

برآورد تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از داده‌های محدود هواشناسی در شرایط اقلیمی مختلف

اسعد سلطانی^۱ - سید مجید میرلطیفی^{۲*} - حسین دهقانی سانج^۳

تاریخ دریافت: ۸۹/۱۲/۱۷

تاریخ پذیرش: ۹۰/۷/۱۰

چکیده

تبخیر تعرق گیاه مرجع یک پارامتر مهم هواشناسی کشاورزی در مطالعات هیدرولوژی و هواشناسی و همچنین در برنامه‌ریزی آبیاری است. معادله فائو پنمن - مانتیث (FAO-56 PM) به‌عنوان یک روش استاندارد برای تعیین تبخیر- تعرق گیاه مرجع، از طرف سازمان خوار و بار جهانی (FAO) توصیه شده است. این روش پارامترهای زیادی را در رابطه با تبخیر- تعرق بررسی می‌کند؛ تشعشع خالص (Rn)، درجه حرارت هوا (T)، کمبود فشار بخار (VPD) و سرعت باد (u). در این مقاله دقت معادله فائو پنمن مانتیث برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف، در شرایطی که داده‌های هواشناسی محدود باشند، بررسی شده است. برای این مطالعه داده‌های کامل هواشناسی از نه ایستگاه هواشناسی در اقلیم‌های مختلف در ایران، انتخاب شدند. تفاوت برآورد تبخیر- تعرق مرجع به روش فائو پنمن در حالت داده کامل و کاهش داده عموماً با کاهش پارامترهای برآورد شده، کاهش می‌یابد. مدل‌های کاهش داده فائو پنمن مانتیث، اغلب نتایج بهتری نسبت به مدل‌های ترک، هارگریوز سامانی و شبکه عصبی مصنوعی ارائه دادند و این حقیقت استفاده از معادله فائو پنمن مانتیث را تأکید می‌کند؛ حتی در حالتی که داده‌های کامل هواشناسی در دسترس نباشند. حداقل داده لازم برای برآورد دقیق تبخیر- تعرق مرجع به روش فائو پنمن - مانتیث در اقلیم‌های مرطوب و گرم و نیمه خشک، داده‌های حداکثر و حداقل دما و سرعت باد محله‌ای می‌باشد و در اقلیم بسیار خشک حداقل داده لازم، داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه و سرعت باد روزانه می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: دمای هوا، برآورد، تبخیر- تعرق مرجع، داده هواشناسی، سرعت باد

مقدمه

هستند، برآورد کنیم، می‌توان با برآورد تعدادی از پارامترهای ورودی، داده‌های لازم برای محاسبه تبخیر- تعرق به روش پنمن- مانتیث را کاهش داد. برای برآورد تبخیر- تعرق مرجع با معادله فائو پنمن- مانتیث، برای حالتی که مجموعه داده‌ها شامل حداکثر و حداقل دمای هوا باشند، می‌توان برآورد قابل قبولی برای دوره‌های ده روزه و ماهانه را ارائه داد. اعتبار روش‌های برآورد داده‌های غیرموجود باید در سطح محلی ارزیابی شوند. این ارزیابی می‌تواند در ایستگاه‌های هواشناسی دارای اطلاعات کامل انجام گیرد (۷).

مدل‌های محاسباتی تبخیر- تعرق: در شرایط اقلیمی اروپای غربی، ترک معادله زیر را برای تخمین ET_0 ارائه کرد (۱۷).

$$ET_0 = 0.13 \frac{T}{T+15} (R_s + 2.09) \dots \dots \dots RH \geq 50 \quad (1)$$

$$ET_0 = 0.13 \frac{T}{T+15} (R_s + 2.09) \left(1 + \frac{50+RH}{70}\right) \dots \dots \dots RH \leq 50 \quad (2)$$

که در آن T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری ($^{\circ}C$)، R_s تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین ($MJ/m^2 \cdot day$) و RH رطوبت نسبی (درصد) می‌باشد.

مدل ارائه شده توسط بلانی کریدل برای تخمین ET_0 ، در مناطق

تبخیر- تعرق یکی از مهمترین پارامترهایی است که دانستن آن جهت برآورد آب مورد نیاز گیاه و طراحی سیستم‌های آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری ضروری است. تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر- تعرق مصرف می‌شود، از عوامل اساسی در برنامه‌ریزی برای رسیدن به محصول بیشتر است. معادله فائو پنمن - مانتیث به داده‌های زیادی نیاز دارد. اگر بخواهیم از تعداد ورودی آن بکاهیم، ممکن است حساسیت مدل نسبت به داده حذف شده زیاد باشد و در میزان برآورد تأثیر چشم‌گیری داشته باشد و باعث شود برآورد انجام شده دور از واقعیت باشد. بنابراین اگر بجای حذف داده بخواهیم آن داده را با استفاده از پارامترهایی که اندازه‌گیری آن آسان است و در دسترس

۲۰۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و دانشیار گروه مهندسی آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

(*- نویسنده مسئول: Email: mirlat_m@modares.ac.ir

۳- استادیار گروه آبیاری و زهکشی، موسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، کرج

ساحلی مساوی با ۰/۱۶ و ۰/۱۹ می‌باشد (۷).

داده‌های سرعت باد را یا از ایستگاه‌های مجاور و یا از طریق میانگین دراز مدت باد در یک منطقه به دست می‌آورند. چنانچه داده‌های سرعت باد در منطقه موجود نباشد، می‌توان از مقدار ۲ متر بر ثانیه به عنوان یک تخمین نسبتاً درست اولیه، استفاده کرد. در این تحقیق از ۱۱ مدل داده محدود استفاده شد که هر کدام دارای ورودی‌های متفاوتی می‌باشند که در جدول ۲ ارائه شده است (۱۵).

آنالیز حساسیت: برای انجام آنالیز حساسیت به روش ضریب حساسیت، باید از مدل نسبت به متغیرهای مستقل مختلف مشتق‌گیری شود. برای این کار به جای استفاده از مشتق جزئی، از تعریف اولیه مشتق، یعنی تغییرات متغیر وابسته در محدوده تغییرات بسیار کوچک از متغیر مستقل، استفاده می‌شود. مثبت یا منفی شدن ضریب حساسیت نشان می‌دهد با افزایش مقدار متغیر مستقل مقدار تبخیر-تعرق به ترتیب افزایش یا کاهش می‌یابد. مقدار ضریب حساسیت بزرگ نشان دهنده حساسیت زیاد مدل نسبت به متغیر مورد بررسی است. ضریب حساسیت به ازای ۱۰ درصد تغییرات متغیر مستقل (معادله ۱۰) محاسبه شده است (۱۰ و ۱۱).

$$S_{vi} = \frac{\partial ET/v_i}{\partial v_i} = \lim_{\Delta v_i \rightarrow 0} \frac{\Delta ET/ET}{\Delta v_i/v_i} = \frac{ET(v+\Delta v) - ET(v)}{\Delta v} \cdot \frac{v}{ET(v)} \quad (10)$$

ترج کوپیک و کولاکویک (۱۶) در شش ایستگاه هواشناسی در کشور یوگسلاوی در شمال شرق اروپا، برآورد تبخیر-تعرق مرجع ماهانه با داده‌های محدود آب و هوایی را مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از معادله فائو پنمن-مانتیت با داده‌های حداکثر و حداقل دما، تبخیر-تعرق مرجع ماهانه را برآورد نمودند. نتایج به دست آمده را با روش‌های هارگریوز اصلاح شده و ترک و روش شبکه‌های عصبی مصنوعی مقایسه کردند. نتایج نشان داد در بیشتر موارد، معادله فائو پنمن-مانتیت با داده‌های محدود، برآورد نزدیکتری به روش FAO-PM-56 با داده‌های کامل دارد. حداقل داده‌های لازم برای اقلیم مرطوب، حداقل و حداکثر دما و سرعت باد منطقه ذکر گردید.

در تحقیقی دیگر، پائولو و همکاران (۱۳) در ۱۲ ایستگاه هواشناسی در کشور کانادا به بررسی اثر کاهش پارامترهای اندازه‌گیری شده در معادله فائو پنمن-مانتیت پرداختند. ایشان با استفاده از معادلات موجود در نشریه FAO-56، بعضی از پارامترهای ورودی معادله پنمن مانیتیت را برآورد کردند و به این ترتیب از ورودی معادله کاسته شد. ایشان معادلات داده‌های محدود را با مدل‌های هارگریوز سامانی، ترنت وایت و پرستلی-تیلور مقایسه کردند. برای مقایسه مدل‌ها از آماره‌های RMSE، MBE، R² و شیب خط رگرسیون استفاده کردند. نتایج حاکی از آن بود که معادله فائو پنمن-مانتیت، در حالی که سرعت باد اندازه‌گیری نشده باشد، از دقت بالاتری برخوردار است. رحیمی (۱۴) در منطقه گرم و خشک استان خوزستان تبخیر-تعرق گیاه مرجع را با داده‌های محدود به دست آورد. در این تحقیق از دو روش استفاده شد.

غربی ایالات متحده و همچنین در سایر نقاط به صورت گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (۱۸).

$$ET_0 = a + b[p(0.46T + 8.13)] \quad (3)$$

$$a = 0.0043RH_{min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (4)$$

$$b = 0.82 - 0.0041RH_{min} + 1.07(n/N) + 0.066u_{day} - 0.006RH_{min} \frac{n}{N} - 0.0006RH_{min} u_{day} \quad (5)$$

که در آن n ساعات آفتابی واقعی، N حداکثر ساعات آفتابی، u_{day} سرعت باد روزانه در ارتفاع دو متری (m/s) و RH_{min} حداقل رطوبت نسبی روزانه (درصد) می‌باشد. دیگر مدل تجربی استفاده شده، مدل هارگریوز سامانی اصلاح شده بود (۱۱). این معادله برای مناطق مرطوب مقادیر ET₀ را دست بالا برآورد می‌کند (۱۲).

$$ET_0 = 0.0135 k_T R_a (T + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (6)$$

که در آن T_{max} دمای حداکثر روزانه (°C)، T_{min} دمای حداقل روزانه (°C)، R_a تابش برون‌جوی (MJ/m².day) و K_T ضریب معادله و تابعی درجه دو از اختلاف دمای حداقل و حداکثر می‌باشد.

روش فائو-پنمن-مانتیت دارای پایه فیزیکی قوی می‌باشد و برای تخمین درست تبخیر-تعرق مرجع در سرتاسر دنیا استفاده شده است. در این تحقیق، روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع در نظر گرفته شد. این معادله به فرم زیر می‌باشد (۲).

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 \times (e_s - a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (7)$$

که در آن R_n تابش خالص (MJ/m².day)، G شار حرارت خاک (MJ/m².day)، e_s فشار بخار واقعی (kPa)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (kPa/°C) و γ ثابت سایکرومتری (kPa/°C) می‌باشد.

برآورد داده‌های غیر موجود: هرگاه داده‌های رطوبت موجود نباشند و یا صحت داده‌ها مورد تردید باشد، با فرض این که دمای نقطه شبنم به دمای حداقل روزانه نزدیک باشد، فشار بخار واقعی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (۷).

$$e_a = e(T_{min}) = 0.611 \exp \frac{17.27T_{min}}{T_{min} + 237.3} \quad (8)$$

در زمانی که داده‌های تابش در اختیار نباشد از معادله زیر استفاده می‌شود (۷، ۸ و ۱۴).

$$R_s = K_{RS} \sqrt{T_{max} - T_{min}} R_a \quad (9)$$

که در آن K_{RS} ضریب اصلاحی است که برای مناطق غیر ساحلی و

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و اقلیم ایستگاه‌های هواشناسی

ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	P/ET ₀	نوع اقلیم
آستارا	۳۸° ۲۵'	۴۸° ۵۲'	-۱۸/۰	۱/۵۲	مرطوب
رامسر	۳۶° ۵۴'	۵۰° ۴۰'	-۲۰/۰	۱/۴۰	مرطوب
رشت	۳۷° ۱۲'	۴۹° ۳۹'	۳۶/۷	۱/۳۲	مرطوب
کرمانشاه	۳۴° ۲۱'	۴۷° ۹'	۱۳۱۸/۶	۰/۲۸	گرم و نیمه خشک
ارومیه	۳۷° ۳۳'	۴۵° ۵'	۱۳۱۵/۹	۰/۲۷	گرم و نیمه خشک
تبریز	۳۸° ۵'	۴۶° ۱۷'	۱۳۶۱/۰	۰/۲۶	گرم و نیمه خشک
زاهدان	۲۹° ۲۸'	۶۰° ۵۳'	۱۳۷۰/۰	۰/۰۴	بسیار خشک
کرمان	۳۰° ۱۵'	۵۶° ۵۸'	۱۷۵۳/۸	۰/۰۹	بسیار خشک
یزد	۳۱° ۵۴'	۵۴° ۱۷'	۱۲۳۷/۲	۰/۰۴	بسیار خشک

تحقیق ایستگاه‌های انتخاب شده دارای دوره آماری ۲۰۰۸-۱۹۸۴ (۲۵ ساله) بوده و از داده‌های روزانه استفاده شد. دسته‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها با استفاده از پارامتر متوسط رطوبت نسبی سالانه انجام گرفت (جدول ۱) که رطوبت نسبی سالانه به صورت P/ET₀ تعریف شد. P میانگین دراز مدت بارندگی سالانه و ET₀ مقدار میانگین درازمدت تبخیر- تعرق مرجع سالانه، که با استفاده از روش هارگریوز- سامانی تخمین زده شده است، می‌باشد (۹).

مدل‌های استفاده شده: در این تحقیق از ۴ مدل تجربی، ۱۱ مدل داده محدود و ۱۰ مدل شبکه عصبی استفاده شد. این مدل‌ها در جدول ۲ آورده شده‌اند. تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از این مدل‌ها محاسبه شد.

شبکه‌های عصبی مصنوعی: شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ابزار نسبتاً سریع و قابل انعطافی برای مدل‌سازی به‌شمار می‌آیند و در نتیجه در مباحث مدل‌سازی در هیدرولوژی و هواشناسی، به‌منظور حل مسائل مربوط به تخمین زدن، پیش‌بینی و طبقه‌بندی، به‌کار گرفته شده‌اند. طراحی معماری آن (لایه‌های پنهان و نرون‌های مربوطه) عموماً بر مبنای روش سعی و خطا است (۴ و ۵). ساختار معمول آن متشکل از سه لایه، لایه ورودی (داده‌ها را در شبکه توزیع می‌کند)، لایه پنهان (داده‌ها را پردازش می‌کند) و لایه خروجی (نتایج را به ازای ورودی‌های مشخص استخراج می‌کند) می‌باشد. این شبکه‌ها مدل‌های محاسباتی هستند که قادرند رابطه میان ورودی‌ها و خروجی‌های یک سیستم فیزیکی را توسط شبکه‌ای از گره‌ها که همگی به هم متصل هستند، تعیین نمایند. برای طراحی شبکه‌ها از نرم‌افزار MATLAB7.8 استفاده شد. داده‌های ورودی، پارامترهای هواشناسی و داده خروجی، تبخیر- تعرق به روش FAO-PM بود. هرچه تعداد لایه‌ها و تعداد نرون‌های هر لایه کمتر باشد، شبکه از معماری بهتری برخوردار است. بر این اساس، نوع شبکه استفاده شده پیشرو، تابع انتقال TANSIG (تانژانت هیپربولیک)، یک لایه مخفی و تعداد پنج نرون در آن لایه بود.

در روش اول معادله فائو پنمن- مانتیث به‌صورتی حل شد که پارامترهای فشار بخار و تابش آفتاب، با استفاده از روابط تجربی، بر اساس دمای حداکثر و حداقل هوا تعیین گردیدند. در این روش داده- های مورد نیاز محدود به دمای هوا و سرعت باد بودند. در روشی دیگر معادله هارگریوز محاسبه گردید. نتایج دو روش با روش فائو پنمن- مانتیث مورد مقایسه قرار گرفتند و نتایج نشان داد که معادله هارگریوز همبستگی کمی با مقادیر فائو پنمن- مانتیث دارد؛ اما روش فائو پنمن- مانتیث در حالت داده‌های محدود، همبستگی زیادی با معادله فائو پنمن- مانتیث دارد (۶). با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته، محاسبه تبخیر- تعرق به روش کاهش داده فقط در بعضی نقاط مرطوب جهان انجام گرفته و همچنین تبخیر- تعرق به‌صورت ماهانه محاسبه شده است، لذا محاسبه تبخیر- تعرق روزانه در اقلیم‌های مختلف در این تحقیق بررسی شده است. هدف اصلی این تحقیق به‌دست آوردن معادلاتی است که به پارامترهای ورودی کمتری نیاز داشته باشند. بنابراین از معادلاتی استفاده شده که به کمترین پارامتر نیاز داشته باشند. هدف دیگر، تعیین کمترین تعداد پارامتری است که بتوان با آنها برآورد نزدیکی به معادله FAO-56- PM انجام داد.

مواد و روش‌ها

ایستگاه‌های هواشناسی در این تحقیق بر اساس نوع اقلیم انتخاب شدند. بدین ترتیب کل ایران به سه اقلیم بسیار خشک، گرم و نیمه- خشک و مرطوب تقسیم شد (۱، ۳، ۹). با توجه به مقدار پارامتر رطوبت نسبی سالانه، ایستگاه‌های هواشناسی در سه اقلیم بسیار خشک، خشک و نیمه‌خشک و مرطوب به شرح زیر دسته‌بندی شدند: اقلیم مرطوب که مقدار رطوبت نسبی سالانه مساوی یا بالاتر از ۱ است، اقلیم خشک و نیمه‌خشک که مقدار رطوبت نسبی سالانه بین ۰/۱ و ۱ است و اقلیم بسیار خشک که مقدار رطوبت نسبی سالانه پایین تر از ۰/۱ است. از هر اقلیم سه ایستگاه انتخاب شد. در این

جدول ۲- پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل های مختلف

مدل	Tmax	Tmin	Tmean	Tdew	RH	Rn	U2	n
ANN1	*	*		*	*		*	*
ANN2	*	*			*		*	*
ANN3		*			*	*		*
ANN4		*			*		*	*
ANN5	*	*					*	*
ANN6					*		*	*
ANN7		*					*	*
ANN8		*			*			*
ANN9					*		*	*
ANN10		*					*	*
PMteu	*	*		*			*	*
PMtnu	*	*					*	*
PMten,l	*	*		*			*	*
PMten,r	*	*		*			*	*
PMtu	*	*					*	*
PMte,l	*	*		*			*	*
PMte,r	*	*		*			*	*
PMtn,l	*	*					*	*
PMtn,r	*	*					*	*
PMt,l	*	*					*	*
PMt,r	*	*					*	*
HS	*	*					*	*
T	*	*			*		*	*
B-C	*	*			*		*	*

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(o_i - \bar{o})^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2 \sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \quad (13)$$

$$RE = \frac{RMSE}{\bar{o}} \quad (14)$$

که در این روابط N تعداد نمون ها، P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل، O_i مقادیر مشاهده شده، \bar{p} میانگین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و \bar{o} میانگین مقادیر مشاهده شده می باشد.

نتایج و بحث

عملکرد مدل های مختلف در اقلیم مرطوب: با توجه به نتایج

جدول ۳ در اقلیم مرطوب، در بین معادلات تجربی استفاده شده، معادله ترک به عنوان بهترین و معادله بلانی کریدل به عنوان بدترین معادله معرفی می شوند. در بین مدل های داده محدود، مدل PMtnu بهترین مدل و مدل PMt,r مدل با کمترین دقت است. مدل PMt,r چون در آن فقط از داده های دمای هوا استفاده شد و سایر پارامترها به وسیله معادلاتی که فقط به دما بستگی داشتند به دست آمد، دقت پایین تری

شرایط داده محدود: برای شرایطی که تمام پارامترهای هواشناسی در دسترس نباشد و یک سری از پارامترها بنا به هر دلیلی (اندازه گیری نشده باشند، مفقود شده باشند، در دسترس نباشند و ...) موجود نباشند، می توان با استفاده از مدل های تجربی، داده محدود و شبکه عصبی، مدلی را انتخاب کرد که دارای دقت نسبتاً بالا و خطای کمتر باشد. بنابراین حالت های متفاوتی در نظر گرفته شد و برای هر حالت بین مدل ها مقایسه انجام گرفت و مدل برتر انتخاب شد. برای هر حالت، انتخاب مدل برتر با توجه به رتبه بندی شاخص های آماری و محاسبه رتبه کل بر اساس رتبه مدل در هر چهار شاخص ذکر شده در روابط ۱۰ تا ۱۴، انجام گرفت.

اعتباریابی و مقایسه عملکرد بهترین مدل: در این مطالعه از پارامترهای ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2)، خطای نسبی (RE) و خطای انحراف میانگین (MBE)، برای مقایسه کارایی مدل های مختلف استفاده شده است.

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2 \right)^{0.5} = \sqrt{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ETo_{est} - ETo_{FAOPM}) \right)} \quad (11)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - o_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ETo_{est} - ETo_{FAOPM}) \quad (12)$$

استفاده از مقدار عددی ۲ متر بر ثانیه به جای سرعت باد می‌باشد. از طرفی چون مدل پنمن - مانتیث با پارامتر سرعت باد رابطه مستقیم دارد، بنابراین با افزایش سرعت باد بایستی مدل برآورد بیشتری انجام دهد (MBE مثبت باشد). مدل PMt,l به‌عنوان مدلی که هم به داده کم (فقط دما) نیاز داشته و هم دقت بالایی داشت، انتخاب شد. در این مدل چون از میانگین داده‌های سرعت باد در طول دوره آماری استفاده شده است، مدل نتیجه نسبتاً بهتری ارائه داد. شبکه ANN1 با ورودی‌های کامل، به‌عنوان بهترین شبکه انتخاب شد و شبکه ANN9 کمترین دقت را داشت. شبکه ANN10 تنها با ورودی دمای میانگین نتایج نسبتاً خوبی ارائه داد (جدول ۴ الف).

عملکرد مدل‌های مختلف در اقلیم بسیار خشک: معادله

هارگریوز سامانی در اقلیم بسیار خشک نتایج بهتری، نسبت به اقلیم مرطوب و اقلیم گرم و نیمه خشک ارائه داد. در بین مدل‌های داده محدود، مدل PMtnu به‌عنوان بهترین مدل و مدل PMt,l به‌عنوان بدترین مدل انتخاب شد. مدل PMtu با توجه به مقادیر شاخص‌های آماری، به‌عنوان مناسب‌ترین مدل در شرایط داده محدود معرفی شد. این مدل نیاز به داده‌های اندازه‌گیری شده دما و سرعت باد دارد؛ بنابراین در اقلیم بسیار خشک داده‌های دما و سرعت باد برای یک برآورد دقیق و نسبتاً خوب، لازم می‌باشد. نتایج هر ۱۰ مدل شبکه عصبی مصنوعی برای ایستگاه یزد، در جدول ۴ ب ارائه شده است. برای سایر ایستگاه‌های اقلیم بسیار خشک، نتایج مشابه به‌دست آمد. مدل ANNI بهترین شبکه و مدل ANN7 مناسب‌ترین شبکه انتخاب شد. شبکه ANN به پارامتر ورودی کمتر نیاز دارد.

عملکرد در شرایط داده محدود: در اقلیم مرطوب در همه

حالات مدل‌های کاهش داده در رتبه بندی کل رتبه یک را به‌دست آوردند. با توجه به نتایج به‌دست آمده، کمترین داده برای به‌دست آوردن تبخیر - تعرق مرجع در این اقلیم، داده‌های روزانه دمای هوا و میانگین طولانی مدت سرعت باد منطقه معرفی می‌شود (جدول ۵). در اقلیم گرم و نیمه خشک، در همه حالات، مدل‌های کاهش داده رتبه یک را به‌دست آوردند. در این اقلیم با توجه به نتایج به‌دست آمده، کمترین داده برای به‌دست آوردن تبخیر - تعرق مرجع، داده‌های دمای هوا و میانگین طولانی مدت سرعت باد منطقه معرفی می‌شود (جدول ۶). در اقلیم بسیار خشک، در همه حالات مدل‌های کاهش داده در رتبه‌بندی کل رتبه یک را کسب کردند. در این اقلیم با توجه به نتایج به‌دست آمده، کمترین داده برای به‌دست آوردن تبخیر - تعرق مرجع، داده‌های روزانه دمای هوا و سرعت باد روزانه معرفی می‌شود (جدول ۷).

نتایج ضرایب حساسیت: شکل ۱ نشان می‌دهد که مدل فائو

پنمن - مانتیث در اقلیم‌های مختلف بیشترین حساسیت را نسبت به دما دارد. با توجه به نتایج به‌دست آمده برای ضریب حساسیت، مدل ترک چون مدلی تابشی است، حساسیت بیشتری نسبت به تابش

دارد. مدل PMt,l تنها با استفاده از دما و عرض جغرافیایی توانست برآورد قابل قبولی داشته باشد. بهترین شبکه در این اقلیم، شبکه ANN1 معرفی شد. این شبکه به‌علت اینکه دارای تعداد ورودی زیاد بود، طبیعی بود که بتواند برآورد دقیقی انجام دهد. شبکه ANN9 کمترین دقت را داشت. شبکه ANN10 هم تنها با ورودی دما نتیجه نسبتاً خوبی دارد. نتایج برای هر سه ایستگاه با اقلیم مرطوب، مشابه به‌دست آمد. بنابراین در هر حالت فقط نتایج یک ایستگاه آورده شده است. نتایج کل در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- عملکرد مدل‌های مختلف در ایستگاه رشت

مدل	RMSE	MBE	RE	R ²
ANN1	۰/۳۵	-۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۹۵
ANN2	۰/۳۵	-۰/۰۴	۰/۱۵	۰/۹۵
ANN3	۰/۴۲	-۰/۰۴	۰/۱۸	۰/۹۳
ANN4	۰/۶۴	-۰/۰۶	۰/۲۷	۰/۸۳
ANN5	۰/۶۵	-۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۸۲
ANN6	۰/۶۴	-۰/۰۹	۰/۲۷	۰/۸۳
ANN7	۰/۸۴	-۰/۱۱	۰/۳۶	۰/۷۰
ANN8	۰/۶۷	-۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۸۱
ANN9	۱/۰۷	-۰/۰۹	۰/۴۶	۰/۵۱a
ANN10	۰/۸۸	-۰/۰۶	۰/۳۷	۰/۶۷
PMteu	۰/۵۱	-۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۹۳
PMtnu	۰/۱۵	-۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۹۹
PMten,l	۰/۳۲	-۰/۰۳	۰/۱۴	۰/۹۶
PMten,r	۰/۴۰	-۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۹۶
PMtu	۰/۵۵	-۰/۳۰	۰/۲۴	۰/۹۲
PMte,l	۰/۶۱	-۰/۳۱	۰/۲۷	۰/۸۹
PMte,r	۰/۷۱	-۰/۴۸	۰/۳۱	۰/۹۱
PMtn,l	۰/۳۹	-۰/۱۰	۰/۱۷	۰/۹۴
PMtn,r	۰/۵۶	-۰/۳۵	۰/۲۴	۰/۹۳
PMt,l	۰/۶۸	-۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۸۷
PMt,r	۰/۸۴	-۰/۶۰	۰/۳۷	۰/۸۸
HS	۱/۰۷	-۰/۵۵	۰/۶۷	۰/۸۸
T	۰/۷۹	-۰/۳۳	۰/۳۴	۰/۹۳
B-C	۱/۵۵	-۱/۲۶	۰/۴۶	۰/۷۴

عملکرد مدل‌های مختلف در اقلیم گرم و نیمه خشک: با

توجه به نتایج جدول ۳ در اقلیم گرم و نیمه خشک، در بین مدل‌های تجربی معادله هارگریوز سامانی نتایج بهتری را ارائه داد. این نتایج با نتایج یزدان خواه و احمدزاده (۱ و ۳) مطابقت دارد. در ایستگاه کرمانشاه در بین مدل‌های داده محدود، مدل PMtnu به‌عنوان بهترین مدل عمل کرد و مدل (PMt,r) کمترین دقت را داشت. علت اینکه این مدل نتوانسته همانند مدل‌های دیگر خوب عمل کند،

فقط داده‌های دما و ساعت آفتابی باشد، مدل PMtu و در حالتی که فقط داده‌های اندازه‌گیری شده دمای هوا در دسترس باشد، مدل PMt,l به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. با توجه به اینکه مدل‌های کاهش داده در همه موارد رتبه ۱ را کسب کردند، در شرایط کمبود داده در اقلیم‌های مختلف ایران این مدل‌ها توصیه می‌شوند. به علت نبود داده‌های لایسیمتر، در تحقیق حاضر روش فائو پنمن - مانتیث به‌عنوان مدل استاندارد انتخاب شد و کل مدل‌ها با آن مقایسه شدند. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی برای ارزیابی دقت مدل‌های داده محدود برای روش فائو پنمن - مانتیث، از داده‌های لایسیمتر به‌عنوان روش مبنای استاندارد استفاده شود.

داشت؛ اما سایر مدل‌های تجربی حساسیت بیشتری به دما داشتند. با توجه به اینکه این پارامتر در همه ایستگاه‌ها با دقت بالایی اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین تأثیر مهمی در تعیین تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از روش‌های داده محدود دارد.

نتیجه‌گیری

برای شرایطی که داده‌های نقطه شبنم در دسترس نباشد، بهترین مدل در اقلیم مرطوب و گرم و نیمه خشک مدل PMtnu و در اقلیم بسیار خشک مدل ANN2 به‌دست آمد. در شرایطی که داده‌های ساعات آفتابی در دسترس نباشد، در هر سه اقلیم مدل PMtu به‌عنوان بهترین مدل انتخاب شد. در حالتی که پارامترهای ورودی مدل

جدول ۴- عملکرد مدل‌های مختلف

الف- اقلیم گرم و نیمه خشک، ایستگاه کرمانشاه				ب- اقلیم بسیار خشک، ایستگاه یزد				مدل
R2	RE	MBE	RMSE	R2	RE	MBE	RMSE	
۰/۹۸	۰/۰۶	-۰/۰۵	۰/۲۴	۰/۹۹	-۰/۰۷	-۰/۰۷	۰/۲۷	ANN1
۰/۹۸	۰/۰۷	-۰/۰۶	۰/۲۴	۰/۹۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	۰/۳۰	ANN2
۰/۹۷	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۹۸	-۰/۰۸	-۰/۰۸	۰/۳۱	ANN3
۰/۹۱	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۵۲	۰/۹۱	-۰/۱۷	۰/۰۱	۰/۶۴	ANN4
۰/۹۱	۰/۱۵	-۰/۱۶	۰/۵۶	۰/۹۳	-۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۵۵	ANN5
۰/۹۱	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۵۵	۰/۹۳	-۰/۱۷	-۰/۲۲	۰/۶۲	ANN6
۰/۸۶	۰/۱۸	-۰/۱۰	۰/۶۵	۰/۸۸	-۰/۲۴	۰/۰۱	۰/۸۹	ANN7
۰/۶۹	۰/۱۹	-۰/۰۹	۰/۶۹	۰/۸۶	-۰/۲۲	-۰/۱۷	۰/۸۱	ANN8
۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۸	۱/۲۵	۰/۷۱	-۰/۳۱	-۰/۱۰	۱/۱۵	ANN9
۰/۷۹	۰/۲۲	-۰/۲۳	۰/۸۲	۰/۷۴	-۰/۲۹	-۰/۲۲	۱/۰۸	ANN10
۰/۹۸	۰/۱۰	۰/۲۴	۰/۳۹	۰/۹۹	-۰/۱۰	-۰/۱۹	۰/۳۴	PMteu
۰/۹۹	۰/۰۹	-۰/۲۲	۰/۳۴	۰/۹۹	-۰/۰۸	-۰/۱۹	۰/۲۷	PMtnu
۰/۹۱	۰/۱۵	۰/۰۶	۰/۵۴	۰/۹۳	-۰/۱۵	۰/۰۷	۰/۵۴	PMten,l
۰/۹۱	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۵۷	۰/۹۳	-۰/۱۸	-۰/۲۸	۰/۶۲	PMten,r
۰/۹۶	۰/۰۹	-۰/۱۳	۰/۳۷	۰/۹۸	-۰/۰۹	-۰/۰۱	۰/۳۱	PMtu
۰/۸۹	۰/۱۸	۰/۳۱	۰/۶۷	۰/۹۲	-۰/۱۸	-۰/۲۵	۰/۶۴	PMte,l
۰/۸۸	۰/۲۰	-۰/۴۲	۰/۷۴	۰/۹۲	-۰/۲۲	-۰/۴۶	۰/۷۷	PMte,r
۰/۹۱	۰/۱۶	-۰/۲۳	۰/۶۱	۰/۹۲	-۰/۱۷	-۰/۱۱	۰/۶۰	PMtn,l
۰/۹۰	۰/۱۶	-۰/۱۴	۰/۵۸	۰/۹۲	-۰/۱۷	۰/۰۶	۰/۶۰	PMtn,r
۰/۸۸	۰/۱۶	۰/۰۲	۰/۶۱	۰/۹۱	-۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۶۲	PMt,l
۰/۸۸	۰/۱۷	۰/۱۰	۰/۶۳	۰/۹۰	-۰/۱۹	-۰/۲۵	۰/۶۸	PMt,r
۰/۸۶	۰/۱۶	-۰/۰۳	۰/۶۰	۰/۹۲	-۰/۲۰	-۰/۳۴	۰/۷۲	HS
۰/۸۸	۰/۵۵	-۱/۸۵	۲/۰۳	۰/۸۹	-۰/۶۷	-۲/۱۱	۲/۳۷	T
۰/۸۷	۰/۶۱	-۱/۸۷	۲/۲۵	۰/۸۹	-۰/۶۵	-۱/۷۷	۲/۳۰	B-C

جدول ۵- مقایسه مدل های مختلف در شرایط کمبود داده در اقلیم مرطوب (ایستگاه آستارا)

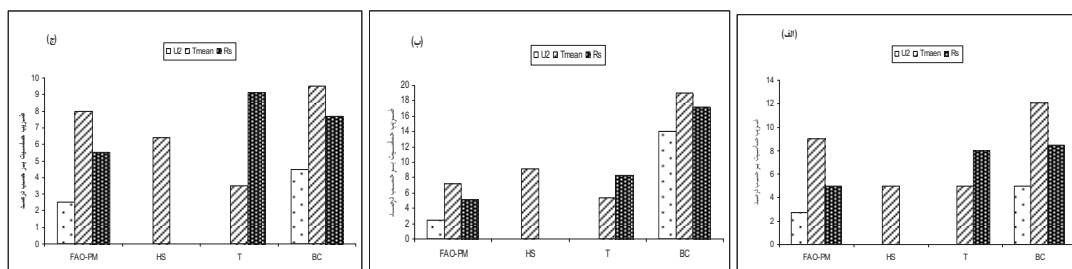
در حالتی که داده رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
رتبه	R ²	RE	MBE	RMSE	مدل
۲	(۲)۰/۹۵	(۲)۰/۱۶	(۲)۰/۰۲	(۲)۰/۳۵	ANN2
۱	(۱)۰/۹۹	(۱)۰/۰۷	(۱)۰/۰۰	(۱)۰/۱۷	PMtnu
۴	(۴)۰/۸۰	(۴)۰/۴۷	(۴)۰/۳۲	(۴)۱/۰۶	B-C
۵	(۳)۰/۹۱	(۵)۰/۶۷	(۵)۰/۲۱	(۵)۱/۵۱	HS
۳	(۲)۰/۹۵	(۳)۰/۲۴	(۳)۰/۲۶	(۳)۰/۵۳	T
در حالتی که داده های تابش در دسترس نباشد					
۲	(۳)۰/۸۴	(۲)۰/۲۹	(۱)۰/۰۶	(۲)۰/۶۳	ANN4
۱	(۱)۰/۹۴	(۱)۰/۱۸	(۲)۰/۰۷	(۱)۰/۴۰	PM _{teu}
۳	(۲)۰/۹۱	(۳)۰/۶۷	(۳)۰/۲۱	(۳)۱/۵۱	HS
در حالتی که داده های تابش و رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
۲	(۲)۰/۷۷	(۲)۰/۳۴	(۲)۰/۰۹	(۲)۰/۷۵	ANN7
۱	(۱)۰/۹۳	(۱)۰/۱۹	(۱)۰/۰۷	(۱)۰/۴۲	PM _{tu}
در حالتی که فقط از داده های دما استفاده شود					
۱	(۱)۰/۹۱	(۱)۰/۲۱	(۲)۰/۰۸	(۱)۰/۴۷	PM _{t,l}
۳	(۱)۰/۹۱	(۲)۰/۲۴	(۳)۰/۲۶	(۳)۰/۵۴	PM _{t,r}
۴	(۲)۰/۷۱	(۳)۰/۳۸	(۱)۰/۰۱	(۴)۰/۸۳	ANN10
۲	(۱)۰/۹۱	(۲)۰/۲۴	(۳)۰/۲۶	(۲)۰/۵۳	HS
در حالتی داده های سرعت باد در دسترس نباشد					
۱۰	(۶)۰/۹۱	(۱۰)۰/۶۷	(۱۰)۰/۱۲	(۱۰)۱/۵۱	HS
۱	(۱)۰/۹۸	(۱)۰/۱۰	(۱)۰/۰۰	(۱)۰/۲۳	PMten,l
۳	(۲)۰/۹۷	(۳)۰/۱۴	(۶)۰/۱۷	(۳)۰/۳۲	PMten,r
۵	(۵)۰/۹۲	(۵)۰/۲۰	(۳)۰/۰۷	(۵)۰/۴۶	PMte,l
۷	(۶)۰/۹۱	(۷)۰/۲۳	(۸)۰/۲۳	(۷)۰/۵۳	PMte,r
۲	(۲)۰/۹۷	(۲)۰/۱۳	(۲)۰/۰۱	(۲)۰/۲۸	PMtn,l
۴	(۳)۰/۹۶	(۴)۰/۱۷	(۷)۰/۲۰	(۴)۰/۳۷	PMtn,r
۶	(۶)۰/۹۱	(۶)۰/۲۱	(۴)۰/۰۸	(۶)۰/۴۷	PMt,l
۸	(۶)۰/۹۱	(۸)۰/۲۴	(۹)۰/۲۶	(۸)۰/۵۴	PMt,r
۹	(۷)۰/۸۰	(۹)۰/۳۲	(۵)۰/۱۲	(۹)۰/۷۱	ANN8

جدول ۶- مقایسه مدل‌های مختلف در شرایط کمبود داده در اقلیم گرم و نیمه خشک (ایستگاه ارومیه)

در حالتی که داده رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
رتبه	R ²	RE	MBE	RMSE	مدل
۲	(۲)۰/۹۷	(۲)۰/۱۲	(۱)۰/۰۸	(۲)۰/۳۵	ANN2
۱	(۱)۰/۹۹۵	(۱)۰/۰۷	(۲)۰/۱۲	(۱)۰/۱۹	PMtnu
۴	(۴)۰/۹۱	(۴)۰/۵۴	(۴)۰/۰۳	(۴)۱/۵۹	B-C
۳	(۳)۰/۹۴	(۳)۰/۲۰	(۳)۰/۰۳۲	(۳)۰/۵۹	HS
۵	(۳)۰/۹۴	(۵)۰/۶۴	(۵)۰/۱۴۶	(۵) ۱/۸۶	T
در حالتی که داده های تابش در دسترس نباشد					
۲	(۳)۰/۹۰	(۲)۰/۲۰	(۱)۰/۰۴	(۲)۰/۵۹	ANN4
۱	(۱)۰/۹۸	(۱)۰/۱۱	(۲)۰/۱۷	(۱)۰/۳۳	PM _{teu}
۳	(۲)۰/۹۴	(۲)۰/۲۰	(۳)۰/۰۳۲	(۲)۰/۵۹	HS
در حالتی که داده های تابش و رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
۲	(۲)۰/۸۹	(۲)۰/۲۲	(۲)۰/۰۹	(۲)۰/۶۴	ANN7
۱	(۱)۰/۹۷	(۱)۰/۱۰	(۱)۰/۰۵	(۱)۰/۳۱	PM _{tu}
در حالتی که فقط از داده‌های دما استفاده شود					
۱	(۱)۰/۹۴	(۱)۰/۱۴	(۱)۰/۰۶	(۱)۰/۴۲	PM _{t,l}
۲	(۱)۰/۹۴	(۲)۰/۱۸	(۳)۰/۲۵	(۲)۰/۵۳	PM _{t,r}
۴	(۲)۰/۸۵	(۴)۰/۸۵	(۲)۰/۲۴	(۴)۰/۷۷	ANN10
۳	(۱)۰/۹۴	(۳)۰/۲۰	(۴)۰/۰۳۲	(۳)۰/۵۹	HS
در حالتی که داده های سرعت باد در دسترس نباشد					
۸	(۴)۰/۹۴	(۷)۰/۲۰	(۹)۰/۳۲	(۷)۰/۵۹	HS
۱	(۱)۰/۹۷	(۱)۰/۱۱	(۱)۰/۰۰	(۱)۰/۳۲	PMten,l
۵	(۲)۰/۹۶	(۴)۰/۱۵	(۸)۰/۲۶	(۵)۰/۴۵	PMten,r
۶	(۳)۰/۹۵	(۵)۰/۱۵	(۵)۰/۱۶	(۴)۰/۴۳	PMte,l
۹	(۳)۰/۹۵	(۸)۰/۲۲	(۱۰)۰/۴۲	(۸)۰/۶۴	PMte,r
۳	(۲)۰/۹۶	(۲)۰/۱۳	(۴)۰/۰۱۱	(۲)۰/۳۷	PMtn,l
۲	(۲)۰/۹۶	(۲)۰/۱۳	(۳)۰/۱۰	(۲)۰/۳۷	PMtn,r
۴	(۴)۰/۹۴	(۳)۰/۱۴	(۲)۰/۰۶	(۳)۰/۴۲	PMt,l
۷	(۴)۰/۹۴	(۶)۰/۱۸	(۷)۰/۲۵	(۶)۰/۵۳	PMt,r
۱۰	(۵)۰/۸۸	(۹)۰/۲۳	(۶)۰/۰۱۷	(۹)۰/۶۶	ANN8

جدول ۷- مقایسه مدل های مختلف در شرایط کمبود داده در اقلیم بسیار خشک (ایستگاه کرمان)

در حالتی که داده رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
رتبه	R ²	RE	MBE	RMSE	مدل
۱	(۲) ۰/۹۸	(۱) ۰/۰۶	(۱) -۰/۰۳	(۱) ۰/۲۴	ANN2
۲	(۱) ۰/۹۹	(۲) ۰/۰۹	(۲) -۰/۲۴	(۲) ۰/۳۲	PMtnu
۴	(۴) ۰/۸۴	(۴) ۰/۶۵	(۳) -۱/۹۳	(۴) ۲/۳۷	B-C
۳	(۵) ۰/۸۰	(۳) ۰/۱۵	(۲) ۰/۲۴	(۳) ۰/۵۳	HS
۵	(۳) ۰/۸۶	(۴) ۰/۶۵	(۵) -۲/۱۱	(۴) ۲/۳۷	T
در حالتی که داده های تابش در دسترس نباشد					
۲	(۲) ۰/۹۲	(۲) ۰/۱۴	(۱) -۰/۰۲	(۲) ۰/۵۳	ANN4
۱	(۱) ۰/۹۴	(۱) ۰/۰۸	(۲) -۰/۲۱	(۱) ۰/۲۸	PM _{teu}
۳	(۳) ۰/۸۰	(۳) ۰/۱۵	(۳) ۰/۲۴	(۲) ۰/۵۳	HS
در حالتی که داده های تابش و رطوبت نسبی در دسترس نباشد					
۲	(۲) ۰/۸۴	(۲) ۰/۲۰	(۱) ۰/۰۵	(۲) ۰/۷۵	ANN7
۱	(۱) ۰/۹۲	(۱) ۰/۱۰	(۲) -۰/۱۵	(۱) ۰/۳۵	PM _{tu}
در حالتی که فقط از داده های دما استفاده شود					
۱	(۲) ۰/۸۳	(۲) ۰/۲۴	(۱) ۰/۱۴	(۲) ۰/۸۶	PM _{t,l}
۲	(۲) ۰/۸۳	(۲) ۰/۲۴	(۲) ۰/۱۶	(۳) ۰/۸۷	PM _{t,r}
۴	(۱) ۰/۸۴	(۳) ۰/۲۷	(۴) -۰/۳۱	(۴) ۱/۰۲	ANN10
۳	(۴) ۰/۸۰	(۱) ۰/۱۵	(۳) ۰/۲۴	(۱) ۰/۵۳	HS
در حالتی که داده های سرعت باد در دسترس نباشد					
۳	(۶) ۰/۸۰	(۱) ۰/۱۵	(۷) ۰/۲۴	(۱) ۰/۵۳	HS
۱	(۱) ۰/۸۷	(۲) ۰/۱۹	(۳) ۰/۱۱	(۲) ۰/۶۸	PMten,l
۲	(۱) ۰/۸۷	(۲) ۰/۱۹	(۵) ۰/۱۴	(۳) ۰/۶۹	PMten,r
۸	(۴) ۰/۸۴	(۳) ۰/۲۰	(۶) ۰/۲۲	(۵) ۰/۷۵	PMte,l
۹	(۴) ۰/۸۴	(۴) ۰/۲۱	(۸) ۰/۲۵	(۶) ۰/۷۶	PMte,r
۴	(۳) ۰/۸۵	(۳) ۰/۲۰	(۵) -۰/۱۴	(۴) ۰/۷۳	PMtn,l
۵	(۳) ۰/۸۵	(۳) ۰/۲۰	(۴) -۰/۱۲	(۴) ۰/۷۳	PMtn,r
۶	(۵) ۰/۸۳	(۴) ۰/۲۱	(۲) -۰/۰۳	(۵) ۰/۷۵	PMt,l
۷	(۵) ۰/۸۳	(۴) ۰/۲۱	(۱) -۰/۰۱	(۵) ۰/۷۵	PMt,r
۱۰	(۶) ۰/۸۰	(۵) ۰/۲۵	(۱۰) -۰/۳۵	(۷) ۰/۹۳	ANN8



شکل ۱- ضرایب حساسیت مدل های تجربی در الف- اقلیم مرطوب (ایستگاه رشت) ب- اقلیم گرم و نیمه خشک (ایستگاه ارومیه) ج- اقلیم بسیار خشک (ایستگاه یزد)

منابع

- ۱- احمد زاده ک. ۱۳۸۸. بررسی سیستم استنتاج عصبی- فازی (ANFIS) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۲- علیزاده ا. ۱۳۸۴. اصول هیدرولوژی کاربردی. چاپ هجدهم، انتشارات دانشگاه امام رضا مشهد.
- ۳- یزدان خواه س. ۱۳۸۷. اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۴- نعمت پور ع. ۱۳۸۵. برآورد تأثیر مقاومت‌های آبرودینامیک و تاج گیاه بر عملکرد معادله‌های فائو پنمن- مانتیث و ASCE. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۵- بهمنی ع. ۱۳۸۳. بکارگیری شبکه‌های عصبی مصنوعی جهت تخمین تبخیر- تعرق مرجع به منظور کاهش پارامترهای ورودی مورد نیاز (در منطقه تهران). پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس.
- ۶- رحیمی خوب ع، و بهبهانی س.م.ر. و نظری فر م.ه. ۱۳۸۵. بررسی استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی در معادله پنمن- مانتیث مطالعه موردی استان خوزستان. علوم کشاورزی، شماره ۳.
- 7- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., and Smith M. 1998. Crop evapotranspiration guide line for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.
- 8- Cai J., and Santos L. 2007. Estimation reference evapotranspiration with the FAO Penman-Monteith equation using daily weather forecast messages. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145: 22-35.
- 9- Dinpashoh Y. 2006. Study of reference crop evapotranspiration of Iran *Agricultural Water Management*, 84: 123-129.
- 10- Goyal R.K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*, 69: 1-11.
- 11- Hargeraves G.H., and Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99
- 12- Jensen M.E., Burman R.D., and Allen R.G. 1990. *Evapotranspiration and Irrigation water Requirements*. ASCE manuals and reports on engineering practice, No. 70, ASCE.
- 13- Paulo C., Terry J., and Eduardo A. 2009. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97: 635-644.
- 14- Todorovic M. 1999. Single layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Irrigation and Drainage*, 125(5): 235-245.
- 15- Trajkovic S. 2005. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *Irrigation and Drainage*, 131(4):316-340.
- 16- Trajkovic S., and Kolakovic S. 2009. Estimation reference evapotranspiration using limited weather data. *Irrigation and Drainage*. NO.4. ASCE. 433-449.
- 17- Turc L. 1961. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, 12: 13-17.
- 18- Xu C.Y., and Singh V.P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16: 197-219.

Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data under Different Climatic Conditions

A. Soltani¹- S.M. Mirlatifi^{2*}- H. Dehghanisani³

Received: 7-3-2011

Accepted: 2-9-2011

Abstract

Reference evapotranspiration (ET_0) is an important agrometeorological parameter for climatological and hydrological studies, as well as for irrigation planning and management. The FAO-56 Penman-Monteith combination equation (FAO-56 PM) has been recommended by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) as the standard equation for estimating reference evapotranspiration (ET_0). This method considers many parameters related to the evapotranspiration process; net radiation (R_n), air temperature (T), vapor pressure deficit (VPD), and wind speed (U). This paper examines the potential of FAO-56 PM equation in estimating the ET_0 under difference conditions from limited weather data. For this study, full weather data sets were collected from nine difference weather stations from Iran. FAO-56 reduced-set PM ET_0 estimates were in closest agreement with FAO-56 full set PM ET_0 estimates at the most of locations. The difference between FAO-56 full set PM ET_0 estimates and FAO-56 PM reduced-set ET_0 estimates generally increases by increasing the number of estimated weather parameters. Overall results indicate that FAO-56 reduced-set PM approaches mostly provided better results compared to Turc equation, adjusted Hargreaves equation and artificial neural networks. This fact strongly supports using the FAO-56 PM equation even in the absence of the complete weather data set. The minimum and maximum air temperature data and local default wind speed value are the minimum data requirements necessary to successfully use the FAO-56 PM equation under humid and arid and semi-arid conditions and the minimum and maximum air temperature data daily and wind speed data daily are the minimum data requirements under extremely arid conditions.

Keywords: Air temperature, Estimation, Evapotranspiration, Weather data, Wind speed

1,2- MSc Student and Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran

(*-Corresponding Author Email: mirlat_m@modares.ac.ir)

3- Assistant Professor, Department of Irrigation and Drainage, Agricultural Engineering Research Institute, Karaj