



دانشگاه شهرداری و مهندسی کرمانشاه

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیستم، شماره سوم، ۱۳۹۲
<http://jwsc.gau.ac.ir>

ارزیابی معادله‌های مختلف تجربی برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در چند ناحیه آب و هوایی ایران

^{*}ابوالفضل مساعدي^۱ و محمد قبائی سوق^۲

^۱دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد،

^۲دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه بولعلی سینا، همدان

تاریخ دریافت: ۹۱/۳/۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۷/۱۶

چکیده

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET₀) در تعیین آب مصرفی کشاورزی، مدل‌های اکوسیستم، وضعیت‌های رطوبتی، روابط بارش - رواناب و حفاظت آب و خاک نقش بهسزایی دارد. اگرچه درستی روش فائقو - پنمن - مانثیت (FPM) برای برآورد ET₀ در نواحی مختلف تأیید شده است، ولی نیاز آن به پارامترهای ورودی متنوع، استفاده گسترده از آن را محدود نموده است. در این پژوهش مقدار ET₀ ماهانه در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در ۴ ناحیه آب و هوایی ایران با استفاده از ۶ معادله تجربی و ۵ معادله تخمینی، محاسبه شد. با مرجع قرار دادن روش استاندارد FPM، با استفاده از آمار سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۹۰ معادله‌های مختلف واسنجی شدند. براساس آماره ترکیبی IPE در دوره ۲۰۰۷-۲۰۰۴ بهترین معادله در هر یک از ایستگاه‌ها در وضعیت‌های مختلف نبود پارامترهای هواشناسی تعیین گردید. واسنجی با استفاده از معادله‌های خطی سبب کاهش مقدار خطا در بیشتر معادله‌ها و در بیشتر ایستگاه‌ها گردید. برآورد مقدار تابش خورشیدی با استفاده از پارامترهای دمایی در نواحی مرطوب و گرم و نیمه‌خشک منجر به کاهش و در مناطق خشک و نیمه‌خشک سبب افزایش دقت معادله‌های تخمینی گردید. در نواحی مرطوب و گرم و نیمه‌خشک اهمیت مقدار تابش خورشیدی بر مقدار ET₀ بهوضوح مشخص شد. ضمن آن‌که در نواحی خشک و نیمه‌خشک این موضوع برعکس می‌باشد که نشان‌دهنده اهمیت بیشتر پارامترهای دمایی در این نواحی می‌باشد. انتخاب معادله مناسب

* مسئول مکاتبه: mosaedi@um.ac.ir

با توجه به این‌که کدامیک از آماره‌های MBE، RMSE و R^2 ملاک قضایت واقع شوند، منجر به نتایج متفاوتی گردید و در معیار ترکیبی IPE با وزن دادن به هر یک از آماره‌های یاد شده، شرایط انتخاب معادله مناسب بر مبنای دخالت همه آن‌ها فراهم گردید.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق گیاه مرجع، معادله‌های تجربی، نبود پارامتر اندازه‌گیری شده، واسنجی، ایران

مقدمه

فرآیند تبخیر و تعرق^۱ یکی از اجزا مهم توازن انرژی و آب به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌باشد که برآورد صحیح آن یکی از فاکتورهای کلیدی در مطالعات هیدرولوژی، هواشناسی، کشاورزی و طراحی سیستم‌های آبیاری و زهکشی به‌شمار می‌رود (رایوس و کیسلس، 2004). برآورد صحیح نیاز آبی گیاه از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. زیرا، از یک طرف آبیاری به مقدار کم و نیز دور طولانی موجب کاهش محصول می‌شود و از طرف دیگر آبیاری به مقدار زیاد و یا انجام عملیات آبیاری در دوره‌های کوتاه‌مدت، ضمن هدر رفتن آب، غرقاب شدن ریشه و از دسترس خارج شدن مواد غذایی، موجب آلوده شدن منابع آب زیرزمینی و شیوع بیماری‌ها می‌شود.

اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_0)، به کمک لایسی‌متر با دقت زیاد انجام می‌گیرد ولی همیشه اندازه‌گیری آن از این طریق به دلایل مختلف امکان‌پذیر نمی‌باشد. براساس پژوهش‌های لاندارس و همکاران (2008)، طی دهه‌های گذشته رابطه‌های تجربی متعددی، برای تخمین ET_0 با استفاده از پارامترهای هواشناسی ارایه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به رابطه‌های ترنت‌وایت^۲، بلانی‌کریدل^۳، مک‌کینک^۴، تورک^۵، پریستلی- تیلور^۶، هارگریوز- سامانی^۷ و فائو پنمن- مانثیت^۸ اشاره نمود. اما هیچ‌یک از این رابطه‌های تجربی، پاسخ‌گوی نیاز تمامی شرایط اقلیمی نبوده و تنها در شرایط خاصی که توسعه یافته‌اند، جواب‌گو می‌باشند. پژوهش‌ها نشان داده است که تبخیر و

1- Evapotranspiration

2- Thornth-Waite (Th)

3- Blaney-Criddle (BC)

4- Makkinc (MK)

5- Tourc (T)

6- Priestley and Taylor (PT)

7- Hargreaves-Samani (HS)

8- FAO Penman-Monteith (FPM)

تعریق به عنوان متغیری اقلیمی، از خصوصیات منطقه‌ای و ویژگی ذاتی آن‌ها تأثیر می‌پذیرد (ماردیکیس و همکاران، 2005). روش Th تنها نیاز به داده‌های ورودی درجه حرارت دارد. این روش در مناطق خشک مقدار ET_0 را کمتر از مقدار واقعی برآورده می‌کند (پلتون و همکاران، 1960؛ پرویت، 1964؛ پرویت و دورنبس، 1977؛ مساعدى و قبائی سوق، 2011) ولی در مناطق مرطوب استوایی آمازون بیش برآورده دارد (کامارگو و همکاران، 1999). معادله HS در مناطق مرطوب و سواحل دریاها مقدار ET_0 را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورده می‌کند (طبری، 2009).

مک‌کینک براساس مقایسه بین داده‌های لایسی‌متري و روش پنمن در هلند معادله‌ای برای محاسبه ET_0 ارایه داد که نیازمند داده‌های دمایی و تابش خورشیدی است. معادله تورک، شکل ساده شده معادله مک‌کینک است که نیازمند داده‌های رطوبت نسبی، دما و تابش خورشیدی است. پریستولی - تیلور با تکامل معادله پنمن، روش ترکیبی را برای محاسبه ET_0 با استفاده از داده‌های دمایی و تابش خورشیدی ارایه داد. نتایج پژوهش‌های مقایسه‌ای معادله‌های مختلف برآورده ET_0 (20 روش) با داده‌های لایسی‌متري در مناطق مختلف جهان (11 منطقه با شرایط متفاوت آب و هوایی)، بیانگر دقیق بالای روش FPM در مقایسه با سایر روش‌های تجربی می‌باشد (جنسن و همکاران، 1990). هم‌چنین در سال 1990 از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی (ICID) و سازمان خواروبار جهانی (FAO)، روش FPM به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه ET_0 از روی داده‌های اقلیمی و هم‌چنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده است (هارگریوز، 1994).

صالح و سنديل (1983) 5 روش مختلف برآورده ET_0 را در قسمت مرکزی عربستان مورد استفاده قرار دادند و بر متفاوت بودن نتایج روش‌های مختلف تأکید نمودند. آن‌ها معادله جنسن - هیز را برای مناطق خشک پیشنهاد دادند. کامارگو و همکاران (1999) و پریرا و پرویت (2004) مقدار ضریب منطقه‌ای واستجgi شده برای رابطه Th را به ترتیب 0/72 و 0/69 به دست آورده‌اند. جورج و همکاران (2002) روش‌های مختلف برآورده ET_0 را در 3 منطقه از هند و آمریکا مورد ارزیابی قرار دادند. ایستگاه‌های واقع در هند در مناطق مرطوب و ایستگاه واقع در آمریکا در منطقه خشک (داویس کالیفرنیا) قرار داشتند. داده‌های مورد استفاده در مورد داویس کالیفرنیا و دو ایستگاه در هند در مقیاس‌های ماهانه و روزانه و از یک ایستگاه دیگر در هند فقط در مقیاس ماهانه در اختیار بوده است، آنان با مرجع قرار دادن روش FPM به عنوان روش استاندارد به این نتیجه رسیدند که در ایستگاه داویس از میان معادله‌های مبتنی بر تابش، معادله پنمن مانیث مقدار ET_0 را بیش‌تر از مقدار واقعی و

معادله‌های PT و T ، مقدار ET_0 را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند، ضمن آنکه از میان معادله‌های مبتنی بر دما، معادله BC مقدار ET_0 را بیشتر از مقدار واقعی و معادله HS مقدار ET_0 را یک درصد کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌نماید. این پژوهش‌گران اضافه می‌نمایند که در ایستگاه‌های واقع در هند معادله‌های PT و T مقدار ET_0 را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند.

ایرماک و همکاران (2003) بیان می‌دارند که مدل‌های مبتنی بر پارامترهای دمایی برای استفاده در مناطقی غیر از مناطقی که این معادله‌ها در آنجا توسعه یافته‌اند، نیاز بیشتری به واسنجی‌های محلی دارند. دین‌پژوه (2006) مقدار ET_0 را با استفاده از 3 روش Th , HS , FPM اصلاح شده (کامارگو و همکاران، 1999) و لینیاکر، در 81 ایستگاه داخل ایران به صورت ماهانه محاسبه و از روش FPM به عنوان روش استاندارد استفاده نمود. وی روش HS را برای غرب و شمال‌غرب کشور، روش Th اصلاح شده را برای شمال و شمال‌شرق و روش لینیاکر را برای مرکز و جنوب‌شرق کشور پیشنهاد داد. طبری (2009) با مرجع قرار دادن روش FPM به ارزیابی 4 روش HS , Th , T , PT و MK برای محاسبه مقادیر ET_0 ماهانه در شرایط مختلف اقلیمی ایران پرداخت. براساس نتایج وی، روش T برای مناطق با اقلیم‌های سرد- مرطوب و خشک از نتایج خوبی نسبت به سایر روش‌ها برخوردار است، ضمن آنکه مدل HS در شرایط اقلیمی گرم- مرطوب و سرد- خشک دارای دقت مناسب می‌باشد. همچنان مدل MK در تمام شرایط آب و هوایی به جز سرد- مرطوب دارای ضعیفترین برآورد بوده است. ایشان اضافه می‌کنند که در آب و هوای سرد- مرطوب مدل HS نیز نتایج ضعیفی به همراه داشته است. ژابلون و سهله‌ی (2008) به ارزیابی روش FPM با معیارهای مختلف آماری در 8 ایستگاه از تونس تحت شرایط مختلف نبود داده‌های تابش خورشیدی، سرعت باد و رطوبت نسبی پرداختند. آن‌ها مقادیر پارامترهای تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و سرعت باد را از روی سایر پارامترهای در دسترس به کمک روش‌های مختلف برآورد نمودند. براساس یافته‌های آن‌ها ضعیفترین نتایج در شرایطی به دست می‌آید که فقط داده‌های دمای حداقل و حداکثر وجود داشته باشند.

لاندراس و همکاران (2008) با طراحی 7 مدل شبکه عصبی (ANN) با ساختارهای متفاوت از پارامترهای ورودی به مقایسه آن‌ها با 10 مدل تجربی واسنجی شده در منطقه باسک اسپانیا پرداختند. براساس نتایج آن‌ها، مدل‌های ANN نسبت به مدل‌های تجربی واسنجی شده با پارامترهای ورودی یکسان دارای نتایج بهتری بودند و از میان معادله‌های تجربی واسنجی شده، معادله‌های مبتنی بر روش FPM با پارامترهای تابش خورشیدی و رطوبت نسبی برآورده نسبت به معادله‌های T , PT و MK از

دقت بالاتری برخوردار بودند. رحیمی خوب (2010) نیز با برآورد مقدار ET_0 به کمک معادله HS و ANN برای 8 ایستگاه واقع در ناحیه مرطوب خزری بیان داشت که معادله HS با بیش برآورده و کم برآورده همراه است و عمل واسنجی سبب افزایش دقتمی گردد. بیاتورکشی و همکاران (2008) بهترین روش برآورده ET_0 ماهانه در 3 ایستگاه سینوپتیک همدان، کرج و گرگان را به ترتیب T_0 و پنمن- کیمبرلی تشخیص دادند. قبائی سوق و همکاران (2010) با استفاده از داده های روزانه 3 ایستگاه سینوپتیک تهران، گرگان و کرمانشاه مناسب ترین روش برآورده ET_0 در ایستگاه های یاد شده را به ترتیب معادله های واسنجی شده HS_0 و T_0 گزارش نمودند. زارع ایانه و همکاران (2011) با استفاده از میانگین های دراز مدت 91 ایستگاه هواشناسی و داده های لایسی متري به ارزیابی 13 معادله تجربی اقدام و به پنهان بندی آن با استفاده از روش های زمین آمار پرداختند. براساس نتایج آنها روش های مبتنی بر مدل پنمن در 55/6 درصد از موارد به عنوان روش مطلوب و در 22/4 درصد از ایستگاه های معادله های HS و BC به عنوان معادله های مطلوب از جمله در همدان و ارومیه شناخته شدند. احمدزاده قره ویز و همکاران (2010) با استفاده از داده های هواشناسی روزانه، مقدار ET_0 را به کمک روش های هوشمند و معادله های تجربی FPM , HS , T , PT , MK , BC در 3 ایستگاه کرمان، یزد و اصفهان محاسبه نمودند. بر پایه نتایج آنها، معادله BC در هر 3 ایستگاه از دقتمی بالاتری نسبت به سایر معادله های تجربی برخوردار بود. یزدان خواه و میرلطیفی (2011) عملکرد 5 مدل تابشی و دمایی برآورده ET_0 روزانه را در 9 ایستگاه با اقلیم های مختلف ارزیابی و با استفاده از روش آماری چند متغیره تحلیل عاملی اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ET_0 را بررسی نمودند. براساس نتایج آنها در اقلیم مرطوب، مدل های تابشی عملکرد بهتری داشتند، در حالی که در دو اقلیم خشک و نیمه خشک و اقلیم بسیار خشک، مدل های دمایی عملکرد بهتری داشتند. در هر 3 اقلیم، داده های دمای حداقل و دمای حداکثر بیشترین اهمیت را در تعیین ET_0 داشتند، ضمن آن که در ایستگاه های با اقلیم مرطوب متغیرهای رطوبت نسبی و تابش خورشیدی از اهمیت بالاتری در تعیین ET_0 برخوردار بودند.

با توجه به پژوهش های صورت گرفته و با وجود این که درستی روش FPM برای اقلیم های مختلف ارزیابی و تأیید شده است، ولی نیاز آن به پارامترهای ورودی متنوع که بهندرت در مناطق دورافتاده قابل دسترس می باشند، استفاده گسترش داده از این روش را محدود کرده است. از طرفی در بیشتر ایستگاه های سینوپتیک تجهیزات اندازه گیری پارامترهای معادله FPM به عنوان روش استاندارد در سال های آغازین تاسیس ایستگاه یا در مقاطعی از دوره آماری وجود ندارد. وضعیت های مختلف

نبود و یا کمبود پارامترهای هواشناسی در دوره‌های آماری ضرورت به کارگیری معادله‌های تجربی با پارامترهای ورودی کمتر را برای برآورد صحیح ET_0 در مواردی ایجاب می‌نماید. بنابراین، هدف این پژوهش ارزیابی معادله‌های مختلف تجربی و تخمینی برآورد ET_0 در شرایط گوناگون نبود پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی 12 ایستگاه سینوپتیک واقع در 4 ناحیه مختلف آب و هوایی ایران می‌باشد. به این منظور، معادله‌های مختلف، واسنجی و میزان تأثیر عمل واسنجی بر مقدار خطا تعیین و با در نظر گرفتن اثر عمل واسنجی با به کارگیری آماره ترکیبی به نسبت جدید IPE¹، بهترین معادله برآورد ET_0 برای هر ایستگاه در شرایط گوناگون نبود پارامترهای هواشناسی تعیین گردید. ضمن آن که استفاده از برخی رابطه‌های تجربی برای تخمین پارامترهای تابش خورشیدی و رطوبت نسبی با استفاده از پارامترهای دمایی در معادله‌های تخمینی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی و داده‌های مورد استفاده: کشور ایران با مساحت 1648000 کیلومترمربع در محدوده عرض‌های شمالی 25-40 درجه و طول‌های شرقی 44-64 درجه گسترده شده است و از نظر آب و هوایی، با متوسط بارندگی سالانه حدود 250 میلی‌متر در کمرband خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است. در این پژوهش آمار ماهانه پارامترهای هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعت‌آفتابی و سرعت باد، 12 ایستگاه سینوپتیک شامل بندرانزلی، رشت، نوشهر (واقع در ناحیه مرطوب)، مشهد، تبریز، همدان (واقع در ناحیه نیمه‌خشک)، کرمان، یزد، زاهدان (واقع در ناحیه خشک)، اهواز، بوشهر و بندرعباس (واقع در ناحیه گرم و نیمه‌خشک) از سال 1990-2007 میلادی از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. در جدول 1 برخی از خصوصیات جغرافیایی و آب هوایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی ارایه شده است.

معادله‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع: تبخیر و تعرق به علت نیاز به فاکتورهای اقلیمی مختلف و اثر متقابل این فاکتورها بر همدیگر یک پدیده غیرخطی و پیچیده است. تاکنون بیش از 50 روش تخمین ET_0 در قالب روش‌های ترکیبی، آئروبدینامیک و تجربی ارایه شده است که بیشتر با توجه به داده‌های مورد استفاده، نتایج متفاوتی دارند (زارع‌ایانه و همکاران، 2011). در این پژوهش از 6 معادله

1- Ideal Point Error

تجربی FPM، PT، T، HS و MK برای برآورد ET_0 استفاده شده است که رابطه‌های ریاضی آن‌ها در جدول ۲ ارایه شده است. همچنان علاوه بر معادله‌های تجربی ذکر شده از ۵ معادله تخمینی نیز استفاده شده است که شرح آن‌ها در ادامه این بخش آورده شده است.

جدول ۱- برخی از خصوصیات جغرافیایی و آب و هوایی استگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی.

ناحیه آب و هوایی	خصوصیات جغرافیایی						ایستگاه
	متوسط رطوبت نسبی (درصد)	بارش سالانه (میلی متر)	متوسط سالانه دما (سانتی گراد)	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	
مرطوب	84	1845	16/2	-26/2	49 درجه و 28 دقیقه	37 درجه و 28 دقیقه	بندرانزلی
مرطوب	78	1350	15/9	36/7	49 درجه و 39 دقیقه	37 درجه و 12 دقیقه	رشت
مرطوب	83	1293	16/1	-20/9	51 درجه و 30 دقیقه	36 درجه و 39 دقیقه	نوشهر
نیمه خشک	55	252	14/3	999/2	59 درجه و 38 دقیقه	36 درجه و 16 دقیقه	مشهد
نیمه خشک	54	287	12/5	1361	46 درجه و 17 دقیقه	38 درجه و 5 دقیقه	تبریز
نیمه خشک	53	327	11/1	1679/7	48 درجه و 43 دقیقه	35 درجه و 12 دقیقه	همدان
خشک	33	152	15/8	1754	56 درجه و 58 دقیقه	30 درجه و 15 دقیقه	کرمان
خشک	32	61	19/1	1237	54 درجه و 17 دقیقه	31 درجه و 54 دقیقه	بیزد
خشک	33	84	18/5	1370	60 درجه و 53 دقیقه	29 درجه و 28 دقیقه	Zahidan
گرم و نیمه خشک	43	227	25/3	12	48 درجه و 33 دقیقه	31 درجه و 15 دقیقه	اهواز
گرم و نیمه خشک	65	278	21/1	19/6	50 درجه و 50 دقیقه	28 درجه و 59 دقیقه	بوشهر
گرم و نیمه خشک	66	182	26/9	10	56 درجه و 22 دقیقه	27 درجه و 13 دقیقه	بندرعباس

جدول 2- رابطه‌های ریاضی و علایم اختصاری معادله‌های تجربی برآورده $\cdot ET_0$.

معادله	نماد اختصاری	روابط ریاضی برآورد
فائق پنمن - مانتبث	FPM	$FPM = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma(900/(T+273))U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0/34U_2)}$
ترننت وايت	Th	$Th = 16N_m \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a$
هارگریوز - سامانی	HS	$HS = 0.0023 \frac{R_a}{\lambda} (T_{mean} + 17/8) \sqrt{T_{max} - T_{min}}$
پریستلی - تیلور	PT	$PT = \frac{a}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G)$
مک‌کینک	MK	$MK = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12$
تورک	T	$T = a_T 0.013 \frac{T_{mean}}{T_{mean} + 15} + \frac{23/8856 R_s + 50}{\lambda}$
		$RH \geq 50 \rightarrow a_T = 1$
		$RH < 50 \rightarrow a_T = 1 + \frac{50 - RH}{70}$

پارامترهای به کار رفته در جدول 2 به شرح زیر می‌باشند:

T_{min} : دمای حداقل روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{max} : دمای حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد)، N_m : میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{mean} : ضریب اصلاحی (تابعی از طول جغرافیایی منطقه و ماه موردنظر)، I : شاخص حرارتی سالانه، n : شماره ماههای سال، a : تابعی از شاخص حرارتی سالانه، λ : گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)، Δ : شب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa C^{-1}$ ، $MJ m^{-2} d^{-1}$)، R_n : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ m^{-2} d^{-1}$), G : چگالی شار گرمای خاک ($MJ m^{-2} d^{-1}$), R_a : تابش خورشیدی روزانه ($MJ m^{-2} d^{-1}$), R_s : تابش بروزنزمینی ($MJ m^{-2} d^{-1}$), ضریب α برابر $1/26$, γ : ضریب سایکرومتری رطوبتی ($kPa C^{-1}$), U_2 : سرعت باد در ارتفاع 2 متری (متر بر ثانیه), e_s : فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a : فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، $e_{s,T_{min}}$: فشار بخار اشباع در دمای حداقل روزانه (کیلوپاسکال)، $e_{s,T_{max}}$: فشار بخار اشباع در دمای حداکثر روزانه (کیلوپاسکال) و RH : متوسط رطوبت نسبی روزانه (درصد) (لاندراس و همکاران، 2008).

در معادله‌های تجربی جدول 2 مقادیر تابش خورشیدی از رابطه انگستروم - پرسکات با ضرایب تجربی a برابر با 0/25 و b برابر با 0/50 (آلن و همکاران، 1998) محاسبه شده‌اند. معادله‌های تخمینی

T_{Rsest} , FPM_{Rsest} , MK_{Rsest} , PT_{Rsest} و FPM به ترتیب شکل‌های تغییریافته معادله‌های تجربی FPM , MK و PT می‌باشند که در آن‌ها، مقادیر تابش خورشیدی براساس پارامترهای دمایی از طریق رابطه ۱ برآورد شده‌اند.

$$R_{sest} = 0/16 R_a \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad (1)$$

در صورت نبود داده‌های رطوبت نسبی (RH)، فشار بخار واقعی e_a با فرض این‌که دمای نقطه شبنم نزدیک به دمای حداقل روزانه T_{\min} است، از رابطه ۲ به جای رابطه ۱ برآورد می‌شود.

$$e_a = \frac{RH}{100} \left[\frac{e_s(T_{\min}) + e_s(T_{\max})}{2} \right] \quad (2)$$

$$e_a = 0/611 \exp \frac{17/27 T_{\min}}{T_{\min} + 237/3} \quad (3)$$

معادله $FPM_{RsRHest}$ شکل تغییریافته معادله FPM می‌باشد که در آن با فرض نبود داده‌های رطوبت نسبی و تابش خورشیدی، مقادیر آن‌ها براساس داده‌های دمایی (رابطه‌های ۱ و ۳) محاسبه و در معادله FPM جایگزین شده‌اند.

در ادامه، معادله‌های تجربی PT_{Rsest} , Th , T , HS و MK و معادله‌های تخمینی PT_{Rsest} , Th , T , HS و MK_{Rsest} , PT_{Rsest} , MK_{Rsest} , ET_{Rsest} و $FPM_{RsRHest}$ براساس پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه ET_0 در ۳ گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. معادله‌های گروه نخست، مبتنی بر پارامترهای دما و یا رطوبت نسبی می‌باشند و شامل معادله‌های HS , MK_{Rsest} , PT_{Rsest} , Th و T_{Rsest} می‌باشند. در گروه دوم معادله‌های PT , MK و Th قرار دارند که برای محاسبه ET_0 ، علاوه‌بر دما و یا رطوبت نسبی نیازمند پارامتر تابش خورشیدی هستند. در گروه سوم معادله‌های تخمینی قرار دارند که دارای پارامترهای مشابه با معادله FPM می‌باشند، با این تفاوت که هر یک از پارامترهای تابش خورشیدی و یا رطوبت نسبی و یا هر دو پارامتر براساس پارامترهای دمایی برآورد شده‌اند. معادله‌های این گروه نیازمند داده‌های سرعت باد می‌باشند. تقسیم‌بندی معادله‌های مختلف براساس پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ET_0 در جدول ۳ آورده شده است.

ابتدا در طول دوره آماری ۱۹۹۰-۲۰۰۷ برای هر ایستگاه، ماه‌ایی که تمامی پارامترهای دمایی حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به‌طور کامل موجود باشند را تعیین

و سپس مقادیر ET_0 با استفاده از معادله‌های تجربی FPM، PT، T، HS و MK و تخمینی Th با استفاده از معادله‌های FPM_{RsRHest}، T_{Rsrest}، MK_{Rsrest}، PT_{Rsrest} براساس رابطه‌های ارایه شده برای هر معادله محاسبه شد. در ادامه برای واسنجی و انتخاب مناسب‌ترین معادله برای هر ایستگاه در هر یک از گروه‌های سه‌گانه، دوره آماری 1990-2007 به 2 دوره واسنجی (1990-2003) و دوره صحتسنجی (2004-2007) تقسیم گردید.

لازم به ذکر است که در ایستگاه‌های نوشهر و همدان برای تمامی طول دوره مورد بررسی هیچ داده مفقودی وجود نداشت. در سایر ایستگاه‌های مورد بررسی در برخی از ماهها بعضی از پارامترهای مورد نیاز روش FPM مفقود می‌باشند که دامنه آنها از 11 ماه (ایستگاه بوشهر) تا 2 ماه (ایستگاه رشت)، از مجموع 216 ماه در نوسان می‌باشد.

جدول 3- تقسیم‌بندی معادله‌های مختلف براساس پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ET_0

پارامترهای هواشناسی موردنیاز	نام اختصاری معادله‌ها	گروه
T _{mean,max,min}	Th	
T _{mean,max,min}	PT _{Rsrest}	معادله‌های مبتنی بر پارامترهای دما و یا رطوبت نسبی (گروه اول)
T _{mean,max,min}	MK _{Rsrest}	
T _{mean,max,min}	HS	
T _{mean,max,min} , RH	T _{Rsrest}	
T _{mean,max,min} , R _s	PT	معادله‌های مبتنی بر پارامتر تابش خورشیدی (گروه دوم)
T _{mean,max,min} , R _s	MK	
T _{mean,max,min} , R _s , RH	T	
T _{mean,max,min} , u ₂ , RH	FPM _{Rsrest}	معادله‌های مبتنی بر روش FPM (گروه سوم)
T _{mean,max,min} , u ₂	FPM _{RsRHest}	

برای واسنجی معادله‌های مختلف برآورده ET_0 ، به کمک آمار سال‌های 1990-2003 با مرجع قرار دادن معادله FPM به عنوان روش استاندارد، از رابطه 4 استفاده گردید.

$$FPM = a + b ET_{Model} \quad (4)$$

در این رابطه، E_{Model} مقدار ET_0 محاسبه شده از معادله‌های مختلف و ضرایب a و b به ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون می‌باشند (آلن و همکاران، 1998).

معیارهای ارزیابی نتایج: با توجه به آنکه استفاده از آماره‌های مختلف می‌تواند منجر به انتخاب معادله‌های متفاوتی به عنوان معادله‌های مناسب گردد، در این پژوهش مقادیر $_{\text{ET}}$ ماهانه محاسبه شده از معادله‌های مختلف از طریق آماره ترکیبی IPE مقایسه می‌شوند. این آماره با وزن دادن به آماره‌های میانگین خطای مطلق (MBE)¹، ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE)²، میانگین قدر مطلق خطای نسبی (MARE)³ و ضریب تبیین R^2 از ترکیب آنها مطابق رابطه ۹ محاسبه می‌شود. مقدار IPE بین صفر و یک تغییر می‌کند که بهترین عملکرد براساس این آماره برابر صفر است (الشوریگی و همکاران، ۲۰۰۹).

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - P_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}} \quad (6)$$

$$MARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{O_i - P_i}{O_i} \right| \quad (7)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2} \quad (8)$$

$$IPE = \left\{ 0/25 \left[\left(\frac{RMSE_{ij}}{\max RMSE_{ij}} \right)^2 + \left(\frac{MARE_{ij}}{\max MARE_{ij}} \right)^2 + \left(\frac{MBE_{ij}}{\max |MBE_{ij}|} \right)^2 + \left(\frac{R_{ij}^2 - 1/0}{\sqrt{\max R_{ij}^2}} \right)^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

در رابطه‌های ۵ تا ۸ پارامتر O_i مقادیر معادله FPM به عنوان روش استاندارد (مشاهداتی) و P_i مقادیر برآورده از معادله‌های مختلف و \bar{O}_i و \bar{P}_i نیز به ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و برآورده می‌باشند. در رابطه ۹ اندیس i برای معادله‌های مختلف و اندیس j برای ایستگاه‌های مختلف تعریف شده است.

1- Mean Bias Error

2- Root Mean Square Error

3- Mean Absolute Relative Error

تعیین میزان تأثیر عمل واسنجی بر عملکرد معادله‌های تجربی و تخمینی: لاندراس و همکاران (2008) با محاسبه مقادیر RMSE برای معادله‌های واسنجی شده ($RMSE_{ET_o, Calibrated}$) و معادله‌های واسنجی نشده ($RMSE_{ET_o, notCalibrated}$), از رابطه 10 برای تعیین میزان تأثیر عمل واسنجی بر مقدار خط استفاده نمودند که براساس آن، مقادیر مثبت $RaRMSE^1$ نشان‌دهنده بهبود عملکرد و کاهش مقدار خط و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده افزایش مقدار خط در اثر واسنجی است.

$$RaRMSE = 1 - \frac{RMSE_{ET_o, Calibrated}}{RMSE_{ET_o, notCalibrated}} \quad (10)$$

در این پژوهش، براساس مفاهیم رابطه 10 و با توجه به آماره IPE، آماره RaIPE به صورت رابطه 11، تعریف و معیار سنجش میزان تأثیر عمل واسنجی بر افزایش یا کاهش دقت معادله‌های برآورد ET_o قرار گرفت.

$$RaIPE = 1 - \frac{IPE_{ET_o, Calibrated}}{IPE_{ET_o, notCalibrated}} \quad (11)$$

در گام نهایی با توجه به مقادیر آماره IPE معادله‌های تجربی و تخمینی واسنجی شده در دوره 2004-2007 و در نظر گرفتن اثر واسنجی بر مقدار خط، مناسب‌ترین معادله برآورد ET_o برای هر ایستگاه در شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی در هر یک از گروه‌های سه‌گانه تعیین گردید.

نتایج و بحث

نتایج ضرایب واسنجی معادله‌های مختلف برآورد ET_o در دوره 1990-2003: همان‌گونه که بیان شد، با استفاده از آمار پارامترهای هواشناسی در دوره 1990-2003، مقادیر ET_o برای هر یک از معادله‌های تجربی و تخمینی محاسبه گردید. سپس با استفاده از رابطه 4، ضرایب رگرسیون خطی برای واسنجی معادله‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی به‌دست آمد که نتایج ضرایب رگرسیون خطی معادله‌های مختلف در جدول 4 ارایه شده است.

1- Root Mean Square Error Ratio

جدول 4- ضرایب رگرسیون خطی معادلات مختلف برآورده ET_0 در ایستگاههای مورد بررسی.

معادله‌های گروه سوم										ضرایب واسنجی	ایستگاه		
معادله‌های گروه دوم					معادله‌های گروه اول								
FPM _{RsRHest}	FPM _{Rrest}	T	MK	PT	T _{Rrest}	MK _{Rrest}	PT _{Rrest}	HS	Th				
1/58	1/45	2/35	1/13	0/79	3/67	1/88	1/22	1/31	0/69	a			
-0/54	-0/40	-0/14	-0/06	0/16	-0/58	-0/49	-0/23	-0/41	0/65	b	پندرانزی		
0/975	0/983	0/988	0/989	0/989	0/955	0/963	0/967	0/974	0/933	R ²			
1/09	1/04	2/35	1/16	0/82	2/51	1/26	0/86	0/88	0/44	a			
-0/24	-0/12	-0/14	-0/11	0/10	-0/37	-0/42	-0/02	-3/30	0/80	b	رشت		
0/988	0/988	0/983	0/993	0/995	0/967	0/977	0/978	0/985	0/911	R ²			
1/19	1/16	2/38	1/17	0/78	2/85	1/46	0/91	1/01	0/61	a			
-0/26	-0/17	-0/20	-0/17	0/21	-0/40	-0/42	0/06	-0/29	0/79	b	نوشهر		
0/985	0/990	0/982	0/986	0/991	0/959	0/974	0/974	0/973	0/889	R ²			
1/26	1/04	2/30	1/46	1/21	2/51	1/61	1/27	1/13	1/04	a			
-0/34	-0/10	0/36	-0/45	0/06	0/15	-0/82	-0/05	-0/45	1/05	b	مشهد		
0/987	0/997	0/961	0/974	0/951	0/960	0/959	0/924	0/973	0/961	R ²			
1/33	1/05	2/41	1/54	1/27	2/68	1/63	1/38	1/20	1/49	a			
-0/15	-0/09	0/60	-0/45	0/09	0/53	-0/28	-0/02	-0/03	1/18	b	تبریز		
0/985	0/999	0/977	0/975	0/949	0/971	0/939	0/926	0/967	0/956	R ²			
1/10	0/95	2/22	1/52	1/31	1/98	1/33	1/16	0/98	1/18	a			
-0/17	0/02	0/82	-0/47	-0/03	0/81	-0/49	0/06	-0/08	1/18	b	همدان		
0/992	0/999	0/972	0/978	0/945	0/973	0/973	0/933	985	0/966	R ²			
1/13	0/98	1/92	1/53	1/36	1/84	1/47	1/28	1/01	0/96	a			
-0/07	0/00	0/72	-0/66	0/16	0/65	-0/84	0/21	-0/14	1/95	b	کرمان		
0/987	0/999	0/924	0/953	0/970	0/924	0/949	0/956	0/951	0/912	R ²			
1/24	1/03	1/92	1/54	1/36	2/09	1/68	1/42	1/09	0/67	a			
-0/06	-0/08	0/56	-0/56	0/42	0/40	-0/80	0/36	-0/08	2/30	b	یزد		
0/975	0/998	0/936	0/948	0/917	0/933	0/932	0/892	0/941	0/885	R ²			
1/18	1/00	1/93	1/55	1/33	1/90	1/51	1/30	1/01	0/81	a			
0/06	-0/01	0/87	-0/42	0/61	0/89	-0/35	0/66	0/30	2/49	b	Zahidan		
0/970	0/998	0/917	0/937	0/940	0/900	0/912	0/922	0/921	0/907	R ²			
1/20	0/99	2/69	1/95	1/66	2/58	1/85	1/62	1/11	0/33	a			
-0/14	0/07	-0/34	-1/48	-0/65	-0/12	-1/08	-0/49	-0/43	2/69	b	اهواز		
0/987	0/998	0/954	0/949	0/941	0/954	0/956	0/944	0/962	0/855	R ²			
1/40	1/14	3/27	1/51	0/99	4/18	1/95	1/28	1/21	0/38	a			
-0/56	-0/16	-0/99	-0/63	0/39	-1/44	-0/98	-0/05	-0/48	2/45	b	پر شهر		
0/969	0/978	0/941	0/938	0/932	0/928	0/927	0/941	0/939	0/839	R ²			
1/32	1/18	3/35	1/52	0/89	4/09	1/85	1/14	1/17	0/27	a			
-0/37	-0/27	-1/29	-0/82	0/67	-1/48	-0/82	0/35	-0/44	2/81	b	پندر عباس		
0/939	0/970	0/963	0/959	0/942	0/854	0/832	0/910	0/892	0/853	R ²			

نتایج ارزیابی معادله‌های ET_0 و استنجدی شده در دوره صحبت‌سنجدی 2004-2007: در ادامه با استفاده از ضرایب رگرسیون خطی محاسبه شده برای معادله‌های مختلف (جدول 4) و رابطه ۴ مقادیر ET_0 و استنجدی شده برای هر یک از معادله‌های تجربی و تخمینی در دوره 2004-2007 محاسبه گردید. انتخاب معادله مناسب در هر ایستگاه از میان معادله‌های مختلف هر گروه با توجه به این که کدام‌یک از آماره‌های ارزیابی ملاک قضاوت واقع شود، می‌تواند منجر به نتایج متفاوتی گردد. به عنوان نمونه در ایستگاه رشت (جدول ۵) از میان معادله‌های گروه اول براساس آماره RMSE، معادله PT_{Rrest} ، براساس آماره‌های MBE، MARE و IPE معادله MK_{Rrest} و براساس آماره R، معادله HS و از میان معادله‌های گروه دوم براساس تمامی آماره‌ها معادله و استنجدی شده MK به عنوان معادله‌های مناسب انتخاب می‌شوند. با توجه به متفاوت بودن نتایج آماره‌های مختلف و اهمیت هر یک از آن‌ها در انتخاب مدل نهایی، در این پژوهش معیار ترکیبی IPE ملاک نهایی ارزیابی واقع می‌شود. براساس آماره IPE در گروه اول و دوم به ترتیب معادله‌های و استنجدی شده MK_{Rrest} و MK به عنوان معادله‌های مناسب انتخاب می‌گردند. ضمن آن‌که در گروه سوم براساس آماره‌های مختلف (به جزء MBE) معادله و استنجدی شده FPM_{Rrest} انتخاب می‌شود. نتایج مقادیر آماره IPE برای معادله‌های مختلف و استنجدی شده برای برآورد ET_0 در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره صحبت‌سنجدی در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۵- نتایج ارزیابی معادله‌های مختلف و استنجدی شده در ایستگاه رشت در گروه‌های سه‌گانه براساس آماره‌های مختلف ارزیابی.

معادله‌های گروه سوم		معادله‌های گروه دوم				معادله‌های گروه اول				آماره
FPM _{RsRHest}	FPM _{Rrest}	T	MK	PT	T _{Rrest}	MK _{Rrest}	PT _{Rrest}	HS	Th	ارزیابی
0/226	0/163	1/555	0/363	0/453	1/588	0/494	0/427	0/587	1/459	RMSE
-0/010	0/014	1/329	0/271	-0/315	1/324	0/249	-0/298	-0/541	-0/590	MBE
0/087	0/043	0/535	0/106	0/143	0/518	0/111	0/160	0/291	0/421	MARE
0/986	0/991	0/966	0/993	0/989	0/945	0/965	0/965	0/975	0/842	R^2
0/057	0/030	0/394	0/080	0/104	0/387	0/086	0/113	0/199	0/303	IPE

جدول 6- نتایج معادله‌های مختلف واسنجی شده در ایستگاه‌های مورد بررسی براساس آماره IPE.

ایستگاه									
معادله‌های گروه سوم			معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه اول			
FPM _{RsRhest}	FPM _{Rrest}	T	MK	PT	T _{Rrest}	MK _{Rrest}	PT _{Rrest}	HS	Th
0/057	0/038	0/039	0/030	0/049	0/077	0/067	0/083	0/053	0/086
0/057	0/030	0/394	0/080	0/104	0/387	0/086	0/113	0/199	0/303
0/032	0/019	0/039	0/032	0/053	0/062	0/050	0/070	0/041	0/082
0/061	0/048	0/098	0/085	0/078	0/082	0/096	0/091	0/060	0/602
0/152	0/124	0/350	0/290	0/206	0/188	0/202	0/147	0/132	0/317
0/139	0/085	0/275	0/245	0/265	0/261	0/216	0/2645	0/203	0/195
0/023	0/008	0/096	0/066	0/052	0/086	0/057	0/049	0/058	0/119
0/112	0/070	0/179	0/152	0/204	0/175	0/166	0/216	0/037	0/131
0/033	0/008	0/087	0/062	0/065	0/087	0/059	0/069	0/055	0/083
0/057	0/014	0/079	0/083	0/089	0/094	0/111	0/106	0/094	0/175
0/290	0/134	0/064	0/062	0/049	0/390	0/414	0/280	0/376	0/147
0/067	0/094	0/271	0/274	0/289	0/218	0/222	0/247	0/206	0/201
بندرعباس									

ارزیابی میزان تأثیر عمل واسنجی بر عملکرد معادله‌های مختلف: همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید با محاسبه مقادیر IPE برای معادله‌های واسنجی شده (IPE_(ETO Calibrated)) و معادله‌های بدون عمل واسنجی (IPE_(ETO not Calibrated)) در دوره صحبت‌سنگی با استفاده از رابطه ۱۱، مقدار RaIPE (بر حسب درصد) برای هر یک از معادله‌های تجربی و تخمینی در هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی محاسبه گردید که نتایج آن در جدول ۷ ارایه شده است. در این جدول مقادیر مثبت RaIPE نشانگر بهبود عملکرد و مقادیر منفی بیانگر کاهش عملکرد و افزایش مقدار خطای در اثر عمل واسنجی برای معادله‌های مختلف می‌باشد. براساس نتایج جدول ۷، در ایستگاه‌های بندرانزلی، نوشهر و کرمان تمامی معادله‌ها در اثر واسنجی با کاهش خطای همراه گردیدند. در ایستگاه‌های رشت و همدان نیز بیشتر معادله‌ها با افزایش خطای در اثر واسنجی همراه شدند. در سایر ایستگاه‌ها در اثر عمل واسنجی خطای برآورد بیشتر معادله‌ها کاهش یافت هر چند برخی دیگر نیز با افزایش خطای برآورد مواجه شدند. اگرچه انجام عمل واسنجی سبب کاهش خطای در بیشتر معادله‌های تجربی و تخمینی و در بیشتر ایستگاه‌ها شده است اما با توجه به وجود معادله‌های با RaIPE منفی، معادله‌های یاد شده نیازمند برآش روابطی غیرخطی برای واسنجی می‌باشند.

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (20)، شماره (3) 1392

جدول 7- نتایج مقدار RaIPE برای معادله‌های مختلف برآورد ET_0 در گروه‌های سه‌گانه در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	معادله‌های گروه اول									
	معادله‌های گروه دوم					معادله‌های گروه سوم				
	FPM _{RsRHest}	FPM _{Rrest}	T	MK	PT	T _{Rrest}	MK _{Rrest}	PT _{Rrest}	HS	Th
بندرانزلی	57/61	66/17	90/11	54/23	62/43	83/56	71/73	8/79	27/54	55/98
رشت	-0/54	-1/81	1/46	0/51	-0/45	1/18	-1/94	-1/33	1/02	0/78
نوشهر	38/44	59/24	90/22	56/21	56/25	85/45	65/53	5/36	45/60	61/98
مشهد	46/66	-122/67	80/04	43/98	49/51	83/94	48/16	50/83	17/99	-88/67
تبریز	-8/29	-48/01	45/57	29/33	34/83	67/92	20/94	34/61	-6/52	36/78
همدان	-183/17	-163/77	49/24	-80/05	-116/13	49/42	-111/62	-151/12	-78/98	49/27
کرمان	72/56	55/25	81/01	65/72	80/24	82/15	63/08	76/56	18/31	71/21
یزد	41/77	-344/50	67/16	44/83	42/55	69/15	47/73	42/58	56/66	63/53
زاهدان	81/08	-11/50	84/87	80/08	83/04	84/74	80/46	81/90	41/09	80/80
اهواز	52/74	3/28	87/12	74/92	72/81	84/60	66/10	66/76	-12/28	78/95
بوشهر	-10/69	-4/97	89/59	75/29	53/24	44/19	5/86	0/51	-91/90	63/86
بندرعباس	67/37	-11/84	58/96	7/74	-103/62	69/27	46/48	3/36	-52/88	68/20

با توجه به نتایج جدول 6 و در نظر گرفتن تأثیر واستنجی بر عملکرد معادله‌ها (جدول 7)، نتایج معادله‌های مختلف در دوره صحبت‌سنگی براساس آماره IPE در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول 8 ارایه شده است. در جدول ذکر شده برای معادله‌هایی که عمل واستنجی سبب افزایش خطای آن‌ها شده بود (معادله‌ها با RaIPE منفی در جدول 7)، مقدار IPE معادله واستنجی نشده در دوره صحبت‌سنگی ارایه شده است. موارد یاد شده در هر ایستگاه با علامت ستاره در کنار معادله‌های مربوطه مشخص شده‌اند. مطابق نتایج به‌دست آمده از این جدول در تمامی ایستگاه‌ها (به‌جز بندرعباس) از میان معادله‌های گروه سوم، معادله FPM_{Rrest} از دقت به مراتب بالاتری نسبت به معادله FPM_{RsRHest} برخوردار است که چندان دور از انتظار نیست. زیرا معادله‌های این گروه، براساس روش FPM_{RsRHest} بنا شده‌اند و معادله FPM_{RsRHest} با تخمین دو پارامتر تابش خورشیدی و رطوبت نسبی از روی پارامترهای دمایی دارای دقت کم‌تری نسبت به معادله FPM_{Rrest} با تخمین تنها یک پارامتر تابش خورشیدی است. به عبارت دیگر انتظار می‌رود در صورتی که پارامترهای بیش‌تری به صورت تخمینی (به‌جای اندازه‌گیری مستقیم) وارد معادله شوند، دقت مدل هم کاهش یابد.

جدول 8- نتایج معادله‌های مختلف با اعمال اثر واسنجی در دوره صحبت‌سنگی براساس آماره IPE در ایستگاه‌های

مورد بررسی.

ایستگاه										
معادله‌های گروه سوم		معادله‌های گروه دوم				معادله‌های گروه اول				
FPM _{RsRHest}	FPM _{Rrest}	T	MK	PT	T _{Rrest}	MK _{Rrest}	PT _{Rrest}	HS	Th	
0/057	0/038	0/039	0/030	0/049	0/077	0/067	0/083	0/053	0/086	بندرانزلی
0/056*	0/029*	0/394	0/080	0/103*	0/387	0/085*	0/111*	0/199	0/303	رشت
0/032	0/019	0/039	0/032	0/053	0/062	0/050	0/070	0/041	0/082	نوشهر
0/061	0/022*	0/098	0/085	0/078	0/082*	0/096	0/091	0/060	0/319	مشهد
0/140*	0/084*	0/350	0/290	0/206	0/188	0/202	0/147	0/124*	0/317	تبریز
0/049*	0/032*	0/275	0/136*	0/123*	0/261	0/102*	0/105*	0/113*	0/195	همدان
0/023	0/008	0/096	0/066	0/052	0/086	0/057	0/049	0/058	0/119	کرمان
0/112	0/016*	0/179	0/152	0/204	0/175	0/166	0/216	0/037	0/131	یزد
0/033	0/007*	0/087	0/062	0/065	0/087	0/059	0/069	0/055	0/083	Zahedan
0/057	0/014	0/079	0/083	0/089	0/094	0/111	0/106	0/083*	0/175	اهواز
0/262*	0/127*	0/064	0/062	0/049	0/390	0/414	0/280	0/196*	0/147	بوشهر
0/067	0/084*	0/271	0/274	0/142*	0/218	0/222	0/247	0/135*	0/201	بندرعباس

* بیانگر استفاده از مقدار IPE معادله واسنجی نشده می‌باشد.

در ایستگاه بندرانزلی، تمامی معادله‌های گروه دوم از IPE کمتر و دقت بالاتر نسبت به معادله‌های گروه اول برخوردارند. در ایستگاه نوشهر نیز این امر به جز برای معادله HS صادق است و معادله‌های تجربی T، MK و PT از دقت بالاتری نسبت به معادله‌های تخمینی T_{Rrest}، MK_{Rrest} و PT_{Rrest} برخوردارند. در ایستگاه رشت معادله‌های گروه دوم به جز معادله T دارای دقت بیشتری نسبت به معادله‌های گروه اول (مبتنی بر دما و یا رطوبت نسبی) می‌باشد و نتیجه بهترین معادله در گروه دوم (MK) نسبت به بهترین معادله در گروه اول (MK_{Rrest}) دارای خطای کمتری است. علت این موضوع را می‌توان به در نظر گرفتن تابش خورشیدی در معادله‌های گروه دوم نسبت داد. زیرا در معادله‌های گروه اول به جای تابش خورشیدی، تابش بروزنزمینی دخالت دارد یا مقدار آن به کمک پارامترهای دمایی برآورد می‌گردد، در حالی که در نواحی مرتبط پوشش ابری بر مقدار تابش دریافتی تأثیرگذار می‌باشد و مدل‌های مبتنی بر تابش خورشیدی با در نظر گرفتن ساعات آفتابی، نتایج منطقی‌تری ارایه می‌نمایند. در ایستگاه‌های واقع در نواحی مرتبط از میان معادله‌های گروه دوم، معادله واسنجی شده MK در هر 3 ایستگاه دارای کمترین مقدار IPE در مقایسه با سایر معادله‌ها می‌باشد. در این ناحیه

نتایج بهترین معادله برآورده ET_0 در ایستگاه رشت با دو ایستگاه نوشهر و بندرانزلی در گروه اول تفاوت دارد بهطوری که در ایستگاه‌های بندرانزلی و نوشهر معادله واسنجی شده HS و در ایستگاه رشت معادله واسنجی نشده MK_{Rrest} دارای بیشترین دقت می‌باشند. این موضوع در شرایطی است که در ایستگاه‌های بندرانزلی و نوشهر معادله MK_{Rrest} بعد از معادله HS در رتبه دوم قرار دارد. همچنین در این ناحیه معادله Th با بیشترین مقدار IPE دارای ضعیفترین برآورد (یهجز رشت) می‌باشد. بهنظر می‌رسد مقدار فاصله از دریا (منبع اصلی تامین رطوبت) روی این موضوع مؤثر باشد. زیرا فاصله رشت از دریا حدود 50 کیلومتر بوده و تقریباً 70 متر بالاتر از سطح دریای خزر قرار دارد، در حالی که شهرهای بندرانزلی و نوشهر در کنار دریا و تقریباً همتراز سطح آب دریای خزر واقع شده‌اند.

در 3 ایستگاه مشهد، تبریز و همدان واقع در ناحیه نیمه‌خشک، نتایج بهترین معادله در گروه اول از دقت بالاتری نسبت به بهترین معادله در گروه دوم برخوردار می‌باشد ضمن آن‌که نتایج معادله‌های تخمینی PT_{Rrest} و MK_{Rrest} ، T_{Rrest} و PT نسبت به معادله‌های تجربی T، MK و PT دارای خطای کم‌تری می‌باشند که این موضوع نشان‌دهنده نقش بیشتر پارامترهای دمایی در برآورده ET_0 این ناحیه می‌باشد. در هر 3 ایستگاه مشهد، تبریز و همدان واقع در ناحیه نیمه‌خشک از میان معادله‌های گروه دوم، معادله PT به عنوان مناسب‌ترین معادله برآورده ET_0 انتخاب شده است و از میان معادله‌های گروه اول در ایستگاه‌های تبریز و مشهد معادله HS و در ایستگاه همدان معادله واسنجی شده MK_{Rrest} از دقت بالاتری نسبت به سایر معادله‌ها برخوردارند.

در ایستگاه‌های یزد و زاهدان واقع در نواحی خشک (یهجز کرمان) نتایج بهترین معادله مبتنی بر دما و یا رطوبت نسبی (HS) نسبت به نتایج بهترین معادله مبتنی بر تابش خورشیدی (MK) از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد و نشان‌دهنده اهمیت بیشتر پارامترهای دمایی در تعیین ET_0 این نواحی می‌باشد. ایستگاه کرمان با ارتفاع 1754 متر در رقوم ارتفاعی بالاتری نسبت به دو ایستگاه دیگر قرار دارد و با مقدار بارش متوسط سالانه 152 میلی‌متر و دمای متوسط 15/8 درجه سانتی‌گراد (جدول 1) در شرایط رطوبتی مرطوبتری نسبت به دو ایستگاه یزد و زاهدان قرار دارد که خصوصیات اقلیمی ذکر شده می‌تواند دلیلی بر برخی از تفاوت‌های نتایج این ایستگاه با دو ایستگاه دیگر در این ناحیه باشد.

در ایستگاه‌های واقع در نواحی گرم و نیمه‌خشک (یهجز بندرعباس) نتایج بهترین معادله در گروه دوم دارای دقت بیشتری نسبت به بهترین معادله در گروه اول می‌باشد. در ایستگاه‌های اهواز و بوشهر نتایج معادله‌های تخمینی PT_{Rrest} ، T_{Rrest} و MK_{Rrest} نسبت به معادله‌های تجربی T، MK و PT

دارای مقادیر IPE به مراتب بیشتری هستند که این امر نشانگر دقت کمتر آنها و بیانگر نقش بیشتر پارامتر تابش خورشیدی در برآورد ET_0 در این ناحیه می‌باشد. در ایستگاه‌های اهواز و بندرعباس در گروه اول معادله واسنجی شده HS و در ایستگاه بوشهر معادله Th از دقت بالاتری برخوردارند ضمن آنکه در ایستگاه‌های بوشهر و بندرعباس معادله PT و در ایستگاه اهواز معادله T دارای بیشترین دقت برآورد می‌باشند.

براساس نتایج جدول ۸، نتایج نهایی انتخاب معادله‌های مناسب در هر یک از شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی (گروه‌های سه‌گانه) برای ایستگاه‌های مورد بررسی، در جدول ۹ آورده شده است. در ایستگاه بندرانزلی از میان معادله‌های گروه اول و دوم، معادله‌های واسنجی شده HS و MK است. در ایستگاه مطابق با مقادیر IPE برابر با ۰/۰۵۳ و ۰/۰۳۰ از دقت بالاتری برخوردارند این در حالی است که در گروه سوم معادله واسنجی شده FPM_{Rrest} با IPE برابر با ۰/۰۳۸ نسبت به بهترین معادله در گروه دوم (MK) دارای دقت کمتری می‌باشد. بنابراین در این ایستگاه مطابق جدول ۹، مقدار ET_0 در گروه اول از معادله واسنجی شده HS و در گروه‌های دوم و سوم از معادله واسنجی شده MK محاسبه می‌گردد. در ایستگاه مشهد مقدار ET_0 در گروه‌های اول، دوم و سوم بهترین از معادله‌های واسنجی شده HS، PT و معادله واسنجی نشده FPM_{Rrest} محاسبه می‌شود. با توجه به آنکه دقت بهترین معادله در گروه اول (IPE برابر با ۰/۰۶۰) از دقت بهترین معادله در گروه دوم (IPE برابر با ۰/۰۷۸) بیشتر می‌باشد، بنابراین، مقدار ET_0 در این ایستگاه در گروه‌های اول و دوم از معادله HS محاسبه می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش مقدار ET_0 ماهانه در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک بندرانزلی، رشت، نوشهر (ناحیه مرطوب)، مشهد، تبریز، همدان (ناحیه نیمه‌خشک)، کرمان، یزد، زاهدان (ناحیه خشک)، اهواز، بوشهر و بندرعباس (ناحیه گرم و نیمه‌خشک) با استفاده از ۱۱ معادله مختلف تجربی و تخمینی محاسبه گردید. سپس بهمنظور انتخاب معادله مناسب در شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی، براساس پارامترهای مورد نیاز برای برآورد ET_0 ، معادله‌های مختلف در ۳ گروه تقسیم‌بندی و به کمک روش استاندارد FPM واسنجی و با آماره ترکیبی IPE مناسب‌ترین معادله در هر شرایط برای هر ایستگاه تعیین گردید. همچنین میزان تأثیر عمل واسنجی بر دقت معادله‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نتایج این پژوهش (جدول ۹) می‌توان سری زمانی مقادیر ET_0 را برای هر ایستگاه از ابتدای تاسیس تاکنون ایجاد نمود. علاوه‌بر آن سایر نتایج این پژوهش به شرح زیر می‌باشند:

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک جلد (20)، شماره (3) 1392

جدول ۹- نتایج معادله‌های منتخب در شرایط مختلف نبود پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	گروه اول	گروه دوم	گروه سوم
بندرانزلی	HS	MK	FPM _{Rrest} [*]
رشت	MK _{Rrest} [*]	MK	FPM _{Rrest}
نوشهر	HS	MK	FPM _{Rrest} [*]
مشهد	HS		FPM _{Rrest} [*]
تبریز	HS [*]		FPM _{Rrest} [*]
همدان	MK _{Rrest} [*]		FPM _{Rrest} [*]
کرمان	PT _{Rrest}	MK	FPM _{Rrest}
بزد	HS	MK	FPM _{Rrest} [*]
زاهدان	HS	MK	FPM _{Rrest} [*]
اهواز	HS [*]	FPM _{Rrest} [*]	FPM _{Rrest} [*]
بوشهر	Th	PT	FPM _{Rrest}
بندرعباس	HS [*]		FPM _{RsRHest}

اگرچه انجام عمل واسنجی سبب کاهش خطأ در بیشتر معادله‌های تجربی و تخمینی و در بیشتر ایستگاهها شده است اما با توجه به وجود معادله‌های با RaIPE منفی که انجام عمل واسنجی سبب افزایش خطأ در آن‌ها شده بود پیشنهاد می‌شود مطابق روش ارایه شده برای تعیین میزان تأثیر عمل واسنجی، از روابطی غیرخطی برای واسنجی معادله‌های یاد شده استفاده شود.

انتخاب معادله مناسب از میان معادله‌های واقع در هر گروه در ایستگاه‌های مختلف با توجه به این‌که کدام یک از آماره‌های ارزیابی MARE، MBE و R^2 ملاک قضاؤت واقع شود، می‌تواند منجر به انتخاب معادله متفاوتی گردد. از این‌رو در این پژوهش با استفاده از معیار ترکیبی IPE با وزن دادن به هر یک از آماره‌های یاد شده، شرایط انتخاب معادله مناسب بر مبنای دخالت همه آن‌ها فراهم گردید.

در ایستگاه‌های واقع در نواحی مرطوب و نواحی گرم و نیمه‌خشک (بهجز بندرعباس) نتایج بهترین معادله مبتنی بر تابش خورشیدی (گروه دوم) نسبت به نتایج بهترین معادله مبتنی بر دما و یا رطوبت نسبی (گروه اول) از دقت بالاتری برخوردار است که بیانگر اهمیت مقدار تابش خورشیدی بر مقدار ET_0 در این نواحی می‌باشد. در ضمن ارتفاع این نواحی کمتر از 50 متر و در بعضی از

ایستگاهها منفی است. ضمن آن که در ایستگاههای واقع در نواحی خشک و نیمهخشک (به جز کرمان) این موضوع برعکس است که نشاندهنده اهمیت بیشتر پارامترهای دمایی نسبت به تابش خورشیدی و رطوبت می‌باشد. در این نواحی ارتفاع ایستگاهها 1000 متر و بیشتر می‌باشد.

بررسی مقدار آماره‌های خطای معادله‌های تخمینی $T_{R\text{rest}}$ ، $MK_{R\text{rest}}$ و $PT_{R\text{rest}}$ که در آن‌ها مقدار تابش خورشیدی با استفاده از پارامترهای دمایی برآورد گردیده است، نشان داد که در نواحی مرطوب و گرم و نیمهخشک معادله‌های تخمینی نسبت به معادله‌های تجربی T ، MK و PT از دقت کمتر و در مناطق خشک و نیمهخشک از دقت بیشتری برخوردارند.

سپاسگزاری

این پژوهش در راستای انجام طرح پژوهشی با کد طرح 18328 انجام شده است، که از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تشكیر و قدردانی می‌شود.

منابع

- 1.Ahmadzadeh Gharah Gwiz, K.M., Mirlatifi, S.M., and Mohammadi, K. 2010. Comparison of artificial intelligence systems (ANN & ANFIS) for reference evapotranspiration estimation in the extreme arid regions of Iran. J. Water and Soil, 24: 4. 679-689. (In Persian)
- 2.Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, Italy, 300p.
- 3.Bayat Varkeshi, M., Sabziparvar, A.A., and Ghasemi, A. 2008. Evaluation of different methods of evapotranspiration estimation for two different climatics: (Case study: Hamadan, Karaj and Gorgan). CD's of Procceding of 3rd Iran Water Resour Manag Conference, 14-16 Oct, Tabriz, Iran. (In Persian)
- 4.Camargo, A.P., Marin, F.R., Sentelhas, P.C., and Picini, A.G. 1999. Adjust of the Thornthwaite's method to estimate the potential evapotranspiration for arid and superhumid climates, based on daily temperature amplitude. Revista Brasileira De Agrometeorologica, 7: 251-257.
- 5.Dinpashoh, Y. 2006. Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran, J. Agric. Water Manage. 85: 12-26.
- 6.Elshorbagy, A., Corzo, G., Srinivasulu, S., and Solomatine, D. 2009. Experimental investigation of the predictive capabilities of soft computing techniques in hydrology. Centre for Advanced Numerical Simulation (CANSIM), Department of Civil & Geological Eng, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, CANADA. 49p.

7. George, B.A., Reddy, B.R.S., Raghuwanshi, N.S., and Wallender, W.W. 2002. Decision support system for estimating reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Engine.* ASCE. 128: 1. 1-10.
8. Ghabaei Sough, M., Mosaedi, A., Hesam, M., and Hezarjaribi, A. 2010. Evaluation and calibration of different empirical equations to estimate evapotranspiration in three samples climate of Iran. CD's of Proceding of 1st Iranian national conference on applied research in water resurces, 11-13 May, Kermanshah, Iran, 8p. (In Persian)
9. Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Engine.* ASCE. 12: 6. 1132-1139.
10. Irmak, S., Allen, R.G., and Whitty, E.B. 2003. Daily grass and alfalfa-reference evapotranspiration estimates and alfalfa-to-grass evapotranspiration ratios in Florida. *J. Irrig. Drain. Engine.* ASCE. 129: 5. 360-370.
11. Jabloun, M., and Sahli, A. 2008. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data application to Tunisia. *FAO Agric Water Manage.* 95: 707-715.
12. Jensen, M.E., Burman, R.D., and Allen, R.G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Eng. Practices no. 70. American Society of Civil Engine. NY.
13. Landeras, G., Barredo, A.O., and Lopez, J.J. 2008. Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *J. Agric. Water Manage.* 95: 553-565.
14. Mardikis, M.G., Kalivas, D.P., and Kollias, V.J. 2005. Comparison of Interpolation Methods for the Prediction of Reference Evapotranspiration-An Application in Greece, *Water Resour. Manage.* 19: 251-278.
15. Mosaedi, A., and Ghabaei Sough, M. 2011. Evaluation on the effects of evapotranspiration estimations methods on drought frequency according to Reconnaissance Drought Index (RDI). CD's of Proceding of International Conference on Drought Management Strategie in Arid and Semi-Arid Regions, Muscat-Sultanate of Oman, 9p.
16. Pelton, W.L., King, K.M., and Tanner, C.B. 1960. An Evaluation of the thornthwaite and mean temperature methods for determining potential evapotranspiration. *Agron. J.* 52: 387-395.
17. Pereira, A.R., and Pruitt, W.O. 2004. Adaptation of the thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. *Agric Water Manage.* 66: 251-257.
18. Pruitt, W.O. 1964. Cyclic Relations between evapotranspiration and radiation. *Trans. Asae,* 7: 3. 271-275.
19. Pruitt, W.O., and Doorenbos, J. 1977. Empirical calibration, a requisite for evapotranspiration formulae based on daily or longer mean climatic data? In: proceedings of the International Round Table Conference On “Evapotranspiration”. International Commission on Irrig Drain, Budapest, Hungary, 20p.

- 20.Rahimikhoob, A. 2010. Estimation of evapotranspiration based on only air temperature data using artificial neural networks for a subtropical climate in Iran. *Theor Applied Climatology*, 101: 83-91.
- 21.Rivas, R., and Caselles, V. 2004. A simplified equation to estimate spatial reference evaporation from remote sensing- based surface temperature and local meteorological data. *Remote Sensing Environment*, 93: 68-76.
- 22.Salih, A.M.A., and Sendil, U. 1983. Evapotranspiration under extremely arid environment. *J. Irrig. Drain. Engine.* 110: 3. 289-303.
- 23.Tabari, H. 2009. Evaluation of reference crop evapotranspiration equations in various climates, *Water Resour. Manage.* 24: 10. 2311-2337.
- 24.Yazdankhah, S., and Mirlatifi, S.M. 2011. Relative importance of meteorological variables in estimating reference evapotranspiration for different climatic regions. *Iran. J. Irrig. Drain. Engine.* 3: 4. 319-329. (In Persian)
- 25.Zare Abyaneh, H., Bayat Varkeshi, M., Sabziparvar, A.A., Marofi, S., and Ghasemi, A. 2011. Evaluation of different methods of reference evapotranspiration estimation and Zoning in Iran. *Natural Geography Reserches*, 74: 95-110. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 20(3), 2013
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Evaluation of different empirical equations of the estimation of reference crop evapotranspiration in different conditions lacking measured meteorological parameters in some climatic regions of Iran

*A. Mosaedi¹ and M. Ghabaei Sough²

¹Associate Prof., Faculty of Natural Resources and Environmental, Ferdowsi University of Mashhad, ²Ph.D. Student, Dept. of Water Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan

Received: 05/21/2012; Accepted: 10/07/2012

Abstract

Reference crop evapotranspiration (ET_o) has important effects on estimation of agricultural water use, ecosystem models, aridity/humidity conditions and rainfall-runoff. Although, the accuracy of FAO Penman-Monteith (FPM) method for estimation of ET_o in different regions was confirmed, but because of the requirements of many meteorological parameters, its applications was limited. In this research, by using 6 empirical and 5 semi-empirical equations, monthly ET_o values were calculated during 1990-2007 for 12 synoptic stations in 4 climatic regions of Iran. By using FPM as a reference method and calculating monthly ET_o values, empirical and semi-empirical equations were calibrated for the period 1990-2003. By using combined criteria IPE for the period from 2004 to 2007, the best equation of each station was determined in lack of any meteorological parameters. Calibration by using the best linear equation reduced the amount of errors in most equations and in most stations. Estimation of solar radiation via temperature data caused the precision of semi-empirical equations being lower than empirical equation in both "humid" and "warm and semi-arid" regions, but this criteria was higher in both "arid" and "semi-arid" regions. The effects of solar radiation on ET_o was quite relevant in "humid" and "warm and semi-arid" regions, while its effects was inverse in arid and semi-arid regions which confirms the effects of temperature parameters in this regions. Selection of the best equation depends on which criteria of MBE, RMSE, MARE or R^2 was considered as judgment. The combine criteria of IPE were weighted by four mentioned criteria and provided the condition of the best selection.

Keywords: Reference crop evapotranspiration, Empirical equation, Lack of measured data, Calibration, Iran

* Corresponding Author; Email: mosaedi@um.ac.ir