج جهت برآورد تشعشع خورشیدی با استفاده از داده های ورودی، مقادیر خروجی با استفاده از روش نا فازی سازی مرکز ثقل تولید شدند.

لازم به ذکر است، زیر مجموعه های فازی ورودی به صورت زیر تعریف شدند:

(۶)

$$A = \{ (x, \mu_{A(x)}), \quad x \in X, \mu_{A(x)} \in [0,1] \}$$

که در آن،  $X$  مقدار شاخص و  $\mu_{A(x)}$  مقدار تابع عضویت  $x$  در  $A$  است.

ساختار عمومی قوانین تدوین شده به صورت زیر می باشد:

(۷)

Rule m : IF ( $X_1$  is  $A_{1,m}$ ) AND ( $X_2$  is  $A_{2,m}$ )  
AND( $X_k$  is  $A_{k,m}$ ) THEN  $Y$  is ...

به عبارت دیگر، یک قانون فازی، بیان رابطه بین  $k$  متغیر ورودی  $X_1, X_2, \dots, X_k$  و خروجی  $Y$  است. عبارت  $A_{k,m}$  در بخش مقدم قوانین، مجموعه های فازی را نشان می دهد که برای جداسازی فضای ورودی به داخل مناطق هم پوشانی کننده به کار می رود. یک مجموعه فازی یک تعمیم از مجموعه های کلاسیک است که تابع عضویت به عنوان یک موضوع از درجه در یک فرم باینری تعریف می شود (هر کدام از عدم عضویت یا عضویت کامل). هر مجموعه فازی  $A_{k,m}$  در معادله (۱) به وسیله تابع عضویت آن  $\mu_{k,m}$  توصیف می شود که درجه عضویت هر مقدار  $X_k$  مجموعه فازی  $A_{k,m}$  در تمام مقدار عضویت تطبیقی  $\mu_{k,m}(x_k)$  ارزش یابی می گردد. مقادیر عضویت  $\mu_{k,m}(x_k)$  گوناگون در دامنه  $[0,1]$  است

(۳) اگر  $R_{hr} < 0$  یا شب هنگام باشد:

$$G = 0.5R_{hr}$$

برای محاسبه فشار بخار واقعی هوا ( $e_a$ ) در گام زمانی ساعتی از رابطه زیر استفاده می شود:

(۴)

$$e_a = e_s \exp\left[\frac{RH_{hr}}{100}\right]$$

که  $RH_{hr}$  متوسط ساعتی رطوبت نسبی بر حسب درصد و  $e_s$  فشار بخار اشباع در درجه حرارت ساعتی  $T_{hr}$  به کیلو پاسکال است و از رابطه زیر به دست می آید:

(۵)

$$e_s = 0.611 \exp\left[\frac{17.26(T - 273.16K)}{T_{hr} - 35.86K}\right]$$

### مدل فازی

هرمدل فازی شامل سه بخش پارامترهای ورودی، قواعد فازی که موتور استنتاج بوده و پارامترهای خروجی است. مدل های فازی از روش های مختلفی برای توصیف پارامترهای ورودی و خروجی و چگونگی ترکیب قواعد برای استنتاج نتیجه استفاده می کنند. در مدل های فازی ورودی ها به صورت متغیرهای بیانی فازی مطرح شده و با قواعد فازی (اگر - آنگاه) به خروجی هایی که بصورت متغیرهای بیانی فازی تعریف شده، متصل می شوند (۲۹). با توجه به این که در اغلب کاربردها، ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، باید واسطه هایی بین موتور استنتاج فازی و محیط به وجود آید. این واسطه ها امکان تبدیل اعداد خام را به اعداد فازی و بالعکس فراهم می آورند. یکی از بخش های مهم هر مدل فازی سیستم استنتاج فازی است. سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر - آن گاه بنا نهاده شده است، به طوری که با استفاده از قواعد مزبور می توان ارتباط بین تعدادی متغیر ورودی و خروجی را به دست آورد. از شاخص های انتخاب نوع موتور استنتاج می توان

در این پژوهش، برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل‌های با مقادیر به دست آمده از مدل‌های فائو-پنمن - مانتیت از آزمون‌های آماری زیر که توسط Jacovides (۱۹۹۷) پیشنهاد گردیده است، استفاده شد (۳۴). جاکویدز اعتقاد دارد که شاخص‌های ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین خطای گرایش (MBE) به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل تخمین تبخیر و تعرق کافی نمی‌باشد. بنا به توصیه وی علاوه بر دو معیار فوق که عموماً برای مقایسه مدل‌های تبخیر و تعرق استفاده می‌شود، باید از معیار سومی به نام  $t$  که ترکیبی از دو معیار فوق است، استفاده نمود:

(۸)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ET_{model} - ET_{obs})^2}{n}}$$

(۹)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (ET_{model} - ET_{obs})}{n}$$

(۱۰)

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}}$$

در رابطه فوق  $t$  معیار جاکویدز و  $n$  تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار کم‌تر  $t$  بیان‌گر دقت بهتر مدل است. با توجه به این که در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب  $R^2$  بالا، ولی نمایه‌های  $RMSE$  و  $MBE$  و یا  $t$  قابل قبول باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار است. بدین منظور، در پژوهش حاضر علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکویدز، از معیار ترکیبی جدید صباغ و همکاران که حاصل

که صفر عدم عضویت و ۱ عضویت کامل  $x_k$  را در مجموعه فازی  $A_{k,m}$  نشان می‌دهد. ساختار بخش نتیجه (بخش Then قوانین) به نوع سیستم استنتاج فازی مورد نظر بستگی دارد (۳۱ و ۳۲).  
مراحل زیر برای تدوین مدل پیش‌بینی بارش مورد توجه قرار گرفته است:

- تقسیم بندی ورودی‌ها و خروجی‌ها به بازه‌های فازی

- ساخت قوانین فازی بر اساس اطلاعات موجود

- استفاده از قوانین فازی برای پیش‌بینی

### تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع

تعریف قوانین فازی برای ترکیب توابع عضویت تعریف شده برای ورودی مدل فازی یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت مدل فازی می‌باشد. برای این کار بعد از فازی‌سازی توابع ورودی و خروجی مدل، با توجه به هر یک از سطوح تعریف شده، قوانین مختلفی با وزن‌های متفاوت تعریف شد. به عبارت دیگر با استفاده از داده‌های موجود وزن قوانین مختلف به این صورت تعیین شدند که مقدار خروجی برای یک ورودی مشخص الزاماً از یک قانون با وزن ۱ محاسبه نمی‌شود، بلکه به ازای هر متغیر ورودی، چندین قانون با وزن‌های مختلف که این وزن‌ها از نسبت تعداد خروجی‌های مدل مبنا در یک سطح معلوم به تعداد کل خروجی در آن سطح به دست می‌آید، قابل محاسبه است. با این روش برای مدل ارائه شده در مجموع با داشتن ۲۰ سطح برای ورودی مدل و یک سطح برای خروجی مدل یا همان تشعشع خورشیدی، ۵۰ قانون تعریف شد. به منظور محاسبه خروجی مدل نیز قبل از هر چیز باید روش‌های استنتاج فازی، استلزام فازی و تجمیع قوانین را مشخص نمود. در این پژوهش برای استنتاج فازی از روش ممدانی<sup>۱</sup> و برای استلزام<sup>۲</sup> از روش حداکثر<sup>۳</sup> استفاده شده است (۳۲ و ۳۳). در نهایت، نتایج به دست آمده از مدل سیستم فازی با مدل فائو-پنمن-مانتیت مقایسه گردید.

### معیارهای عمل‌کرد مدل

- 1- Mamdani
- 2- Implication
- 3- Mux



trimf و gaussmf و برای تابع عضویت فازی متغیر خروجی (تبخیر و تعرق) trimf استفاده شده است. برای کلیه پارامترهای اقلیم شناسی سه تا پنج تابع عضویت (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) و برای تبخیر و تعرق به عنوان متغیر خروجی سه تابع عضویت (کم، متوسط و زیاد) در نظر گرفته شده است. سپس مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از سیستم استنتاج فازی با نتایج مدل فائو - پنمن - مانیتث مقایسه شد (جدول ۲). نتایج نشان داد همبستگی بالایی بین مدل فازی و مدل فائو- پنمن - مانیتث وجود دارد (جدول ۳) و این مدل به خوبی می تواند تبخیر و تعرق را با متغیرهای ورودی محاسبه نماید.

نسبت  $R^2$  به  $t$  می باشد ( $R^2/t$ ) نیز استفاده شد که مقادیر بالاتر آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است (۳۵).

### نتایج و بحث

همان طور که عنوان شد در ابتدا برای تعیین پارامترهای مناسب ورودی مدل با توجه به داده های موجود هواشناسی، روند تغییرات پارامترهای موثر بر تبخیر و تعرق ارزیابی و همبستگی این پارامترها با استفاده از نرم افزار SPSS بررسی شد (جدول ۱). در مرحله بعد با توجه به ضریب همبستگی، قوانین مربوط به سیستم فازی در نرم افزار Matlab نوشته شد. توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی

### جدول ۲- مقایسه برآورد تبخیر و تعرق با مدل فازی ممدانی و مدل فائو- پنمن - مانیتث

Table 2 - Comparison of evapotranspiration with Mamdani fuzzy model and the FAO Penman - Monteith

	jan	Febr	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Fuzzy	۲/۲	۲/۵	۳/۱	۴/۴	۶/۸	۸	۸/۴	۷/۱	۵/۶	۳/۵	۲/۷	۲/۴
PM56	۱/۰۱	۱/۵۹	۲/۷۴	۴/۲۹	۶/۲	۷/۸۳	۸/۲۷	۶/۹۶	۵/۳۴	۳/۳۵	۱/۸۶	۱/۲۵

### جدول ۳- آماره های آزمون مربوط به مقایسه مدل فازی ممدانی با مدل فائو- پنمن - مانیتث

Table 3- test statistics to compare Mamdani fuzzy model with the FAO-Penman - Monteith

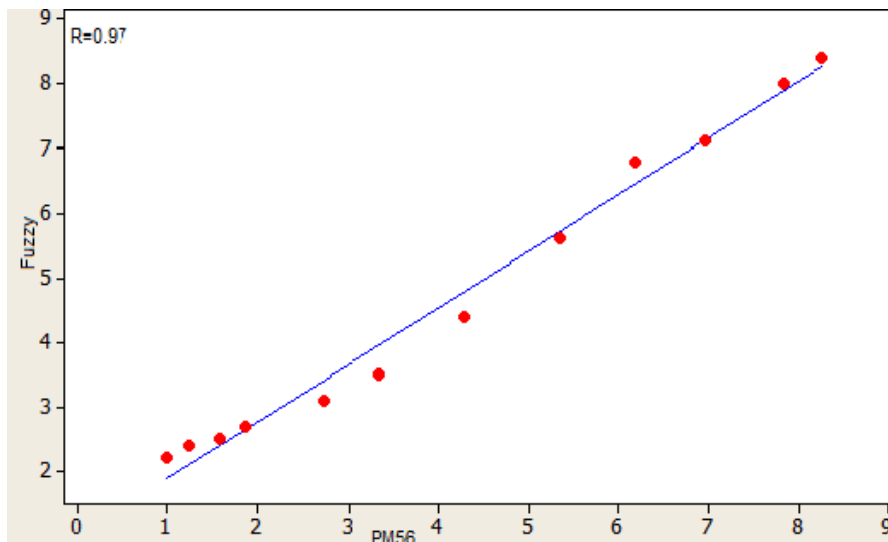
مدل	$R^2$	RMSE	MBE	t	$R^2/t$
PMF56 - Fuzzy	۰/۹۸	۰/۰۸	۰/۰۵	۰/۲۵	۳/۹۲

بگیرد. کمترین تبخیر و تعرق در ماه ژانویه اتفاق افتاده است. با محاسبه پارامترهای ارزیابی عمل کرد در ایستگاه مورد استفاده برای تست مدل، میانگین خطای گرایش (MBE) در مدل فازی در مقایسه با مدل فائو-پنمن - مانیتث، ۰/۰۵ به دست آمد که مقدار پایین آن نشان دهنده دقت بالای مدل فازی است. علاوه بر این

جدول (۲) نشان می دهد که بیشترین تبخیر و تعرق در ماه جولای اتفاق افتاده است. با توجه به این که کمترین بارندگی در این ماه رخ می دهد، باید در زمان آبیاری جهت مصرف بهینه آب و افزایش سطح کشت مدیریت لازم را اعمال نمود و در صورت امکان در شب و اوایل صبح که میزان تبخیر و تعرق کم است، آبیاری صورت

نتایج نشان می دهد که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل فازی بیش تر از مقادیر محاسبه شده از مدل فائو- پنمن - مانتیث است. مقدار پارامتر RMSE ارایه شده در جدول (۳) نیز نشان می دهد که اختلاف مقادیر پیش بینی شده توسط مدل فازی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه شده با مدل فائو- پنمن - مانتیث متناظر است. مقدار این آماره برای مدل فازی در ایستگاه های مورد بررسی

۰/۰۸ میلی متر در ساعت متغیر بود که این مقادیر کم، نشان دهنده دقت بالای سیستم استنتاج فازی است. هم چنین آماره های  $R^2/t$  و  $t$  در این ایستگاه به ترتیب ۰/۲۵ و ۳/۹۲ محاسبه شد که نشان دهنده دقت بالای مدل فازی در برآورد تبخیر و تعرق در اقلیم گناباد است.



شکل ۲- مقایسه برآورد تبخیر و تعرق با مدل فازی ممدانی و مدل پنمن - مانتیث - فائو

Figure2. compared to Mamdani fuzzy model and model evapotranspiration with Penman - Monteith - FAO

خالص خورشیدی به دلیل این که منبع انرژی است بیشترین تاثیر را بر تبخیر و تعرق دارد. از آنجایی که در ایستگاه مورد بررسی، همبستگی بالایی میان تبخیر و تعرق و تابش خالص وجود دارد، ممکن است این سوال پیش آید که به جای مدل فازی می توان از مدل های ساده دیگر نظیر رگرسیون استفاده کرد که در پاسخ باید گفت مدل های فازی به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای با عدم قطعیت بالا در آن ها، (که در برخی موارد اجتناب ناپذیر بوده و حتی جزئی از سیستم هستند) مانند برخی از مدل های ریاضی دیگر در محدوده مشخصی نسبت به تغییرات حساس نبوده و دارای انعطاف پذیری بالایی هستند، و می توان با ارایه یک مدل فازی تبخیر و تعرق را با

### نتیجه گیری

با توجه به نتایج ارایه شده، مشاهده می شود که مدل فازی با روش مدل پنمن - مانتیث - فائو مورد مقایسه تطابق نسبتاً بالایی داشته و به این جهت توانایی لازم برای برآورد تبخیر و تعرق را دارا می باشد. ضمن این که با در نظر گرفتن معیارهای جدید ارزیابی مدل های تبخیر و تعرق (جاکوویدز و صباغ) انتخاب مدل بهتر به طور نسبی سهل تر شده است. براساس نتایج به دست آمده این پژوهش، اختلافات مشاهده شده در محاسبات تبخیر و تعرق حاصل از مدل فازی با مدل پنمن - مانتیث - فائو را می توان به عواملی نسبت داد که در کنار پارامترهای بیان شده بر تبخیر و تعرق تاثیر بسیار جزئی دارند. همان طور که نتایج نشان دادند پارامتر تابش

- (Agricultural Sciences and Industries), 23 (1), 9-19. (In Persian)
6. Wang. Y.M Traore. S, Kerh. T, 2009, Computational performance of Reference evapotranspiration in semiarid zone of Africa, Sci, Research and Essay, 4, 6. 577-583.
  7. Grismer. M.E, Oran. M, Snyder. R., Matyac, R, 2002, Pan Evaporation to reference evapotranspiration conversion methods, ASCE J. Irrig. and Drain. Eng, 128(30), 180-184.
  8. Rahimi Koob. A, 2008, Comparative study of Hargrives's and artificial neural network's methodologies in estimating reference evapotranspiration in a semiarid environment, Irrig. Sci, 26(3), 253-259.
  9. Kisi. O, 2007, Evapotranspiration modeling from climatic data using a neural computing technique. Hydro. Process, 21(6), 1925-1934.
  10. Kisi. O, 2007, Adaptive neurofuzzy computing technique for Evapotranspiration Estimation, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 133(4), 368-379.
  11. Kumar. M, Bandyopadhyay. A, Raghuwanshi. N.S, Singh. R, 2008, Comparative study of conventional and artificial neural network-based ET<sub>0</sub> estimation models, Irrig. Sci. 26(6), 531-545.
  12. Aytek. A, Kisi. O, 2008, A genetic programming approach to suspended sediment modeling, J. Hydro, 351, 288-298.

همبستگی بالایی برای سایر ایستگاه ها نیز برآورد نمود، حال آن که در مدل رگرسیون، برای هر ایستگاه باید مدل جداگانه ای در نظر گرفت. در پژوهش حاضر نیز با مدل ارایه شده، نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین تبخیر و تعرق برآورد شده از مدل فازی و مدل پنمن - مانیتث - فائو وجود دارد و می توان از این مدل برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده نمود که این نتیجه مشابه نتایج حاصل از پژوهشهای گذشته برای مدل سازی تبخیر و تعرق با منطق فازی است.

### Reference

1. Waziri. ZH, Entesari. M, Masihi. M, Heydari. N. Dehghani, S., 2008, Evaporation and transpiration (instructions for calculating the water required by plants), Publications of the National Committee for Irrigation and Drainage, Tehran, 362. (In Persian)
2. Jahanbakhsh Asl. Q, Movahed Danesh. A. and Rumi, and, 2001, Analysis of Evaporation and Transpiration Estimation Models for Tabriz Meteorological Station, Journal of Agricultural Knowledge, 11, 66-51. (In Persian)
3. Kouchekezadeh. M, Bahmani. A., 2005, Evaluation of the performance of artificial neural networks in reducing the required parameters for estimating reference evapotranspiration, Journal of Agricultural Sciences, 11 (4), 97-87. (In Persian)
4. Alizadeh. A, Kamali. Gh, 2007, Water needs of plants in Iran, first edition, Astan Quds Razavi Publishing Institute, 228. (In Persian)
5. Mousavi Baygi. M, mystics. M, Sarmad. M, 2009, Using Minimum Meteorological Data to Estimate Evapotranspiration of Reference Plant and Presenting Correction Coefficient (Case Study: Khorasan Razavi Province), Journal of Water and Soil

- groundwater drainage distance in unsustainable conditions using artificial neural networks, National Conference on Irrigation and Drainage Network Management, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran. (In Persian)
21. Zare Abyaneh. H, Qasim. A., Bayat Warkshi. M, famous. P., 2009, Evaluation of the accuracy of artificial neural network in predicting evapotranspiration of garlic using lysimetric data in Hamadan region. Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries), 23 (2), 185-176. (In Persian)
  22. Odhiambo. L.O, Yoder. R.E, Yoder. D.C, 2001a, estimating of reference crop evapotranspiration using fuzzy state models. Trans of the ASAE. No. 44(3), 543-550.
  23. 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.
  24. Dogan. E, 2009, Reference Evapotranspiration Estimation using adaptive nerofuzzy inference system. Journal of Irrigation and Drianage Engineering, 58,617-628.
  25. Kisi. O, 2010, Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration, Journal of Irrigation and Drianage Engineering .136(3),175-183.
  26. Sayyadi. H, Olad Ghaffari. A, Ashrafsadrodini. A., 2009, Comparison of
  13. Kim. S, Kim. H, 2008, Neural Networks and genetic algorithm approach for nonlinear evaporation and evapotranspiration modeling, J. Hydro, 351, 299-317.
  14. Tzimopoulos. C, Mpallas. L, Papaevangelou. G, 2008, Estimation of evapotranspiration using fuzzy systems and comparison with the blaney-criddle method. Environ, Sci. and Technol,4(1), 181-186.
  15. Moghaddamia. A, Ghafari Gousheh. M, Piri. J, Amin. S, Han. D, 2009, Evaporation estimation using artificial neural networks and adaptive neuro fuzzyinference system techniques, Advances in Water Resources,32(1),89-97.
  16. Lin. C, Chao C, Chen. W.F, 2008, Estimation regional evapotranspiration by adaptive network-based fuzzy inference system for Dan-Shui basin in Taiwan. J. Chinese Inst. Eng, 30(6), 1091-1096.
  17. Korepaz dezfouli. A, 2006, Principles of fuzzy set theory and its applications in modeling water problems, Amir Kabir University of Technology Jihad Publications, Tehran. (In Persian)
  18. Sudheer. K.P, Gosain. A.K. Ramasastri. K.S, 2003, Estimating actual evapotranspiration from limited climatic data using neural computing technique, J. Irrg. Drain. Eng. ASCE, 129(3),214-218.
  19. Kisi. O, Ozturk. O, 2007, Adaptive neurofuzzy computing technique for evaptotranspiration estimation, J. Irrig. Drain. Eng. ASCE, 133(4), 368-379.
  20. Shayan Nejad. M, 2006, Calculation of

- Development of rainfall-runoff models using Takagi-Sugeno fuzzy inference systems. *Journal of Hydrology*, 329(1-2), 154-173.
32. Coa. Z, Kandel. A, 1989, Application of some Fuzzy Implication Operators, *FSS*. 3, 42-52.
33. Lee. C.C, 1990, Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic in Controller – part I & II. *IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics*, 20(2). P.419-435.
34. Jacovides. C.P, 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, *Agricultural water management*, 3, 95-97.
35. Sabziparvar. A, Tafazoli. F. Zare Abyaneh. H, Banzhad. H. Mousavi Baygi. M, Ghafouri. M. Mohseni Movahed. A., Marianji, 2008, Comparison of several models for estimating the evapotranspiration of the reference plant in a cold and semi-arid climate for optimal use of radiation models. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Industries)*. 2 (22), 340-328
- RBF and MLP neural network performance in estimating reference plant evapotranspiration. *Journal of Soil and Water Knowledge* 1 (19), 12-1. (In Persian)
27. Meteorological profile of Khorasan Razavi, 2014, monthly meteorological data of Gonabad station. (In Persian)
28. Allen. R.G, Raes. L.S, Smith. M, 1998, Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*. No. 56. FAO. Rome, Italy.
29. Monem. M, Khorami. J, Heydarian. A., 2007, Evaluating the performance of irrigation networks or using fuzzy logic: A case study of Maroon network. *Tarbiat Modares Technical and Engineering Journal*, 27, 42-31. (In Persian)
30. afari Mianai. C, Agriculture. A., 2008, Comparison of fuzzy method and statistical regression to estimate sediment load of rivers. *Fourth National Congress of Civil Engineering*, Tehran. (In Persian)
31. Jacquin. A, Shamseldin. A, 2006,