



مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد نوزدهم، شماره اول، ۱۳۹۱

<http://jwfst.gau.ac.ir>

ارزیابی سیستم‌های استنتاج فازی جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی (مطالعه موردی: منطقه فریمان)

* حوریه مرادی^۱، مرتضی تمنا^۲، حسین انصاری^۳ و محمد نادریان‌فر^۴

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجوی کارشناسی ارشد علوم ریاضی، دانشگاه فردوسی

مشهد، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۸۹/۸/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۰/۴/۲۸

چکیده

با توجه به اهمیت تعیین دقیق و به موقع تبخیر و تعرق در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و با توجه به توانمندی‌های سیستم استنتاج فازی (FIS)، هدف از ارائه این مقاله برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی به کمک منطق فازی است. بر این اساس پس از بررسی و ترکیب مدل‌های مختلف داده‌های ساعتی هواشناسی، مدل فازی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی ارائه شد. در این مدل‌ها تبخیر و تعرق محاسبه شده از معادله پنمن-مانتیث-فائو به عنوان خروجی مدل در نظر گرفته شده و کارایی مدل‌های مورد مقایسه با استفاده از آماره‌های 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. دوره آماری مورد بررسی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ میلادی بوده که از ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش و از ۳۰ درصد داده‌ها برای تست مدل استفاده شد. نتایج مدل‌های فازی ارائه شده با پارامترهای ورودی متفاوت با هر دو مدل پنمن-مانتیث-فائو (PMF56) و انجمن مهندسی عمران آمریکا (ASCE) نشان دادند که، سیستم‌های فازی قادر به برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی با دقت قابل قبولی هستند، به طوری که مدل فازی با سه متغیر ورودی (تابش، رطوبت نسبی و دما) در دوره آموزش و تست بهترین عملکرد را داشت. معیارهای ارزیابی، مدل فازی با سه متغیر ورودی در دوره تست برای مدل

* مسئول مکاتبه: moradi.hu206@gmail.com

PMF56 و ASCE به ترتیب $R^2=0/04$ ، $RMSE=0/01$ ، $MBE=-0/01$ ، $t=23/5$ ، $R^2=0/98$ و $R^2/t=0/041$ و از این پژوهش، نشان داد که مدل فازی جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی با استفاده از حداقل داده‌ها و بدون نیاز به محاسبات پیچیده، نتایج قابل قبولی را به دست می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: سیستم استنتاج فازی، تبخیر و تعرق ساعتی، مدل ASCE، مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶

مقدمه

تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی بوده و تخمین دقیق آن برای بسیاری از مطالعه‌ها مانند بیلان آب، طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری، شیه‌سازی تولید گیاهی و برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب ضروری است (صیادی و همکاران، ۲۰۰۹). با توجه به این‌که تبخیر و تعرق یک پدیده غیرخطی و پیچیده است، تهیه یک مدل ریاضی برای آن با در نظر گرفتن تمام فاکتورهای اقلیمی موثر در آن کاری دشوار بوده و به دلیل وجود نبود قطعیت در پارامترهای موثر بر آن با خطاهای قابل توجهی روبروست (شایان‌نژاد، ۲۰۰۶). بنابراین با توجه به ماهیت تبخیر و تعرق، استفاده از مدل‌های هوشمند مانند سیستم‌های فازی می‌تواند ابزار مناسبی برای مدل کردن پارامترهای با نبود قطعیت بالا باشند. منطق فازی تکنولوژی می‌باشد که پایه‌گذار آن لطفی‌زاده (۱۹۶۵) بوده و شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل‌سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و به نسبت پیچیده است را با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد خبره و با هدف ساده‌سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم جایگزین می‌کند (کوره‌پزان‌دزفولی، ۲۰۰۶؛ قاسم‌نژاد مقدم و همکاران، ۱۹۹۹). پژوهش‌های زیادی در مورد کاربرد سیستم‌های فازی در زمینه مهندسی علوم صورت گرفته که می‌توان به مواردی همچون مدل‌سازی خشکسالی، مدیریت مخزن، برآورد رسوب، پیش‌بینی هوا، پیش‌بینی رواناب و جریان رودخانه اشاره کرد (کوره‌پزان‌دزفولی، ۲۰۰۶). پژوهش‌هایی نیز در ارتباط با مدل‌سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی روزانه انجام شده، اما در خصوص مدل‌سازی تبخیر و تعرق مرجع ساعتی تاکنون تحقیقات خاصی انجام نشده است.

از پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه تخمین تبخیر و تعرق روزانه و ماهانه (غیر ساعتی) با استفاده از منطق فازی می‌توان به برخی از موارد خاص اشاره کرد: هاشمی‌نجفی و همکاران (۲۰۰۷) از سیستم

استنتاج فازی- عصبی تطبیقی به منظور تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اهواز استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دقت مدل سیستم استنتاج فازی- عصبی¹ (ANFIS) در مقایسه با روش‌های تجربی بالا بوده و قابلیت بالایی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق گیاه مرجع دارد. شایان‌نژاد (۲۰۰۷)، کارایی روش رگرسیون فازی در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه و مقایسه آن با روش‌های عصبی مصنوعی و پنمن-مانتیس را در منطقه همدان مورد بررسی قرار داد و نتیجه گرفت که رگرسیون فازی بهترین روش جهت تخمین ET_0 در این منطقه می‌باشد. ادھیامبو² و همکاران (۲۰۰۱) روش منطق فازی را برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع به کار برده و نتایج را با روش‌های پنمن-مانتیس و هارگریوز-سامانی مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که روش منطق فازی با سه پارامتر ورودی، دارای خطایی نزدیک به روش پنمن-مانتیس است با این تفاوت که در روش پنمن-مانتیس داده‌های ورودی بیشتری مورد نیاز می‌باشد. کایجیا بینگ³ (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 (ANFIS) برآورد کرده و نتایج به دست آمده را با روش فائو-پنمن-مانتیس مقایسه کرد و نتیجه گرفت که مدل ANFIS با تعداد ساعات آفتابی و حداکثر دما به عنوان داده‌های ورودی مدل، نتایج بهتری داشته و نسبت به دو مدل دیگر برتری نسبی دارد. کیشی⁴ (۲۰۰۷) دقت مدل شبکه عصبی-فازی را در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع را برای دو ایستگاه پومونا⁵ و سانتا مونیکا⁶ در لس آنجلس مورد ارزیابی قرار داد. نتایج مقایسه نشان داده است که مدل‌های عصبی-فازی می‌توانند مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را به خوبی برآورد کنند. آیتک⁷ (۲۰۰۸) از مدل سیستم استنتاج فازی-عصبی (ANFIS) برای تخمین ET_0 برای منطقه کالیفرنیا استفاده کرده و نتیجه گرفت که مدل CANFIS در مقایسه با سایر روش‌ها برتر بوده و آن را به عنوان یک مدل تخمین ET_0 پیشنهاد کرد. دوگان⁸ (۲۰۰۹) با استفاده از سیستم تطبیقی فازی-عصبی تبخیر و تعرق مرجع را برای ایستگاه مورگان⁹ واقع در سانفرانسیسکو برآورد نموده است.

1- Adaptive Neuro- Fuzzy Inference System

2- Odhiambo (2001a)

3- CaiJia Bing

4- Kisi

5- Pomona

6- Santa monica

7- Ali Aytek

8- EmrahDogan

9- Morgan

کیسی^۱ (۲۰۱۰) از سیستم تلفیقی فازی و الگوریتم ژنتیک (Fuzzy Genetic) برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه کالیفرنیا استفاده کرده است.

با توجه به ویژگی‌های سیستم‌های استنتاج فازی و مشکلات موجود در برآورد دقیق تبخیر و تعرق روزانه، هدف اصلی از این مطالعه بررسی استفاده از این سیستم‌ها جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی می‌باشد. همچنین با توجه به تغییرات میزان انرژی در طول روز، توان تبخیرکنندگی محیط به شدت تغییر کرده و نمی‌توان با میانگین‌گیری ساده مقادیر ساعتی، اثرات آن را به تبخیر و تعرق روزانه تعمیم داد (وزیری و همکاران، ۲۰۰۸). بنابراین همین امر موجب بروز خطای زیادی در محاسبه تبخیر و تعرق روزانه می‌شود. با پیشرفت علم الکترونیک داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌های خودکار، به‌طور ساعتی یا لحظه‌ای گزارش می‌شود. بنابراین می‌توان با استفاده از این داده‌ها مقدار تبخیر و تعرق در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر را به‌طور دقیق برآورد نمود و آن را به دوره‌های زمانی طولانی‌تر تعمیم داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ساعتی در این پژوهش از داده‌های مرجع ساعتی ایستگاه هواشناسی واقع در شهر فریمان در استان خراسان رضوی در شمال شرق کشور ایران استفاده شد. این شهر دارای عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۴۱۱ متر از سطح دریا می‌باشد. میانگین درجه حرارت سالیانه آن ۱۲/۳۷ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارش آن نیز حدود ۱۵۰ میلی‌متر در سال بوده، از این‌رو این منطقه براساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است. در این ایستگاه پارامترهای اولیه‌ای مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت و جهت باد، میزان نزولات جوی، میزان تشعشع، رطوبت خاک در مقاطع مختلف، دمای خاک و میزان تبخیر و تعرق گیاهان الگوی کشت به‌طور هم‌زمان توسط حسگرها هر ۱۰ دقیقه از سطح زمین جمع‌آوری شده و با استفاده از فرمول پنمن مانیتث نیاز آبی گیاه در زمان واقعی محاسبه شده و پس از ۳ ساعت از دریافت داده‌ها، بعد از تجزیه و تحلیل منطقی از طریق SMS به مدیر مزرعه اطلاع‌رسانی می‌شود.

مدل‌های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ساعتی: در این پژوهش برای انجام محاسبات مربوط به تبخیر و تعرق مرجع ساعتی از دو مدل مرجع پنمن-مانیتث-فائو و انجمن مهندسیین عمران آمریکا (ASCE) و مدل پیشنهادی فازی استفاده شد. لازم به یادآوری است که در این پژوهش چهار مدل فازی با ترکیب پارامترهای مختلف ورودی مورد استفاده قرار گرفت. در مدل اول دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و باد، در مدل دوم پارامتر باد حذف گردید و با سه ورودی مدل ساخته شد. مدل سوم نیز با در نظر گرفتن رطوبت نسبی و تابش و مدل چهارم با دو پارامتر رطوبت نسبی و دما ارائه شدند. مدل پنمن-مانیتث-فائو ۵۶ (PMF56): معادله مورد استفاده برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در گام زمانی ساعتی به صورت زیر است (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37U_v}{T + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_v)} \quad (1)$$

که، ET_o تبخیر و تعرق مرجع ساعتی (میلی‌متر)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای هوا (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n تابش خالص در سطح چمن (مگاژول بر مترمربع بر ساعت)، G چگالی شار حرارتی خاک (مگا ژول بر مترمربع بر ساعت). T میانگین دمای هوا (ساعتی) در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متر یاز سطح زمین (درجه سانتی‌گراد)، U_2 میانگین ساعتی سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، e_s میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری (کیلوپاسکال)، e_a میانگین فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع ۱/۵ تا ۲ متری (کیلوپاسکال)، γ ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است. برای به دست آوردن اجزای معادله فائو پنمن-مانیتث از دستورالعمل ارائه شده در نشریه شماره ۵۶ فائو استفاده گردید.

مدل انجمن مهندسیین عمران آمریکا (ASCE): معادله استاندارد ارائه شده توسط انجمن مهندسان عمران آمریکا (ASCE) به منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع چمن در بازه زمانی ساعتی به صورت زیر است (اشنایدر و پروت، ۱۹۸۵):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{37U_v}{T + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_v)} \quad (2)$$

که، C_d ثابت تابعی از گام زمانی، مقاومت گیاهی (r_s) و مقاومت آئرو دینامیک (r_a) بوده و با تغییر نوع گیاه مرجع و بازه زمانی روز و شب تغییر می‌نماید. برای بازه زمانی ساعتی، مقدار C_d طی بازه زمانی

روز برابر ۰/۲۴ و طی بازه شب برابر ۰/۹۶ می‌باشد. مقدار I_s در بازه زمانی روز ۵۰ ثانیه بر متر و در بازه زمانی شب ۲۰۰ ثانیه بر متر در نظر گرفته شده است. سایر اجزای معادله و واحدهای آن‌ها مشابه معادله پنمن - مانیتث فائو-۵۶ می‌باشد.

مدل فازی

ساختار مدل فازی: هر مدل فازی شامل سه بخش پارامترهای ورودی، قواعد فازی (موتور استنتاج) و پارامترهای خروجی است. مدل‌های فازی از روش‌های مختلفی برای توصیف پارامترهای ورودی و خروجی و چگونگی ترکیب قواعد برای استنتاج نتیجه استفاده می‌کنند. در مدل‌های فازی ورودی‌ها و خروجی‌ها که به صورت متغیرهای بیانی فازی بیان می‌گردند با قواعد فازی (اگر- آنگاه) به هم متصل می‌شوند (منعم و همکاران، ۲۰۰۷). با توجه به این‌که در اغلب کاربردها، ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، باید واسطه‌هایی بین موتور استنتاج فازی و محیط به وجود آورد. این واسطه‌ها امکان تبدیل اعداد ترد را به اعداد فازی و برعکس فراهم می‌آورند. یکی از بخش‌های مهم هر مدل فازی سیستم استنتاج فازی است که بر اساس قواعد اگر- آنگاه بنا نهاده شده است. از شاخص‌های انتخاب نوع موتور استنتاج می‌توان به معنای شهودی، راندمان محاسباتی و ویژگی خاص اشاره نمود (جعفری‌میانی و کشاورزی، ۲۰۰۸). به منظور ساخت مدل فازی در این پژوهش، ابتدا پارامترهای ورودی مشخص شده، سپس پارامترهای مورد نظر با استفاده از فازی‌سازها (توابع عضویت) فازی شده و با تشریح قواعد استنتاج جهت برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از داده‌های ورودی، مقادیر خروجی با استفاده از روش نا فازی سازی مرکز ثقل تولید شدند.

برای فازی‌سازی شاخص‌های ورودی و خروجی، در ابتدا دامنه تغییرات آن‌ها (با توجه به اطلاعات موجود) بررسی و برای متغیرهای ورودی و خروجی مدل تعداد سطوح مناسب در نظر گرفته شد. به طوری‌که در این پژوهش برای پارامترهای دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و باد به ترتیب ۸، ۹، ۶ و ۷ بازه براساس پیشنهادات محققان به‌ویژه فائو ۵۶ به کار گرفته شد. هم‌چنین خروجی مدل نیز با ۱۰ سطح و متناسب با تغییرات ورودی در دوره آموزش مدل مدنظر قرار گرفت. در ضمن برای تعیین توابع عضویت فازی متغیرهای ورودی و خروجی و تعیین درجه هم‌پوشانی توابع فازی، اولاً از خصوصیات فیزیکی مسأله مورد بحث و ثانیاً نظرات کارشناسی استفاده شد (کوا و کاندول، ۱۹۸۹). با توجه به کاربرد گسترده توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی و

نتایج به دست آمده از بررسی‌ها، در این پژوهش نیز برای فازی‌سازی متغیرهای ورودی و خروجی از هر دو تابع فوق استفاده گردید.

تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع: از آنجائی که تعریف قوانین فازی متناسب با ورودی و خروجی مدل استنتاج فازی یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت مدل فازی است، بنابراین با توجه به توابع عضویت متغیرهای ورودی و خروجی و درجه هم‌پوشانی آن‌ها و نیز ارتباط ورودی و خروجی مدل در دوره آموزش، قوانین مختلفی با وزن‌های متفاوت تعریف شد. به‌عنوان مثال در یک سناریو تعریف شده با دو پارامتر ورودی (رطوبت نسبی و دما)، با استفاده از داده‌های موجود وزن قوانین مختلف به این صورت تعیین شدند که مقدار خروجی برای ورودی مشخص الزاماً از یک قانون با وزن ۱ محاسبه نمی‌شود، بلکه به ازای هر سری 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، محاسبه می‌گردد. به‌منظور تکمیل مراحل مدل‌سازی، در این پژوهش برای استنتاج فازی از روش ممدانی (Mamdani) و استلزام (Implication) از روش حداقل (Min) و برای تجمیع قوانین فازی (Aggregation)، از روش حداکثر (Max) استفاده شد (باردوسی و همکاران، ۱۹۹۰؛ لی، ۱۹۹۰). در مدل‌سازی فازی، استنتاج نهایی منجر به یک نتیجه فازی می‌شود، که برای دستیابی به عدد حقیقی می‌توان از روش‌های نافازی‌سازی مانند؛ روش میانگین حداکثرها، روش مرکز ثقل، روش محل تقاطع نیمسازها، روش کمترین مقدار حداکثرها و روش بیشترین مقدار حداکثرها استفاده کرد (انصاری و همکاران، ۲۰۱۰). در این پژوهش با توجه به جامعیت روش مرکز ثقل، از این روش استفاده شد.

آموزش و تست مدل: برای آموزش و تست مدل در این مطالعه، از داده‌های موجود در ایستگاه فریمان برای دوره آماری دو ساله ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ استفاده شد، که پس از حذف داده‌های پرت و گمشده، تعداد داده‌های مورد استفاده در این دوره، ۹۱۲۸ داده ساعتی بود. از این تعداد داده، ۷۰ درصد داده‌ها یعنی ۶۳۹۰ داده برای آموزش مدل و ۳۰ درصد داده‌ها یعنی ۲۷۳۸ داده به‌منظور تست مدل مورد استفاده قرار گرفت.

معیارهای عملکرد مدل: برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل فازی با مقادیر به‌دست آمده از مدل‌های پنمن - مانتیث - فائو و ASCE، آزمون‌های آماری زیر که توسط جاکوویدز (۱۹۹۷)

پیشنهاد گردیده، استفاده شدند. جاکویدز اعتقاد دارد که شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل تخمین ET_0 کافی نمی‌باشند. بنا به توصیه وی علاوه بر دو معیار فوق که به‌طور عموم برای مقایسه مدل‌های تبخیر و تعرق استفاده می‌شود، می‌باید از معیار سومی بنام t که ترکیبی از دو معیار فوق بوده، استفاده شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (ET_{model} - ET_{obs})^2}{n}} \quad (۳)$$

$$MBE = \frac{\sum (ET_{model} - ET_{obs})}{n} \quad (۴)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{(RMSE^2 - MBE^2)}} \quad (۵)$$

که، t معیار جاکویدز و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار کمتر t بیانگر دقت بهتر مدل است. با توجه به این‌که در برخی موارد ممکن است، نتایج یک مدل دارای ضریب R^2 بالا، ولی نمایه‌های RMSE و MBE یا t قابل قبول باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار می‌باشد. به این منظور، در این پژوهش علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکویدز، از معیار ترکیبی جدید صباغ و همکاران که حاصل نسبت R^2 به t می‌باشد (R^2/t) نیز استفاده شد که مقادیر بالاتر آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است (سبزی پرور و همکاران، ۲۰۰۸).

نتایج و بحث

همان‌طور که عنوان شد برای ایجاد مدل‌های فازی در این پژوهش، مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق ساعتی با روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان خروجی در مدل‌ها و ترکیبات متفاوت از پارامترهای موثر در معادله پنمن (جدول ۱) به‌عنوان ورودی مدل‌ها در نظر گرفته شدند. بعد از ایجاد مدل‌های فازی با ترکیب ورودی‌های متفاوت، مقایسه میان مدل‌های ترکیبی فائو-پنمن-مانتیت و مدل‌های فازی انجام شد.

جدول ۱- آماره‌های آزمون پارامترهای مختلف هواشناسی مؤثر بر تبخیر و تعرق مرجع ساعتی.

پارامترها	نماد	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر	ضریب همبستگی
تابش خورشیدی (وات بر مترمربع)	Rs	۱۹۶	۲۷۶/۶	۰	۱۰۵۵	۰/۶۲
دمای هوا (سانتی‌گراد)	T	۱۱	۹	-۱۳	۳۵	۰/۴۷
سرعت باد (متر بر ثانیه)	U ₂	۲/۱۶	۱/۳۳	۰	۱۰	۰/۲۴
رطوبت نسبی (درصد)	RH	۵۹	۲۵/۸	۸	۱۰۰	۰/۴۲
تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر ساعت)	ET ₀	۰/۱	۰/۱۶۷	۰	۰/۹۲	-

همان‌طور که در جدول نشان داده شده است، در بین پارامترها، تابش خورشیدی بیشترین و سرعت باد کمترین ضریب همبستگی را با تبخیر و تعرق مرجع ساعتی در ایستگاه مورد بررسی دارد. پس از بررسی داده‌های فوق که منجر به انتخاب پارامترهای مناسب مدل فازی مورد استفاده نیز شد، نتایج مدل‌های فازی ساخته شد و مدل ASCE با مدل فائو- پنمن- مانتیث به‌عنوان مدل مرجع، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که همبستگی بالایی بین مدل‌های فازی ارائه شده با مدل‌های ASCE و PMF56 وجود دارد. به‌طوری‌که بیشترین ضریب تبیین در میان مدل‌های فازی، برای مدل ۴ پارامتری (T-U₂-RH-Rs) و کمترین مقدار آن برای مدل با دو ورودی دما و رطوبت نسبی به‌دست آمده است (جدول ۲ و شکل ۱-الف). این نتایج نشان می‌دهد که مدل فازی به‌خوبی می‌تواند تبخیر و تعرق مرجع ساعتی را با متغیرهای ورودی متفاوت محاسبه نماید. با محاسبه دیگر پارامترهای ارزیابی عملکرد برای مدل‌های فازی ارائه شده و مدل فائو- پنمن- مانتیث در مرحله آموزش، میانگین خطای گرایش (MBE) بین ۰/۰۱۴- و ۰/۰۴۲- میلی‌متر در ساعت به‌دست آمد که این مقدار کم، نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌های فازی توسعه یافته است. علاوه بر این، با توجه به نتایج حاصل برای MBE، می‌توان اظهار داشت که مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل فازی کمتر از مقادیر محاسبه شده از مدل فائو- پنمن- مانتیث می‌باشد.

بررسی و مقایسه مقادیر پارامتر RMSE ارائه شده در جدول ۲، نیز نشان می‌دهد که اختلاف تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده در مدل فازی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه شده با مدل PMF56 متناظر است. مقدار این متغیر آماری برای مدل‌های فازی ارائه شده بین ۰/۰۳۱ تا ۰/۱۲۸ میلی‌متر در ساعت متغیر بود که این مقادیر کم، نشان‌دهنده دقت بالای سیستم استنتاج فازی می‌باشد. هم‌چنین با

محاسبه آماره‌های t و R^2/t نتیجه شد که مدل فازی با ۲ ورودی دما و رطوبت نسبی، حداقل مقدار معیار جاکویدز (۲۶/۸) را دارا بوده و حداکثر آن (۵۹/۶) برای مدل ۳ پارامتری (T-RH-Rs) به دست آمد. نکته جالب توجه در مقایسه این پارامترها، این است که کمترین مقدار t که نشان‌دهنده تطابق بهتر مدل با مدل پنمن است برای مدل چهارم (T-RH) محاسبه شده است هر چند که کمترین همبستگی را در بین سایر مدل‌ها داشته است. از سوی دیگر با در نظر گرفتن معیار صباغ و همکاران، مقدار این آماره برای دو مدل ۳ متغیره (T-RH-Rs) و ۲ متغیره (RH-Rs) تقریباً یکسان و از بین این دو مدل، مدل فازی با دو ورودی تابش خورشیدی و رطوبت نسبی (۰/۰۲۹۵) نتایج بهتری داشته است. بنابراین تشخیص مدل بهتر با استفاده از معیارهای ارزیابی ارائه شده سخت می‌باشد و برای یافتن بهترین ترکیب از روش رتبه‌بندی بر اساس مجموع معیارها استفاده شده است. نتایج رتبه‌بندی در دوره آموزش مدل‌ها نشان می‌دهد که مدل ۳ متغیره دارای بهترین عملکرد می‌باشد. در مرحله تست نیز مدل ۳ متغیره به عنوان بهترین ترکیب شناخته شد (جدول ۳ و شکل ۲-ب).

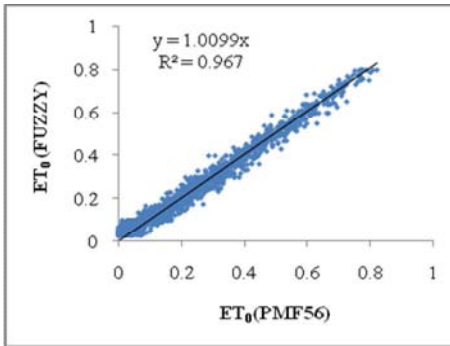
جدول ۲- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی PMF56 در مرحله آموزش.

رتبه*	R^2/t	t	MBE	RMSE	R^2	مدل
۳	۰/۰۱۷	۵۹/۶	-۰/۰۱۹	۰/۰۳۱	۰/۹۸	T-U ₂ -RH-Rs
۱	۰/۰۲۹۲	۳۳/۲	-۰/۰۱۴	۰/۰۳۵	۰/۹۷	T-RH-Rs
۲	۰/۰۲۹۵	۳۲	-۰/۰۱۸	۰/۰۴۸	۰/۹۴	RH-Rs
۴	۰/۰۲۱	۲۶/۸	-۰/۰۴۲	۰/۱۲۸	۰/۵۶	T-RH

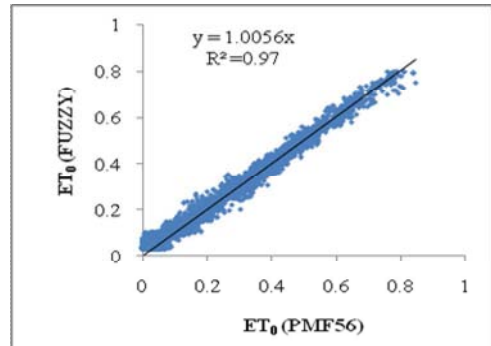
* رتبه‌بندی بر اساس مجموع معیارهای ارزیابی در نظر گرفته شده است.

جدول ۳- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی PMF56 در مرحله تست.

رتبه*	R^2/t	t	MBE	RMSE	R^2	مدل
۳	۰/۰۲۵	۳۹/۶	-۰/۰۲	۰/۰۳۱	۰/۹۸	T-U ₂ -RH-Rs
۱	۰/۰۴۱	۲۳/۵	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۹۸	T-RH-Rs
۲	۰/۰۴۵	۲۰/۹	-۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۹۴	RH-Rs
۴	۰/۰۲۳	۲۵/۴	-۰/۰۴	۰/۱۳	۰/۵۹	T-RH



(ب)



(الف)

شکل ۱- نمودار مقایسه نتایج محاسبه تبخیر و تعرق مدل فازی با ϵ ورودی (T-U₂-RH-Rs) در برابر مدل PMF56 (الف- دوره آموزش، ب- دوره تست).

همان‌طور که عنوان شد نتایج خروجی مدل‌های PMF56 و ASCE در مقابل هم نیز مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل این که مبنای تئوریک دو معادله ASCE و PMF56 تقریباً یکی است، همبستگی خوبی بین داده‌های این دو مدل مشاهده شد (جدول ۴).

جدول ۴- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های ترکیبی PMF56 و ASCE.

دوره	R^2	RMSE	MBE	t	R^2/t
آموزش	۰/۹۳۳	۰/۰۳۸	-۰/۰۰۵	۱۰/۶	۰/۰۹۱
تست	۰/۹۴۰	۰/۰۳۸	-۰/۰۰۵	۸	۰/۱۲۲

هم‌چنین به منظور بررسی کارایی مدل‌های فازی ارائه شده، مقایسه‌ای بین مدل‌های فازی و مدل ASCE نیز صورت گرفت. نتایج رتبه‌بندی معیارهای مختلف در مرحله آموزش نشان می‌دهد که در این حالت نیز مدل فازی ۳ متغیره بهترین و مدل فازی با دو متغیر دما و رطوبت نسبی بدترین عملکرد را داشته‌اند. به طوری که معیارهای R^2 ، RMSE، MBE، t و R^2/t برای مدل ۳ متغیره به ترتیب ۰/۹۳۳، ۰/۰۳۸، -۰/۰۰۵، ۱۳/۹ و ۰/۰۶۸ به دست آمد. نکته جالب این است که مدل‌های ۴ (T-U₂-RH-Rs) و ۲ متغیره (RH-Rs) دارای رتبه یکسانی هستند (جدول ۵). اما در دوره تست نتایج به طور مشابه نشان داد که بهترین مدل ۳ متغیره می‌باشد (جدول ۶).

جدول ۵- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی ASCE در مرحله آموزش.

رتبه*	R^2/t	t	MBE	RMSE	R^2	مدل
۲	۰/۰۳۹	۲۵	-۰/۰۱۴	۰/۰۴۵	۰/۹۶۴	T-U ₂ -RH-Rs
۱	۰/۰۶۸	۱۳/۹	-۰/۰۰۹	۰/۰۵۰	۰/۹۴۶	T-RH-Rs
۲	۰/۰۵۲	۱۷/۹	-۰/۰۱۳	۰/۰۵۹	۰/۹۲۵	RH-Rs
۳	۰/۰۲۶	۲۱/۷	-۰/۰۳۷	۰/۱۳۶	۰/۵۷۱	T-RH

جدول ۶- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل‌های فازی با مدل ترکیبی ASCE در مرحله تست.

رتبه*	R^2/t	t	MBE	RMSE	R^2	مدل
۲	۰/۰۵۶	۱۷/۳	-۰/۰۱۴	۰/۰۴۷	۰/۹۶۰	T-U ₂ -RH-Rs
۱	۰/۱۰۰	۹/۵	-۰/۰۰۸	۰/۰۵۰	۰/۹۴۸	T-RH-Rs
۳	۰/۰۸۵	۱۰/۹	-۰/۰۱۲	۰/۰۶۱	۰/۹۲۳	RH-Rs
۴	۰/۰۳۰	۲۰/۴	-۰/۰۳۴	۰/۱۳۵	۰/۶۰۳	T-RH

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می‌شود که مدل‌های فازی توسعه یافته با هر دو روش مدل‌های ترکیبی مورد مقایسه (PMF56 و ASCE) تطابق به نسبت بالایی داشته و بنابراین توانایی لازم برای برآورد تبخیر و تعرق در مقیاس زمانی ساعتی را دارا می‌باشند. همچنین با در نظر گرفتن معیارهای جدید ارزیابی مدل‌های تبخیر و تعرق (جاکوویدز و صباغ) و رتبه‌بندی معیارها انتخاب مدل بهتر به طور نسبی سهل‌تر شده است. براساس نتایج به دست آمده این پژوهش، اختلافات مشاهده شده در محاسبات تبخیر و تعرق به دست آمده از مدل فازی با دو مدل دیگر را می‌توان به عواملی نسبت داد که در کنار پارامترهای در نظر گرفته شده به عنوان ورودی مدل بر تبخیر و تعرق تاثیر دارند. با این حال به دلیل این که در برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی، تغییرات کوتاه مدت پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر و تعرق در نظر گرفته می‌شود، انتخاب پارامترهای مؤثر و در صورت امکان حذف برخی از آنها به منظور کاهش متغیرهای ورودی، می‌تواند کمک زیادی در برآورد سریع و کم هزینه تبخیر و تعرق ساعتی به خصوص در مدل‌سازی نماید. همان‌طور که نتایج نشان دادند پارامتر تابش خورشیدی به دلیل

این که منبع انرژی است بیشترین تأثیر را بر تبخیر و تعرق ساعتی دارد و از طرفی هم چون در ساعات مختلف روز تغییرات ناگهانی دارد، به نظر می‌رسد باعث بروز تفاوت‌هایی در تبخیر و تعرق روزانه به دست آمده از مجموع ساعتی با مقدار به دست آمده از مدل‌های ریاضی و تجربی شود. در این پژوهش نیز با مدل‌های ارائه شده، نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین تبخیر و تعرق برآورد شده از مدل‌های فازی (به ویژه مدل‌های ۳ و ۲ پارامتری) و دو روش PMF56 و ASCE وجود دارد و می‌توان از این مدل برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی استفاده نمود، زیرا در مدل‌های فازی به دلیل در نظر گرفتن پارامترهای ورودی و خروجی با عدم قطعیت بالا در آن‌ها، (که در برخی موارد اجتناب‌ناپذیر بوده و حتی جزئی از سیستم هستند) مانند برخی از مدل‌های ریاضی دیگر در محدوده مشخصی نسبت به تغییرات حساس نبوده و دارای انعطاف‌پذیری بالایی هستند، در نتیجه به خوبی می‌توانند پارامترهایی نظیر تبخیر و تعرق را که دارای عدم قطعیت بالایی هستند را برآورد کنند. این نتیجه مشابه نتایج به دست آمده از پژوهش‌های گذشته برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق با منطق فازی است. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که سیستم استنتاج فازی به دلیل داشتن مبانی تئوری دقیق، ابزار مفیدی برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق مرجع ساعتی بوده و در مقایسه با دو مدل PMF56 و ASCE که به پارامترهای متعدد نیاز دارند و همچنین دارای محاسبات پیچیده‌ای در محاسبه تبخیر و تعرق هستند، ابزار مفیدی در برآورد این پارامتر مهم اقلیمی در مقیاس زمانی ساعتی است.

منابع

1. Ansari, H., Davari, K. and Sanaie nezhad, H. 2010. Drought monitoring using a new index of standard rainfall evapotranspiration developed based on fuzzy logic. *J. Soil Water (Agricultural Industry and Science)*, 1:24. 38-52.
2. Allen, R.G., Raes, L.S. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy. 301p.
3. Ayttek, A. 2008. Co-active neurofuzzy inference system for evapotranspiration modeling, from Department of civil Engineering, Hydroulics Division Gaziantep university: <http://www.spiringle.com>
4. Bardossy, A., Bogardi, I. and Duckstein, L. 1990a. Fuzzy regression in hydrology. *Water Resources Research*, 26:7. 1497-1508.

5. Coa, Z. and Kandel, A. 1989. Application of some Fuzzy Implication Operators, *FSS.*, 3:42-52.
6. Dogan, Emrah. 2009. Reference Evapotranspiration Estimation using adaptive nero-fuzzy inference system, *J. Irrig. and Dria. Eng.* 58: 617-628.
7. Ghasem nezhad moghadam, N., Baghaie Nia, F. and Bafandeh Zende, A. 1999. Fuzzy logic in simple language. *Quality control Monthly Magazine*, 24:43-51.
8. Hashemi Najafi, F., Palangi, G.A. and Azbarmi., R. 2007. Estimation of reference Evapotranspiration using adaptive nero-fuzzy inference system, the 9th national seminar of Irrigation and reduction of evaporation, Kerman.
9. Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotran spiraiton models. *Agricultural water management* 3:95-97.
10. 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.
11. Jafari Mianaie, S. and Keshavarzi, A. 2008. Comparison of fuzzy and statistical regression methods to estimate the sediment load of rivers, Fourth National Congress of Civil Engineering. Tehran. (In Persian)
12. Kisi O.O. 2007. Adaptive neurofuzzy computing technique for Evapotranspiration Estimation. *J. Irrig. and Drain. Eng.* 133:4. 368-379.
13. Kisi, Ozgür. 2010. Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration, *J. Irrig. and Drian. Eng.* 136:3. 175-183.
14. Kureh Pazan Dezfuli, A. 2006. Theory principles of fuzzy sets and its applications in water problems modeling, *Jahad University Press of Industrial Amir Kabir University*, 261p. (In Persian)
15. Lee, C.C. 1990. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic in Controller-part I & II. *TEEE Transaction on systems, Man, and Cybernetics* March/April.
16. Monem, M.J., Khorami, J. and Heydariyan, S.A. 2007. Evaluation of irrigation networks Performance using fuzzy logic: A Case Study Maroon network. *Modares Technical and Engineering.* No. 27.
17. Odhiambo, L.O., Yoder, R.E. and Yoder, D.C. 2001a. Estimating of reference crop evapotranspiration using fuzzy state models. *Trans of the ASAE.* 44:3. 543-550.
18. Snyder, R.L. and Pruitt, W.O. 1985. Estimating reference evapotranspiration with hourly data. In: Snyder R.L., Pruitt W.O., Henderson E.W. and Dong, A. (Eds.). *CIMIS Final Report.* June 1985, Vol. 1. Land, Air and Water Resources Paper #10013-A. Univ. of California-Davis. Chpt. VII.
19. Shayannezhad, M. 2007. Determination of potential evapotranspiration using fuzzy regression, *J. Water Resources Research*, Vol. 3, third Year, Pp: 9-19.

20. Sabziparvar, A.A., Tafazoli, F., Zare Abyane, H., Banezhad, H., Mosavi Bayegi., M., Mohseni Movahed, A. and Meryanji, N. 2008. Comparison of several models to estimate reference evapotranspiration in a cold and semi arid climates in order to optimize usage of radiation models, *The J. Soil and Water (Agricultural Industry and Sciences)*. 2:22. 328-340.
21. Sayadi, H., Oulad ghafari, A., Faalian, A. and Ashraf Sadredini, A.J. 2009. Comparison of the performance of RBF and MLP neural networks for estimating reference crop evapotranspiration, *soil and water science Journal*. 1:19.1-12.
22. Vaziri, Zh., Salamat, A., Entesari, M.R., Maschi, M., Heydari., N. and Dehghani sanich, H. 2008. *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, national committee of Irrigation and Drainage press, 362p.

Archive of SID



Evaluating fuzzy inference systems for estimating hourly reference evapotranspiration (Case Study: Fariman)

***H. Moradi¹, M. Tamana², H. Ansari³ and M. Naderianfar⁴**

¹M.Sc. Student of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

²M.Sc. Student, Mathematical Sciences, Ferdowsi University of Mashhad,

³Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

⁴Ph.D. Student of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 2010/11/06; Accepted: 2011/07/19

Abstract

The most important component of the hydrologic cycle, which plays a key role in water resource management, crop yield simulation, and irrigation scheduling is evapotranspiration. Therefore, developing a low cost and precise model is very essential for hourly ET₀ calculations. Although, there are numerous empirical formulas, due to the complicated nature of the hourly evapotranspiration event, the data availability, high cost, and data gathering error, their performances are not all satisfactory. Thereafter, this paper develops an hourly ET₀ estimation model based on fuzzy inference system (FIS) technique. After analyzing the different models and different combinations of hourly meteorological data, hourly reference evapotranspiration calculated with four fuzzy models. Penman-Montieth-FAO56 Model considered as the comparison basis for hourly estimating reference evapotranspiration models. Comparing models was done with mean root squared error, mean deviation error, coefficient of determination, Jacovides (t) and Sabagh, et al (R^2 / t) criteria. The Required data gathered from the private weather station in Fariman city. With removing missing data, 9128 hourly data extracted from two-year statistical period, 2008-2009. Meanwhile, 70 percent of the data was used for model training, and 30 percent for model testing. The results showed that, fuzzy model output is acceptable in relation to Penman-Montieth-FAO56 and ASCE models output. The fuzzy model with four inputs has the highest correlation (0.99) to reference model. The fuzzy model with two inputs: solar radiation and relative humidity, presented proper values for evaluation criteria (RMSE=0.048, MBE=-0.018, $R^2=0.97$, $t=32$, and $R^2/t=0.0295$) in training phase. Under the testing phase, results were very similar to training phase. The comparison of Fuzzy model outputs with ASCE models also indicated that fuzzy model with three inputs of radiation, relative humidity, and temperature has the highest matching value (RMSE=0.05, MBE=-0.014, $R^2=0.95$, $t=13.9$ and $R^2/t=0.068$), in the training phase, which was justified with testing results. According to this study, fuzzy model can be a proper method for estimating hourly reference evapotranspiration. While, fuzzy model is simple, accurate, and does not have complex calculations like hybrid models.

Keywords: Fuzzy Inference System, Hourly Evapotranspiration, ASCE model, Penman-Montieth-FAO56 Model

* Corresponding Author; Email: moradi.hu206@gmail.com