

ارائه مدل فازی به منظور برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی

حسین انصاری^{۱*} - حوریه مرادی^۲

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۲۳

تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۲/۱

چکیده

با توجه به اهمیت تعیین دقیق و به موقع تبخیر و تعرق در محاسبات بیلان آبی، شبیه سازی تولیدات گیاهی و برنامه ریزی های آبیاری از یک سو و نبود داده های مناسب هواشناسی از سوی دیگر، ارائه یک مدل ساده، کم هزینه و دقیق را در ارائه این پارامتر ضروری می نماید. لذا این تحقیق با هدف استفاده از توانمندی های سیستم استنتاج فازی (FIS) نسبت به برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی با استفاده از حداقل داده های هواشناسی صورت گرفت. براین اساس پس از بررسی مدل های مختلف موجود و بررسی ترکیب های مختلف داده های ساعتی هواشناسی، مدل نهایی برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی تنها با استفاده از داده های تابش خالص خورشیدی ارائه شد. مدل فازی ارائه شده با یک پارامتر ورودی که در ۴۸ سطح تعریف شده با یکار بردن ۲۳۰ قانون در سیستم استنتاج ممدانی با استفاده از روش نافازی سازی مرکز ثقل، تبخیر و تعرق مرجع ساعتی را به صورت عدد حقیقی بدست می دهد. با توجه به نبود داده در ایران برای آموزش مدل از میان ۱۱۴ ایستگاه مورد بررسی در کالیفرنیا آمریکا، داده های ایستگاه شماره ۲۰۱ بنام یوسی - اندراد که دارای بیشترین دامنه تغییرات داده های تابش خالص بود، انتخاب شد. همچنین برای تست مدل از ۱۳ ایستگاه با شرایط اقلیمی متفاوت که بطور تصادفی انتخاب شدند، استفاده گردید. مقادیر تبخیر و تعرق ساعتی حاصل از مدل فازی با مدل های ترکیبی پنمن - مانتیس - فائو۵۶ و سیمیس - پنمن مورد مقایسه قرار گرفت. کارایی مدل های مورد مقایسه با استفاده از آماره های ریشه میانگین مربع خطا، خطای انحراف میانگین، ضریب تعیین و معیار جاکوویز (t) و معیار صباغ و همکاران (R^2/t) مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه نتایج مدل فازی ارائه شده تنها با یک پارامتر ورودی با مدل سیمیس در مقایسه با مدل پنمن-فائو۵۶ با میانگین مربع خطا $RMSE=0.07$ ، $MBE=-0.004$ ، $R^2=0.95$ ، $t=4/61$ و $R^2/t=0.21$ در مرحله آموزش، دقت بالاتر مدل فازی را نشان داد. در مرحله تست نیز مدل فازی همبستگی بالایی با مدل CIMIS داشت ($R^2=0.94$ ، $RMSE=0.0693$)، $MBE=-0.0384$ and $R^2/t=0.018$ ، با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق، می توان مدل فازی را به عنوان یکی از روش های برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی معرفی نمود.

واژه های کلیدی: سیستم استنتاج فازی، مدل سیمیس-پنمن، مدل پنمن-مانتیس-فائو۵۶، تبخیر و تعرق ساعتی

مقدمه

را در برخی از مناطق با مشکل مواجه کرده است (۹). با توجه به اینکه تبخیر و تعرق یک پدیده غیر خطی و پیچیده است، تهیه یک مدل ریاضی برای آن با در نظر گرفتن تمام فاکتورهای اقلیمی موثر در آن کاری دشوار و در صورت امکان نیز بدلیل وجود عدم قطعیت در پارامترهای موثر بر آن با خطا های قابل توجهی روبروست، همچنین اکثر این مدلها نیاز به اطلاعات ورودی زیادی دارد که اندازه گیری آنها مشکل، وقت گیر و هزینه بر است. از این گذشته هرمدل ریاضی برای یک اقلیم خاص تهیه شده و برای آن اقلیم معتبر است (۵). بنابراین با توجه به ماهیت تبخیر و تعرق استفاده از مدل فازی می تواند ابزار مناسبی برای مدل کردن پارامترهای با عدم قطعیت بالا باشد، ضمن این که امکان مدل کردن سیستم های غیر خطی را

تبخیر و تعرق یکی از مهمترین اجزای چرخه هیدرولوژیکی می باشد و تخمین دقیق آن برای بسیاری از مطالعات نظیر بیلان هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستم های آبیاری، شبیه سازی تولید گیاهی و برنامه ریزی و مدیریت منابع آب ضروری است (۱۲). اما تعدد پارامترهای مورد نیاز در محاسبه تبخیر و تعرق از یک سو و عدم اندازه گیری برخی از پارامترها از سوی دیگر، تخمین درست آن

۱ و ۲ - استادیار و دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

(* - نویسنده مسئول: Email: Ansari_hos@yahoo.com)

تحقیقات نشان دادند، که مدل فازی ابزار توانمندی برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع روزانه بوده و می‌توان آن را برای برآورد این پارامتر پیشنهاد کردند. علاوه بر منطق فازی، برخی از محققین از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده کرده و این شبکه‌ها را به عنوان ابزار مناسبی برای برآورد این پارامتر معرفی کرده‌اند (۵ و ۷).

با توجه به نتایج مطالعات فوق در خصوص توانمندی منطق فازی در برآورد تبخیر و تعرق روزانه، هدف اصلی این تحقیق، استفاده از سیستم استنتاج فازی جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی و ارائه مدل فازی مناسب می‌باشد. علاوه بر این، به جهت نبود این اطلاعات از یک سو و از سوی دیگر هزینه بالای ثبت اطلاعات ساعتی برای پارامترهای هواشناسی مرتبط با تبخیر و تعرق، سعی شده تا نسبت به ارائه مدلی با استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی اقدام گردد. مسلماً در صورت امکان ارائه این چنین مدلی، می‌توان انتظار داشت که به دلیل کاهش خطای ناشی از اندازه‌گیری پارامترهای ورودی هواشناسی (استفاده از داده کمتر)، مدل دقت بالایی در برآورد داده‌های خروجی خواهد داشت. لازم به ذکر است در مناطقی که سرعت باد، دمای نقطه شبنم و یا میزان ابرناکی در طول روز به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند، محاسبه تبخیر و تعرق بطور ساعتی بطور معمول بهتر از روزانه است. همچنین بدلیل موجودیت انرژی در طول روز، توان تبخیر کنندگی محیط به شدت تغییر کرده و نمی‌توان با میانگین‌گیری ساده مقادیر ساعتی، اثرات آن را به تبخیر و تعرق روزانه تعمیم داد (۲ و ۱۲) و بنابراین همین امر موجب بروز خطای زیادی در محاسبه تبخیر و تعرق روزانه می‌شود. با پیشرفت علم الکترونیک داده‌های هواشناسی در ایستگاههای خودکار، بطور ساعتی یا لحظه‌ای گزارش می‌شود. بنابراین می‌توان با استفاده از این داده‌ها مقدار تبخیر و تعرق در بازه‌های زمانی کوتاه‌تر را بطور دقیق برآورد و آن را به دوره‌های زمانی طولانی‌تر تعمیم داد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

به دلیل نبود داده‌های مناسب در ایران، داده‌های هواشناسی مورد نیاز در تحقیق حاضر از ایستگاههای خودکار ایالت کالیفرنیا که سایت اینترنتی www.cimis.water.ca.gov قرار داده شده، گرفته شده است. سیستم مدیریت اطلاعات آبیاری کالیفرنیا به همت سازمان منابع آب و دانشگاه کالیفرنیا^۱ CIMIS در سال ۱۹۸۲ ایجاد شده است. این سیستم با یک برنامه بیش از ۱۴۰ ایستگاه هواشناسی خودکار مستقر در ایالت کالیفرنیا را مدیریت می‌کند. استفاده از این

بدست می‌دهد و نیاز به رابطه ریاضی پیچیده برای پدیده‌های نامشخص نظیر تبخیر و تعرق را ندارند. منطق فازی تکنولوژی جدیدی است که شیوه‌های مرسوم برای طراحی و مدل سازی یک سیستم را که نیازمند ریاضیات پیشرفته و نسبتاً پیچیده است، با استفاده از مقادیر و شرایط زبانی و یا به عبارتی دانش فرد خبره و با هدف ساده سازی و کارآمد شدن طراحی سیستم جایگزین می‌کند. اگر چه سیستم‌های فازی پدیده‌های غیر قطعی و نامشخص را توصیف می‌کند با این حال تئوری مجموعه فازی یک تئوری دقیق است (۸ و ۱۰).

در طی سالهای گذشته محققین همواره درصدد مدل کردن پدیده تبخیر و تعرق برآمده اند. بگونه 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 تحقیقات زیادی در مورد کاربرد سیستم های فازی در زمینه مهندسی علوم صورت گرفته که می توان به مواردی همچون مدل سازی خشکسالی، مدیریت مخزن، برآورد رسوب، پیش بینی هوا، پیش بینی رواناب و جریان رودخانه اشاره کرد (۱۰). اکثر تحقیقات انجام شده برای مدل سازی تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مقیاس زمانی روزانه بوده و بررسی مدل سازی تبخیر و تعرق مرجع ساعتی با استفاده از سیستم استنتاج فازی تاکنون انجام نشده است. اما در زمینه تخمین تبخیر و تعرق روزانه و ماهانه (غیر ساعتی) با استفاده از منطق فازی می توان به مواردی اشاره کرد، هاشمی نجفی و همکاران (۱۳) از سیستم استنتاج فازی - عصبی تطبیقی به منظور تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع در منطقه اهواز برای سالهای ۱۹۵۷ تا ۲۰۰۰ میلادی استفاده کرد. شایان نژاد و همکاران (۶)، کارایی روش رگرسیون فازی در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع روزانه و مقایسه آن با روش های عصبی مصنوعی و پنمن - ماتیس را در منطقه همدان مورد بررسی قرار داد. ادھیامبو (۲۷) و همکاران روش منطق فازی را برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع بکار برد. جیا بینگ و همکاران (۲۲) 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 کرد. کیسی و همکاران (۲۴) دقت مدل شبکه عصبی - فازی را در تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع مورد ارزیابی قرار دادند. آیتک (۱۵) از مدل سیستم استنتاج فازی - عصبی (ANFIS) برای تخمین ET_0 برای منطقه کالیفرنیا استفاده کردند. دوگان (۱۹) برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع از سیستم تطبیقی فازی - عصبی استفاده نمود. کیسی (۲۵) از سیستم تلفیقی فازی و الگوریتم ژنتیک (Fuzzy Genetic) برای مدل سازی تبخیر و تعرق مرجع روزانه در منطقه کالیفرنیا استفاده کرد. اگرچه مطالعات مورد اشاره در فوق، از داده‌های ورودی متفاوتی برای مدل فازی استفاده کردند و مدل‌های ارائه شده فازی با روش‌های متفاوت برآورد تبخیر و تعرق مقایسه شدند، اما تقریباً نتایج همه این

1- California Irrigation Management Information System

بدست می‌آید:

$$e_s = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 T_{hr}}{T_{hr} + 237.2} \right] \quad (5)$$

مدل CIMIS - PM

دورنبوس و پروت (۲۰) در سال ۱۹۷۷ ضرایب b_w و a_w را برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن در مقیاس زمانی ساعتی در معادله پنمن وارد نمودند. این روش برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی که با تغییر تابع باد در معادله پنمن صورت گرفته است، مورد پذیرش سیستم مدیریت اطلاعات آبیاری کالیفرنیا واقع شده و معادله پنمن با تابع باد که توسط دانشگاه کالیفرنیا ارائه شده بود، در نظر گرفته شده و به معادله جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی معروف شده است. ضرایب b_w و a_w در معادله، با توجه به تابش خالص خورشیدی بصورت زیر در نظر گرفته می‌شود (۱۵، ۱۶ و ۱۷):

$$Rn > 0 \quad a_w = 0.29, \quad b_w = 0.53 \quad (6)$$

$$Rn \leq 0 \quad a_w = 1.14, \quad b_w = 0.4 \quad (7)$$

مقادیر فوق در رابطه زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$ET_o = \frac{\left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (Rn - G) + 0.268 \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] (a_w + b_w u_2) VPD}{\lambda} \quad (8)$$

در معادله فوق، G صفر در نظر گرفته شده و γ ثابت سایکرومتری (کلیو پاسکال بر درجه سانتیگراد) بوده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma = 0.000646 (1 + 0.000946 T_{hr}) p \quad (9)$$

که، در رابطه بالا فشار بارومتریک در ارتفاع Z از سطح دریا بوده و از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$P = 101.3 - 0.0115 z + 5.44 \times 10^{-7} z^2 \quad (10)$$

که، T میانگین دمای هوا (ساعتی) در ارتفاع $1/5$ تا 2 متری از سطح زمین (درجه سانتیگراد)، U_2 میانگین ساعتی سرعت باد در ارتفاع 2 متری (متر بر ثانیه)، VPD کمبود فشار بخار اشباع بوده و λ گرمای نهان تبخیر به مگا ژول بر کیلوگرم است، که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \times 10^{-3}) T \quad (11)$$

مدل فازی

ساختار مدل فازی

هرمدل فازی شامل سه بخش پارامترهای ورودی، قواعد فازی که موتور استنتاج بوده و پارامترهای خروجی است (شکل ۲). مدل‌های فازی از روش‌های مختلفی برای توصیف پارامترهای ورودی و خروجی و چگونگی ترکیب قواعد برای استنتاج نتیجه استفاده می‌کنند. در مدل‌های فازی ورودی‌ها بصورت متغیرهای بیانی فازی

شبکه خودکار باعث صرفه جویی در آب، انرژی و هزینه‌های دیگر شده و همچنین منجر به سهولت کار مهندسان، کشاورزان و طراحان فضای سبز می‌شود (۲۸). حسگرهای مورد استفاده در این ایستگاه‌ها عبارتند از: حسگر تابش خورشیدی (Pyranometer) در ارتفاع 2 متری که از آن برای محاسبه تابش خالص خورشیدی (Rn) استفاده می‌شود. حسگر دمای هوا (Thermistor) در ارتفاع $1/5$ متری و از این داده برای محاسبه پارامترهایی مانند دمای نقطه شبنم، فشار بخار، تابش خالص خورشیدی و تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. حسگر رطوبت نسبی در همان محفظه اندازه‌گیری دمای هوا در ارتفاع $1/5$ متری می‌باشد و از این داده نیز در محاسبه دمای نقطه شبنم، فشار بخار و تبخیر و تعرق استفاده می‌شود. حسگر سرعت باد (Three - Cup anemometer) در ارتفاع 2 متری قرار داشته و برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دیگر حسگرهای موجود در این ایستگاه‌های خودکار می‌توان به حسگرهای اندازه‌گیری جهت باد و بارش نیز اشاره نمود.

مدل‌های محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ساعتی

مدل پنمن - مانیتیس - فائو ۵۶ (PMF56)

شکل کلی معادله جهت محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در گام زمانی ساعتی بصورت زیر است (۱۴):

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta (Rn - G) + \gamma \frac{37U_2}{T + 273} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن، ET_o تبخیر و تعرق مرجع ساعتی (میلیمتر)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای هوا (کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد)، Rn تابش خالص در سطح چمن (مگاژول بر مترمربع بر ساعت)، G چگالی شار حرارتی خاک (مگا ژول بر متر مربع بر ساعت) است که برای تعیین آن از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$G = 0.1Rn \quad \text{اگر } Rn > 0 \text{ یا روز هنگام باشد} \quad (2)$$

$$G = 0.5Rn \quad \text{اگر } Rn \leq 0 \text{ یا شب هنگام باشد} \quad (3)$$

و T میانگین دمای هوا (ساعتی) در ارتفاع $1/5$ تا 2 متری از سطح زمین (درجه سانتیگراد)، U_2 میانگین ساعتی سرعت باد در ارتفاع 2 متری (متر بر ثانیه)، e_s میانگین فشار بخار اشباع در ارتفاع $1/5$ تا 2 متری (کیلو پاسکال)، e_a میانگین فشار بخار واقعی هوا در ارتفاع $1/5$ تا 2 متری (کیلو پاسکال)، γ ثابت سایکرومتری (کیلو پاسکال بر درجه سانتیگراد) است. برای محاسبه فشار بخار واقعی هوا (e_a) در گام زمانی ساعتی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$e_a = e_s \frac{RH_{hr}}{100} \quad (4)$$

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 از رابطه زیر

تعریف شدند:

$$A = \{ (x, \mu_{A(x)}) \mid x \in X, \mu_{A(x)} \in [0,1] \} \quad (12)$$

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

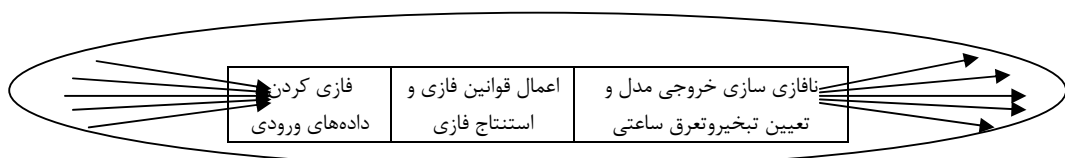
ضمناً برای تعیین پارامترهای ورودی مدل، در ابتدا از بین پارامترهای موثر بر تبخیر و تعرق مرجع ساعتی و با توجه به داده‌های موجود هواشناسی، مناسب‌ترین و موثرترین ورودی‌ها یعنی تشعشع خالص انتخاب شد. سپس مدل‌سازی فازی با سیستم استنتاج فازی حداقل - حداکثر ممدانی و روش نا فازی مرکز ثقل انجام شد. برای فازی‌سازی ورودی و خروجی، با توجه به تعریف ارائه شده در معادله ۱۲، در ابتدا طبقه‌بندی فازی ورودی‌ها و خروجی‌ها انجام و نهایتاً توابع عضویت مجموعه‌های فازی ورودی و خروجی براساس مقادیر داده‌های موجود تعیین شدند. لازم به توضیح است، توابع عضویت فازی را می‌توان بر اساس روند تغییرات تابع عضویت، خصوصیات فیزیکی مسئله مورد بحث و نظرات کارشناسی تعیین کرد که این توابع خود نیز می‌تواند دارای درجات مختلف همپوشانی باشد (۱۸).

مطرح شده و با قواعد فازی (اگر - آنگاه) به خروجی‌هایی که بصورت متغیرهای بیانی فازی تعریف شده، متصل می‌شوند (۱۱). با توجه به اینکه در اغلب کاربردها، ورودی و خروجی سیستم فازی اعداد حقیقی هستند، باید واسطه‌هایی بین موتور استنتاج فازی و محیط وجود آید. این واسطه‌ها امکان تبدیل اعداد ترد را به اعداد فازی و بالعکس فراهم می‌آورند. یکی از بخش‌های مهم هر مدل فازی سیستم استنتاج فازی است. سیستم استنتاج فازی بر اساس قواعد اگر - آنگاه بنا نهاده شده است، بطوری که با استفاده از قواعد مزبور می‌توان ارتباط بین تعدادی متغیر ورودی و خروجی را بدست آورد. از شاخص‌های انتخاب نوع موتور استنتاج می‌توان به معنای شهودی، راندمان محاسباتی و ویژگی خاص اشاره نمود (۳). به منظور ساخت مدل فازی در این تحقیق، 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 (شکل ۲).

لازم به ذکر است، زیر مجموعه‌های فازی ورودی به صورت زیر



شکل ۱- نمونه تجهیزات نصب شده در ایستگاه‌های خودکار کالیفرنیا



شکل ۲- معماری کلی مدل فازی مورد استفاده برای تعیین تبخیر و تعرق

بررسی‌های انجام گرفته بر روی داده‌های ۱۱۴ ایستگاه هواشناسی مستقر در ایالت کالیفرنیا، ایستگاه شماره ۲۰۱ بنام UC-Andrade(Imperial/Coachella/vally) که دارای بیشترین دامنه تغییرات تابش خالص خورشیدی بود، انتخاب شد. دوره آماری مورد استفاده برای آموزش مدل از اول ژانویه سال ۲۰۰۹ تا اول ژانویه ۲۰۱۰ در نظر گرفته شده که پس از حذف نقاط پرت و گمشده، تعداد ۶۵۳۵ داده ساعتی مربوط به متغیرهای هواشناسی بدست آمد. برای تست مدل نیز از داده‌های ۱۳ ایستگاه در همان دوره آماری که بطور تصادفی انتخاب شده بودند، استفاده گردید.

معیارهای عملکرد مدل

در این تحقیق، برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل فازی با مقادیر بدست آمده از مدل‌های پنمن-مانتیس-فائو و CIMIS-پنمن، آزمون‌های آماری زیر که توسط جاکوویدز (۲۱) پیشنهاد گردیده، استفاده شد. جاکوویدز 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 عموماً برای مقایسه مدل‌های تبخیر و تعرق استفاده می‌شود، می‌بایست از معیار سومی بنام t که ترکیبی از دو معیار فوق بوده، استفاده شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (ET_{model} - ET_{obs})^2}{n}} \quad (13)$$

$$MBE = \frac{\sum (ET_{model} - ET_{obs})}{n} \quad (14)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{(RMSE^2 - MBE^2)}} \quad (15)$$

که، t معیار جاکوویدز 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 و یا t قابل قبول باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار است. بدین منظور، در تحقیق حاضر علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکوویدز، از معیار ترکیبی جدید صباغ و همکاران (۴) 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.

نتایج و بحث

همانطور که عنوان شد در ابتدا برای تعیین پارامترهای مناسب ورودی مدل با توجه به داده‌های موجود هواشناسی، روند تغییرات پارامترهای موثر بر تبخیر و تعرق مرجع ساعتی ارزیابی و همبستگی این پارامترها با به تبخیر و تعرق مرجع ساعتی بررسی شد (جدول ۱).

با توجه به کاربرد گسترده توابع عضویت مثلثی و ذوزنقه‌ای در مسائل کاربردی، در این تحقیق برای سازی متغیرهای ورودی و خروجی از هر دو تابع فوق استفاده شده است.

تعریف قوانین فازی و ترکیب توابع

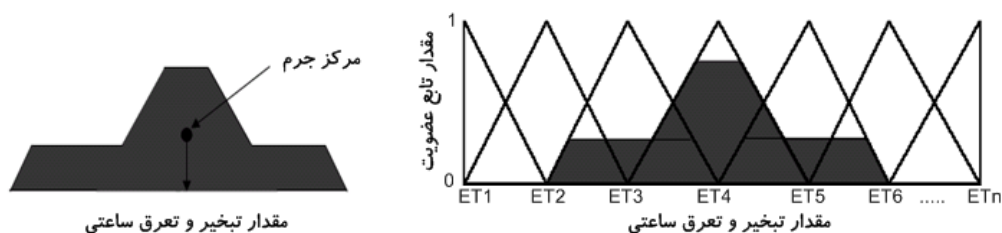
تعریف قوانین فازی برای ترکیب توابع عضویت تعریف شده برای ورودی مدل فازی یکی از مهمترین مراحل ساخت مدل فازی می‌باشد. برای این کار بعد از سازی توابع ورودی و خروجی مدل، با توجه به هریک از سطوح تعریف شده، قوانین مختلفی با وزنه‌های متفاوت تعریف شد. یعنی با استفاده از داده‌های موجود وزن قوانین مختلف به این صورت تعیین شدند که مقدار خروجی برای ورودی مشخص الزاما 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 بدست می‌آید، قابل محاسبه است. با این روش برای مدل ارائه شده در مجموع با داشتن ۴۸ سطح برای ورودی مدل؛ یعنی تابش خالص (R_n) و ۲۲ سطح برای خروجی مدل یا همان تبخیر و تعرق مرجع ساعتی (ET_0)، ۲۳۰ قانون (Rule) تعریف شد. به منظور محاسبه خروجی مدل نیز قبل از هر چیز باید روش‌های استنتاج فازی، استلزام فازی، تجمیع قوانین را مشخص نمود. در این تحقیق برای استنتاج فازی از روش ممدانی (Mamdani) و برای استلزام (Implication) از روش حداقل (Min) استفاده شده است (۱۸، ۲۲ و ۲۶). از سوی دیگر بدلیل اینکه معمولاً در هر مدل فازی برای محاسبه خروجی، بیشتر از یک قانون مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا باید نتایج هریک از قوانین را با شکل مناسب که معروف به تجمیع قوانین فازی (Aggregation) است، ترکیب کرد. روش‌های زیادی برای این کار وجود دارد که در این تحقیق از روش حداکثر (Max) استفاده شده است.

نا فازی سازی خروجی مدل

پس از محاسبه استنتاج نهایی، که منتهی به یک نتیجه بصورت فازی می‌شود، باید جواب بدست آمده به عدد حقیقی تبدیل شود. روش‌های نا فازی سازی زیادی توسط محققین ارائه شده است، که مهم‌ترین این روشها عبارتند از: روش میانگین حداکثر، روش مرکز ثقل، روش تقاطع نیمسازها، روش کمترین مقدار حداکثر و روش بیشترین مقدار حداکثر (۱۰). از میان این روش‌ها، به جهت کاربرد زیاد و دقت مناسب روش مرکز ثقل، برای نا فازی سازی خروجی‌های مدل فازی از این روش استفاده شد (شکل ۳).

آموزش و تست مدل

داده‌های مورد استفاده برای آموزش مدل در این مطالعه، با



شکل ۳- نافازی سازی خروجی مدل با روش مرکز ثقل

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

پارامترها	میانگین	انحراف معیار	ضریب چولگی	حد اقل	حداکثر	ضریب همبستگی نسبت به تبخیر و تعرق
تابش خورشیدی (وات بر مترمربع)	۲۷۹/۶	۳۵۸/۱	۰/۹۱	۰/۰	۱۲۴۱	۰/۹۶
تشعشع خالص (وات بر مترمربع)	۱۲۳/۶	۲۲۵/۵	۰/۹۷	-۱/۰۵	۷۸۳	۰/۹۷
دمای هوا (سانتیگراد)	۲۳/۶۷	۹/۶۸	-۰/۰۸	۰/۰	۴۶/۲۰	۰/۶۳
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۲/۲۷۱	۱/۸۱	۱/۴۸	۰/۴	۱۳/۶۰	۰/۳۴
رطوبت نسبی (درصد)	۴۰/۷۹	۲۰/۴۴	۰/۴۶	۶/۰	۱۰۰	-۰/۱۶
تبخیر و تعرق (میلی‌متر بر ساعت)	۰/۲۵	۰/۳۹	۱/۰۸	۰/۰	۱/۱۸۰	-

جدول ۲- ضریب همبستگی بین تشعشع خالص و پارامترهای هواشناسی مؤثر بر تبخیر و تعرق

پارامترها	بدون تاخیر زمانی	با تاخیر زمانی یک ساعته	با تاخیر زمانی دو ساعته	با تاخیر زمانی سه ساعته
دمای هوا (سانتیگراد)	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۶۵
سرعت باد (متر بر ثانیه)	۰/۱۹	۰/۲	۰/۲۱	۰/۲
رطوبت نسبی (درصد)	-۰/۵۳	-۰/۶۱	-۰/۶۵	-۰/۶۴

نتایج فوق نشان می‌دهند که همبستگی بسیار بالایی میان تبخیر و تعرق ساعتی و تابش خالص وجود دارد. در مرحله بعد به منظور کاهش پارامترهای ورودی مدل، رابطه میان تابش خالص با دیگر پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بررسی نشان دادند که همبستگی نسبتاً بالایی هم میان تابش خالص با دما و رطوبت نسبی در مقایسه با سرعت باد وجود دارد. با ایجاد ۳ تاخیر زمانی (Lag time) یک ساعته، دو ساعته و سه ساعته، در پارامترهای دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد، معلوم شد که روند تغییرات این پارامترها متأثر از روند تغییرات تابش خالص خورشیدی ساعت قبل بوده (جدول ۲) و در نتیجه می‌توان تابش خالص خورشیدی را به عنوان مؤثرترین پارامتر بر تبخیر و تعرق مرجع ساعتی معرفی نمود.

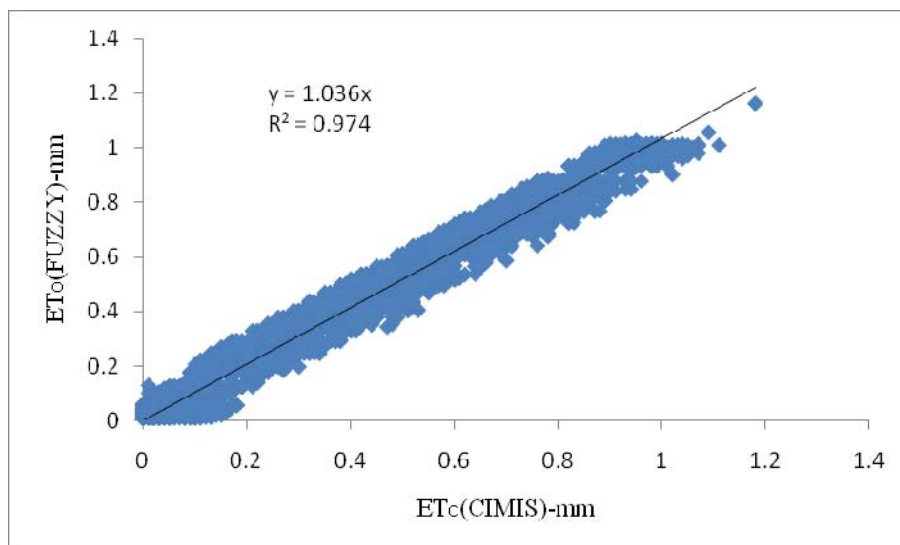
با انتخاب پارامتر تشعشع خالص به عنوان ورودی مدل و بررسی دامنه تغییرات آن، همان طور که قبلاً اشاره شد برای آموزش مدل از داده‌های ایستگاه شماره ۲۰۱ استفاده شد. در این مرحله، مقادیر تبخیر و تعرق بدست آمده از مدل CIMIS براساس توصیه سازمان منابع آب و دانشگاه کالیفرنیا به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شد و همانطور که عنوان شد، در مرحله تست مدل از داده‌های ۱۳ ایستگاه که بطور تصادفی انتخاب شده بودند و دارای اقلیم‌های متفاوت بودند، استفاده شد. نتایج حاصل در این مرحله هم نشان می‌دهند که مدل فازی با هر دو مدل فوق همبستگی بالایی داشته (جدول ۴ و ۵) و بدلیل یکسان بودن تئوری دو مدل PMF56 و CIMIS، نتایج این دو مدل هم از همبستگی بالایی برخوردارند (جدول ۶).

نتایج مدل‌های فازی و PMF56 با آن مقایسه شدند (جدول ۳ و شکل ۴)، همچنین نتایج مدل فازی با مدل PMF56 هم مقایسه شد (شکل ۵). نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین مدل فازی با مدل‌های CIMIS و PMF56 وجود دارد و این مدل بخوبی می‌تواند تبخیر و تعرق مرجع ساعتی را تنها با یک متغیر ورودی محاسبه نماید. ضمناً بدلیل اینکه مبنای تئوریک دو معادله CIMIS و PMF56 تقریباً یکی است، لذا همبستگی خوبی هم بین داده‌های این مدل وجود دارد.

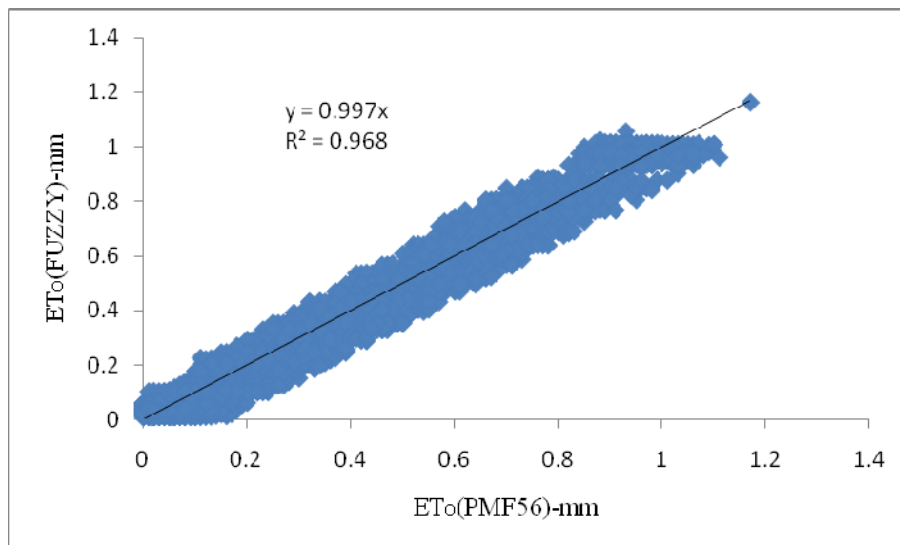
همانطور که عنوان شد، در مرحله تست مدل از داده‌های ۱۳ ایستگاه که بطور تصادفی انتخاب شده بودند و دارای اقلیم‌های متفاوت بودند، استفاده شد. نتایج حاصل در این مرحله هم نشان می‌دهند که مدل فازی با هر دو مدل فوق همبستگی بالایی داشته (جدول ۴ و ۵) و بدلیل یکسان بودن تئوری دو مدل PMF56 و CIMIS، نتایج این دو مدل هم از همبستگی بالایی برخوردارند (جدول ۶).

جدول ۳- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل فازی با مدل‌های ترکیبی PMF56 و CIMIS در مرحله آموزش

مدل	R ²	RMSE(mm/hr)	MBE(mm/hr)	t	R ² /t
CIMIS - Fuzzy	۰/۹۷	۰/۰۷	۰/۰۰۴	۴/۶۱	۰/۲۱
CIMIS - PMF56	۰/۹۸	۰/۰۴۶	۰/۰۱۷	۳۲/۳۷۴	۰/۰۳



شکل ۴- مقایسه برآورد تبخیر و تعرق با مدل فازی و مدل CIMIS (آموزش مدل)



شکل ۵- مقایسه برآورد تبخیر و تعرق با مدل فازی و مدل PMF56 (آموزش مدل)

نشان می‌دهد که مقادیر پیش بینی شده توسط مدل فازی بیشتر از مقادیر محاسبه شده از مدل CIMIS است. مقدار پارامتر RMSE ارائه شده در جدول ۴ نیز نشان می‌دهد که اختلاف تک‌تک مقادیر پیش بینی شده در مدل فازی تا حدود زیادی با مقادیر محاسبه شده

با محاسبه دیگر پارامترهای ارزیابی عملکرد در ایستگاه‌های مورد استفاده برای تست مدل، میانگین خطای گرایش (MBE) در مدل فازی در مقایسه با مدل CIMIS، بین ۰/۰۲ تا ۰/۰۶ بدست آمد که مقدار پائین نشان دهنده دقت بالای مدل فازی است، علاوه بر این هم

CIMIS دارد. در سایر ایستگاه‌های مورد بررسی نیز نتایج بسیار نزدیک به هم و مشابهی بدست آمد. نتایج مرحله تست هم حکایت از این داشت که مدل فازی با توجه به مناسب بودن آماره‌های آزمون، از دقت بالایی در برآورد تبخیر و تعرق ساعتی تحت اقلیم‌های مختلف برخوردار است.

با مدل CIMIS متناظر است. مقدار این متغیر آماری برای مدل فازی در ایستگاه‌های مورد بررسی بین ۰/۰۶ تا ۰/۰۸ میلی‌متر در ساعت متغیر بود که این مقادیر کم، نشان دهنده دقت بالای سیستم استنتاج فازی است. همچنین با محاسبه آماره‌های R^2/t و t در تمام ایستگاهها، نتیجه شد که مدل فازی در ایستگاه شماره ۳۰ با t و R^2/t به ترتیب برابر ۰/۰۰۸ و ۱۱۹/۶ بیشترین تطابق را با نتایج مدل

جدول ۴- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل فازی با مدل‌های ترکیبی CIMIS در مرحله تست

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	R^2	RMSE(mm/hr)	MBE(mm/hr)	t	R^2/t	
۲۱	Kettleman	San Joaquin Valley	۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۰۲	۳۲	۰/۰۲۹
۳۰	Nicolaus	Sacramento Valley	۰/۹۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۱۱۹/۶	۰/۰۰۸
۳۵	Bishop		۰/۹۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۷۷/۱۲۲	۰/۰۱۲
۳۹	Parlier	San Joaquin Valley	۰/۹۵	۰/۰۷	۰/۰۵	۹۳/۵۲	۰/۰۱
۴۱	Calipatria/Mulberry	Imperial/Coachella Vall	۰/۹۶	۰/۰۶	۰/۰۲	۲۷/۷۰	۰/۰۳۵
۴۳	McArthur	Northeast Plateau	۰/۹۳	۰/۰۸	۰/۰۶	۹۷/۳۲	۰/۰۱
۴۴	U.C. Riverside	Los Angeles Basin	۰/۹۲	۰/۰۶	۰/۰۳	۴۰	۰/۰۲۳
۴۷	Brentwood	San Francisco Bay	۰/۹۱	۰/۰۷	۰/۰۵	۵۵	۰/۰۱۷
۵۲	San Luis Obispo	Central Coast Valleys	۰/۹۶	۰/۰۸	۰/۰۶	۸۹/۷۳	۰/۰۱۱
۵۴	Blackwells Corner	San Joaquin Valley	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۰۲	۳۰/۷۰	۰/۰۳
۵۶	Los Banos	San Joaquin Valley	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۵۴/۴۳	۰/۰۱۷
۵۷	Buntingville	Northeast Plateau	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۴۷/۱۲۱	۰/۰۲
۶۲	Temecula	South Coast Valleys	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۸۶/۱۱۱	۰/۰۱۱

جدول ۵- آماره‌های آزمون مربوط به مقایسه مدل فازی با مدل ترکیبی PMF56 در مرحله تست

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	R^2	RMSE(mm/hr)	MBE(mm/hr)	t	R^2/t	
۲۱	Kettleman	San Joaquin Valley	۰/۹۱	۰/۰۷۷	-۰/۰۲۰۱۶۸۶۴۲	۲۵/۱۷۴	۰/۰۳۷
۳۰	Nicolaus	Sacramento Valley	۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۰۵	۱۰۱/۷	۰/۰۰۹۵
۳۵	Bishop		۰/۹۴	۰/۰۷	۰/۰۴	۵۷/۷۵	۰/۰۱۶
۳۹	Parlier	San Joaquin Valley	۰/۹۲	۰/۰۷	۰/۰۴	۷۳/۶۳۳	۰/۰۱۳
۴۱	Calipatria/Mulberry	Imperial/Coachella Va	۰/۹۳	۰/۰۷	۰/۰۰۱۲	۱/۶۳۹	۰/۵۹
۴۳	McArthur	Northeast Plateau	۰/۹۰	۰/۰۹۱	۰/۰۶	۸۵/۲۴	۰/۰۱۱
۴۴	U.C. Riverside	Los Angeles Basin	۰/۸۷	۰/۰۸	۰/۰۲	۲۳/۱۹	۰/۰۴۰
۴۷	Brentwood	San Francisco Bay	۰/۸۹	۰/۰۶۸	۰/۰۴	۴۴/۶۰	۰/۰۲۱
۵۲	San Luis Obispo	Central Coast Valleys	۰/۹۳	۰/۰۷۹	۰/۰۷	۱۵۴/۳۴	۰/۰۰۶۲
۵۴	Blackwells Corner	San Joaquin Valley	۰/۸۸	۰/۰۸	۰/۰۲	۲۱/۲۰	۰/۰۴۴
۵۶	Los Banos	San Joaquin Valley	۰/۹۱	۰/۰۷۷	۰/۰۳۴	۴۶/۴۹	۰/۰۲۰
۵۷	Buntingville	Northeast Plateau	۰/۹۰	۰/۰۸	۰/۰۳	۳۷/۹۱۵	۰/۰۲۵
۶۲	Temecula	South Coast Valleys	۰/۹۱۷	۰/۰۶۹	۰/۰۴۱	۷۰/۶۹	۰/۰۱۳

محاسبه شده از روش PMF56 برآورد می‌کند. در این مقایسه نیز مقدار RMSE در محدود ۰/۰۷ تا ۰/۰۸ میلی‌متر در ساعت متغیر بوده و این نشان دهنده اختلاف کم مقادیر برآورد شده از فازی با مقادیر محاسبه شده از روش PMF56 است (جدول ۵). نکته حائز اهمیت در

مقایسه نتایج مدل فازی با مدل PMF56 نیز نشان داد که مدل فازی در برآورد تبخیر و تعرق ساعتی مرجع خوب عمل کرده است (جدول ۵). این نتایج نشان می‌دهد که مدل فازی در اکثر موارد مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده را به مقدار بسیار ناچیزی بیشتر از مقدار

هواشناسی موثر بر تبخیر و تعرق در نظر گرفته می شود، انتخاب موثرترین پارامتر می تواند کمک زیادی در برآورد تبخیر و تعرق ساعتی بخصوص در مدلسازی نماید.

همان طور که نتایج نشان دادند پارامتر تابش خالص خورشیدی بدلیل اینکه منبع انرژی است بیشترین تاثیر را بر تبخیر و تعرق ساعتی دارد و از طرفی هم چون در ساعات مختلف روز تغییرات ناگهانی دارد، به نظر می رسد باعث بروز تفاوت های در تبخیر و تعرق روزانه بدست آمده از مجموع ساعتی با مقدار بدست آمده از مدل های ریاضی و تجربی شود. از آنجائی که در تمام ایستگاه های 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 بدلیل در نظر گرفتن پارامترهای با عدم قطعیت بالا در آنها، (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 ثانیاً می توان با ارائه یک مدل فازی تبخیر و تعرق را با همبستگی بالایی برای سایر ایستگاهها نیز برآورد نمود، حال آنکه در مدل رگرسیون، برای هر ایستگاه باید مدل جداگانه ای در نظر گرفت. در تحقیق حاضر نیز با مدل ارائه شده، نتایج نشان دادند که همبستگی بالایی بین تبخیر و تعرق برآورد شده از مدل فازی و دو روش PMF56 و CIMIS وجود دارد و می توان از این مدل برای برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی استفاده نمود، که این نتیجه مشابه نتایج حاصل از تحقیقات گذشته برای مدلسازی تبخیر و تعرق با منطق فازی است.

این نتایج این است که اگرچه مقدار ضریب تعیین تا حدودی کمتر از جدول ۴ است ولی مقادیر بالای t مقدار کم R^2/t نشان از همبستگی بالاتر نتایج مدل فازی با مدل PMF56 نسبت به CIMIS دارد.

مقایسه عملکرد مدل پنمن - مانیس - فائو با مدل CIMIS، هم حاکی از همبستگی بالای این دو مدل بوده، به طوری که تغییرات دامنه آماره آزمون R^2/t از مقدار $0/021$ در ایستگاه ۴۱ با بالاترین همبستگی تا مقدار $0/57$ در ایستگاه ۵۶ با کمترین مقدار تطابق، متغیر می باشد (جدول ۶). نکته جالب توجه در این مقایسه این است که مقدار ضریب تعیین در کلیه ایستگاه مورد بررسی بسیار بالا و نزدیک به ۱ و بیشتر از مقادیر جدول ۴ است، ولی مقادیر آماره t کمتر از R^2/t بیشتر از جدول ۴ است. بنابراین می توان گفت که برای مقایسه مدل ها، فاکتور ضریب تعیین به عنوان تنها عامل مقایسه کافی نبوده و این پارامتر را باید با سایر فاکتورهای دیگر همراه کرد.

نتیجه گیری و پیشنهادها

با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می شود که مدل فازی با هردو روش مدل های ترکیبی مورد مقایسه تطابق نسبتاً بالایی داشته و به این جهت توانایی لازم برای برآورد تبخیر و تعرق را دارا می باشد. ضمن اینکه با در نظر گرفتن معیارهای جدید ارزیابی مدل های تبخیر و تعرق (جاکوویدز و صباغ) انتخاب مدل بهتر بطور نسبی سهل تر شده است. براساس نتایج بدست آمده این تحقیق، اختلافات مشاهده شده در محاسبات تبخیر و تعرق حاصل از مدل فازی با دو مدل دیگر را می توان به عواملی نسبت داد که در کنار پارامتر تابش خالص بر تبخیر و تعرق تاثیر بسیار جزئی دارند. با این حال به دلیل اینکه در برآورد تبخیر و تعرق مرجع ساعتی، تغییرات کوتاه مدت پارامترهای

جدول ۶- آماره های آزمون مربوط به مقایسه مدل ترکیبی PMF56 با CIMIS در مرحله تست

شماره ایستگاه	نام ایستگاه	R^2	RMSE(mm/hr)	MBE(mm/hr)	t	R^2/t
۲۱	Kettleman San Joaquin Valley	۰/۹۸	۰/۰۲۶	۰/۰۰۱۳۵	۴/۸۴	۰/۲
۳۰	Nicolaus Sacramento Valley	۰/۹۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۲۷۳	۱۲/۰۹۸	۰/۰۸
۳۵	Bishop	۰/۹۹	۰/۰۲۳	۰/۰۰۱۹۳	۷/۶۲	۰/۱۳
۳۹	Parlier San Joaquin Valley	۰/۹۹	۰/۰۲۱	۰/۰۰۰۴۹۰	۲/۱۵۰	۰/۴۶
۴۱	Calipatria/Mulberr Imperial/Coachella Vall	۰/۹۹	۰/۰۳۲	۰/۰۱۴۴	۴۷/۴۵	۰/۰۲۱
۴۳	McArthur Northeast Plateau	۰/۹۹	۰/۰۲۴	-۰/۰۰۴۸	۱۸/۸۷	۰/۰۵
۴۴	U.C. Riverside Los Angeles Basin	۰/۹۸	۰/۰۲۸	۰/۰۰۶۲۹	۲۱/۴۲	۰/۰۴۶
۴۷	Brentwood San Francisco Bay	۰/۹۸	۰/۰۲۱	۰/۰۰۴۰	۱۰/۸۰	۰/۰۹۱
۵۲	San Luis Obispo Central Coast Valleys	۰/۹۹	۰/۰۲۶	-۰/۰۰۹۲	۲۳/۹۸	۰/۰۴۱
۵۴	Blackwells Corner San Joaquin Valley	۰/۹۸	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳۶	۱۳/۱۹	۰/۰۷۵
۵۶	Los Banos San Joaquin Valley	۰/۹۸	۰/۰۲۴	-۰/۰۰۰۴۶	۱/۷۲	۰/۵۷
۵۷	Buntingville Northeast Plateau	۰/۹۸	۰/۰۲۶	۷۲۴۷۴E-۰۵	۰/۰۲	۴۴/۱۹۹
۶۲	Temecula South Coast Valleys	۰/۹۸	۰/۰۲۱	۰/۰۰۲۷	۱۲/۰۹۹	۰/۰۸۲

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 CIMIS و PMF56 که به پارامترهای متعدد نیاز دارند، مدل ارائه شده تنها با یک متغیر، قادر به تخمین تبخیر و تعرق ساعتی در حد مطلوب بوده و چون به محاسبات پیچیده نیاز ندارد، ابزار مفیدی در برآورد این پارامتر مهم اقلیمی در مقیاس زمانی ساعتی است.

سیاسگزاری

این طرح با حمایت مالی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد و در قالب طرح تحقیقاتی مصوب شماره ۲/۱۴۸۹۶ مورخ ۸۹/۳/۱۱ به انجام رسیده است. بدین وسیله از حمایت‌های بی‌دریغ دانشگاه فردوسی مشهد سپاسگزاری می‌شود.

منابع

- ۱- انصاری ح.، داوری ک. و ثنایی نژاد ح. ۱۳۸۹. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص جدید بارندگی تبخیر و تعرق استاندارد شده توسعه یافته بر اساس منطق فازی. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۱. جلد ۲۴. ص ۵۲ - ۳۸.
- ۲- بختیاری ب.، خلیلی ع.، لیاقت ع. و خانجانی م.ج. ۱۳۸۸. مقایسه تبخیر و تعرق روزانه با مجموع ساعتی در ایستگاه هواشناسی مرجع کرمان. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۱، جلد ۲۳. ص ۵۶ - ۴۵.
- ۳- جعفری میانائی س. و کشاورزی ع. ۱۳۸۷. مقایسه روش فازی و رگرسیون آماری جهت برآورد بار رسوبی رودخانه‌ها. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران. تهران.
- ۴- سبزی پرور ع.ا.، تفضلی ف.، زارع ایبانه ح.، بانژاد ح.، موسوی بایگی م.، غفوری م.، محسنی موحد ا. و مریانجی ز. ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد و نیمه خشک به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش. مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). شماره ۲، جلد ۲۲. ص ۳۴۰ - ۳۲۸.
- ۵- شایان نژاد م. ۱۳۸۵. مقایسه دقت روشهای شبکه عصبی مصنوعی و پنمن - ماتنسیس در محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل. همایش ملی مدیریت شبکه‌های آبیاری و زهکشی. اهواز.
- ۶- شایان نژاد م.، ساداتی نژاد س.ج. و فهمی ه. ۱۳۸۶. تعیین تبخیر و تعرق بالقوه با استفاده از روش رگرسیون فازی. مجله تحقیقات منابع آب، شماره ۳. سال سوم. ص ۱۹ - ۹.
- ۷- صیادی ح.، اولاد غفاری ا.، فعالیان ا. و اشرف صدرالدینی ع. ۱۳۸۸. مقایسه عملکرد شبکه‌های عصبی MLP و RBF در برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع. مجله دانش آب و خاک. شماره ۱. جلد ۱۹. ص ۱۲ - ۱.
- ۸- قاسم نژادمقدم ن.، بقائی نیا ف. و بافنده زنده ع. ۱۳۷۸. منطق فازی به زبانی ساده. ماهنامه کنترل کیفیت. شماره ۲۴. ص ۵۱ - ۴۳.
- ۹- کوچک‌زاده م. و بهمنی ع. ۱۳۸۴. ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی در کاهش پارامترهای مورد نیاز، جهت برآورد تبخیر و تعرق مرجع. مجله علوم کشاورزی: سال یازدهم. شماره ۴. ص ۹۷ - ۸۷.
- ۱۰- کوره پزان دزفولی ا. ۱۳۸۵. اصول تئوری مجموعه‌های فازی و کاربردهای آن در مدل‌سازی مسائل آب. انتشارات جهاد دانشگاهی صنعتی امیر کبیر. تهران ۲۶۱ صفحه.
- ۱۱- منعم م.ج.، خرمی ج. و حیدریان س.ا. ۱۳۸۶. ارزیابی عملکرد شبکه‌های آبیاری یا استفاده از منطق فازی: مطالعه موردی شبکه مارون. مجله فنی و مهندسی تربیت مدرس. شماره ۲۷. ص ۴۲ - ۳۱.
- ۱۲- وزیری ژ.، سلامت ع.، انتصاری م.ر.، مسچی م.، حیدری ن. و دهقانی سانچج ح. ۱۳۸۷. تبخیر و تعرق (دست‌والعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان). انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی. تهران ۳۶۲ صفحه.
- ۱۳- هاشمی نجفی ف.، پلنگی ج.ع. و ازبومی ر. ۱۳۸۶. تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از شبکه عصبی - فازی (ANFIS)، نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان.

14- 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. 301 p.

15- Ayttek A. 2008. Co-active neurofuzzy inference system for evapotranspiration modeling. Department of civil

- Engineering, Hydraulics Division Gaziantep University: <http://www.spiringle.com>.
- 16- Bardossy A., Bogardi I., and Duckstein L. 1990a. Fuzzy regression in hydrology. *Water Resources Research*. No. 26(7). pp1497-1508.
 - 17- California Irrigation Management Information system. available online: <http://www.cimis.water.ca.gov>.
 - 18- Coa Z., and Kandel A. 1989. Application of some Fuzzy Implication Operators. *FSS*. No. 3. pp 42-52.
 - 19- Dogan E. 2009. Reference Evapotranspiration Estimation using adaptive neurofuzzy inference system. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. No.58. pp 617-628.
 - 20- Doorenbos J., and Pruitt W.O. 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Rome, Italy. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. 2nd ed., 156 p.
 - 21- Jacovides C.P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Agricultural water management*. No. 3. pp 95-97.
 - 22- Jia Bing C. 2004. Prediction of daily reference evapotranspiration using adaptive neurofuzzy inference system. *Trans of the Chinese society of Agricultural Engineering*. No. 20(4). pp 13-16.
 - 23- Kerre E.E. 1992. A comparative study of the behavior of some popular fuzzy implication operators on the generalized modus ponens. In: Zadeh L. and Kacprzyk J. Editors. *Fuzzy Logic for the Management of Uncertainty*. Wiley, New York (1992). pp 281–295.
 - 24- Kisi O.O. 2007. Adaptive neurofuzzy computing technique for Evapotranspiration Estimation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. No. 133(4). pp. 368-379.
 - 25- Kisi O. 2010. Fuzzy Genetic Approach for modeling Reference Evapotranspiration , *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* .136(3);pp.175-183.
 - 26- Lee C.C. 1990. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic in Controller – part I & II. *IEEE Transaction on systems, Man and Cybernetics*. March/April. No. 20(2). Pp 419-435.
 - 27- Odhiambo L.O., Yoder R.E., and Yoder D.C. 2001,a. Estimating of reference crop evapotranspiration using fuzzy state models. *Trans of the ASAE*. No. 44(3). pp 543-550.
 - 28- 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.
 - 29- Snyder R.L., and Pruitt W.O. 1992. Evapotranspiration data management in California. *Irrigation and Drainage Session Proceedings Water Forum 1992, ASCE*. August 2-6, Baltimore, MD., pp.128-133.

Application of Fuzzy Logic-Based Modeling to Estimate Hourly Reference Evapotranspiration Using the Least input Data

H. Ansari^{1*}- H. Moradi²

Received:13-6-2010

Accepted:20-2-2011

Abstract

Evapotranspiration as one of the most important components of the hydrologic cycle, plays a key role in water resources management, crop yield simulation and irrigation scheduling. Therefore, presenting a low cost and precision model is very essential for calculations of hourly ET_0 . Although, there are empirical formulas, their performances are not all satisfactory due to the complicated nature of the hourly evapotranspiration process, the data availability, and high cost and error for gathering data. This paper develops hourly ET_0 estimation model based on fuzzy inference system (FIS) technique. We follow the idea of using the least input parameters, so the net radiation (R_n) selected, as the only input parameter. The used data has been picked on UC-Andrade station for training model, that have the most variation on R_n and climatically conditions, and another thirteen stations, that selected randomly, among 114 automated stations in US California. There is not proper hourly data in Iran. FIS model estimates hourly ET_0 as crisp number using of 230 rules with 48 level, centeroid defuzzification method and inference Mamdani method. FIS results compared with Penman-Monteith-FAO56 and CIMIS-Penman combined model. It has been found that FIS technique has high accuracy and good performance (for the train data set, $R^2 = 0.97$, RMSE= 0.07, MBE=-0.004 and R^2/t (t: Jacovides criteria)=0.21). Comparing FIS with CIMIS and FAO56 results shows that FIS has better correlation with CIMIS than FAO56 for test data set, with $R^2 = 0.94$, RMSE= 0.0693, MBE=-0.0384 and $R^2/t=0.018$. Among FIS, CIMIS and FAO56, FIS model is economical, because of the parsimony principal; in conclusion, it raises model accuracy.

Keywords: Fuzzy model, Hourly Evapotranspiration, CIMIS-Penman, Penman-Montieth-FAO56

1,2- Assistant Professor and MSc Student of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: Ansari_hos@yahoo.com)