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 مساعدی[1] و محمد قبائی‌سوق[2]*

[1] دانشیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد،
[2] دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

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

چکیده

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) در تعیین آب مصرفی کشاورزی، مدل‌های اکوسیستم، وضعیت‌های رطوبتی، روابط بارش- رواناب و حفاظت آب و خاک نقش به‌سزایی دارد. اگرچه درستی روش فائو- پنمن- مانتیث (FPM) برای برآورد ET_o 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 ET_o ماهانه در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در ٤ ناحیه آب و هوایی ایران با استفاده از ٦ معادله تجربی و ٥ 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 ۲۰۰۷-۲۰۰٤ 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 ET_o 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، MARE و R^2 ملاک قضاوت 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[1] 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، ۲۰۰٤). 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_o)، 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 (۲۰۰۸)، طی دهه‌های گذشته رابطه‌های تجربی متعددی، برای تخمین ET_o با استفاده از پارامترهای هواشناسی ارایه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به رابطه‌های ترنت‌وایت[2]، بلانی‌کریدل[3]، مک‌کینک[4]، تورک[5]، پریستلی- تیلور[6]، هارگریوز- سامانی[7] و فائو پنمن- مانتیث[8] 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- Hargreavs-Samani (HS)
8- FAO Penman-Monteith (FPM)

تعرق به‌عنوان متغیری اقلیمی، از خصوصیات منطقه‌ای و ویژگی ذاتی آن‌ها تأثیر می‌پذیرد (ماردیکیس و همکاران، ۲۰۰۵). روش Th تنها نیاز به داده‌های ورودی درجه حرارت دارد. این روش در مناطق خشک مقدار ET_o را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (پلتون و همکاران، ۱۹۶۰؛ پرویت، ۱۹٦٤؛ پرویت و دورنبس، ۱۹۷۷؛ مساعدی و قبائی‌سوق، ۲۰۱۱) ولی در مناطق مرطوب استوایی آمازون بیش برآورد دارد (کامارگو و همکاران، ۱۹۹۹). معادله HS در مناطق مرطوب و سواحل دریاها مقدار ET_o را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (طبری، ۲۰۰۹).

مک‌کینک براساس مقایسه بین داده‌های لایسی‌متری و روش پنمن در هلند معادله‌ای برای محاسبه ET_o 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_o، با استفاده از داده‌های دمایی و تابش خورشیدی ارایه داد. نتایج پژوهش‌های مقایسه‌ای معادله‌های مختلف برآورد ET_o (۲۰ روش) با داده‌های لایسی‌متری در مناطق مختلف جهان (۱۱ منطقه با شرایط متفاوت آب و هوایی)، بیانگر دقت بالای روش FPM در مقایسه با سایر روش‌های تجربی می‌باشد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰). هم‌چنین در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زه‌کشی (ICID) و سازمان خواروبار جهانی (FAO)، روش FPM به‌عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه ET_o از روی داده‌های اقلیمی و هم‌چنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده است (هارگریوز، ۱۹۹٤).

صالح و سندیل (۱۹۸۳) ۵ روش مختلف برآورد ET_o 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 (۱۹۹۹) و پریرا و پرویت (۲۰۰٤) مقدار ضریب منطقه‌ای واسنجی شده برای رابطه Th را به‌ترتیب ۰/۷۲ و ۰/٦۹ به‌دست آوردند. جورج و همکاران (۲۰۰۲) روش‌های مختلف برآورد ET_o را در ۳ 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 به‌عنوان روش استاندارد به این نتیجه رسیدند که در ایستگاه داویس از میان معادله‌های مبتنی بر تابش، معادله پنمن مانتیث مقدار ET_o را بیش‌تر از مقدار واقعی و

معادله‌های PT و T، مقدار ET_o را کم‌تر از مقدار واقعی برآورد می‌نمایند، ضمن آن‌که از میان معادله‌های مبتنی بر دما، معادله BC مقدار ET_o را بیش‌تر از مقدار واقعی و معادله HS مقدار ET_o 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_o را کم‌تر از مقدار واقعی تخمین می‌زنند.

ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) بیان می‌دارند که مدل‌های مبتنی بر پارامترهای دمایی برای استفاده در مناطقی غیر از مناطقی که این معادله‌ها در آن‌جا توسعه یافتند، نیاز بیش‌تری به واسنجی‌های محلی دارند. دین‌پژوه (۲۰۰٦) مقدار ET_o را با استفاده از ۳ روش HS، Th اصلاح‌شده (کامارگو و همکاران، ۱۹۹۹) و لینیاکر، در ۸۱ ایستگاه داخل ایران به‌صورت ماهانه محاسبه و از روش FPM به‌عنوان روش استاندارد استفاده نمود. وی روش HS را برای غرب و شمال‌غرب کشور، روش Th اصلاح‌شده را برای شمال و شمال‌شرق و روش لینیاکر را برای مرکز و جنوب‌شرق کشور پیشنهاد داد. طبری (۲۰۰۹) با مرجع قرار دادن روش FPM به ارزیابی ٤ روش HS، T، PT و MK برای محاسبه مقادیر ET_o 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. هم‌چنین مدل MK در تمام شرایط آب و هوایی به‌جز 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 سهلی (۲۰۰۸) به ارزیابی روش FPM با معیارهای مختلف آماری در ۸ 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 به‌دست می‌آید که فقط داده‌های دمای حداقل و حداکثر وجود داشته باشند.

لاندراس و همکاران (۲۰۰۸) با طراحی ۷ مدل شبکه عصبی (ANN) با ساختارهای متفاوت از پارامترهای ورودی به مقایسه آن‌ها با ۱۰ مدل تجربی واسنجی‌شده در منطقه باسک اسپانیا پرداختند. براساس نتایج آن‌ها، مدل‌های ANN نسبت به مدل‌های تجربی واسنجی‌شده با پارامترهای ورودی یکسان دارای نتایج بهتری بودند و از میان معادله‌های تجربی واسنجی‌شده، معادله‌های مبتنی بر روش FPM با پارامترهای تابش خورشیدی و رطوبت نسبی برآوردی نسبت به معادله‌های T، PT و MK از

دقت بالاتری برخوردار بودند. رحیمی‌خوب (۲۰۱۰) نیز با برآورد مقدار ET_o به کمک معادله HS و ANN برای ۸ ایستگاه واقع در ناحیه مرطوب خزری بیان داشت که معادله HS با بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی همراه است و عمل واسنجی سبب افزایش دقت آن می‌گردد. بیات‌ورکشی و همکاران (۲۰۰۸) بهترین روش برآورد ET_o ماهانه در ۳ ایستگاه سینوپتیک همدان، کرج و گرگان را به‌ترتیب HS، T و پنمن- کیمبرلی تشخیص دادند. قبائی‌سوق و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های روزانه ۳ ایستگاه سینوپتیک تهران، گرگان و کرمانشاه مناسب‌ترین روش برآورد ET_o در ایستگاه‌های یاد شده را به‌ترتیب معادله‌های واسنجی‌شده HS، T و HS گزارش نمودند. زارع‌ابیانه و همکاران (۲۰۱۱) با استفاده از میانگین‌های درازمدت ۹۱ ایستگاه هواشناسی و داده‌های لایسی‌متری به ارزیابی ۱۳ معادله تجربی اقدام و به پهنه‌بندی آن با استفاده از روش‌های زمین‌آمار پرداختند. براساس نتایج آن‌ها روش‌های مبتنی بر مدل پنمن در ۵۵/٦ درصد از موارد به‌عنوان روش مطلوب و در ۲۲/٤ درصد از ایستگاه‌ها معادله‌های HS و BC به‌عنوان معادله‌های مطلوب از جمله در همدان و ارومیه شناخته شدند. احمدزاده قره‌ویز و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه، مقدار ET_o را به کمک روش‌های هوشمند و معادله‌های تجربی HS، FPM، T، PT، MK و BC در ۳ ایستگاه کرمان، یزد و اصفهان محاسبه نمودند. بر پایه نتایج آن‌ها، معادله BC در هر ۳ ایستگاه از دقت بالاتری نسبت به سایر معادله‌های تجربی برخوردار بود. یزدان‌خواه و میرلطیفی (۲۰۱۱) عملکرد ۵ مدل تابشی و دمایی برآورد ET_o روزانه را در ۹ ایستگاه با اقلیم‌های مختلف ارزیابی و با استفاده از روش آماری چندمتغیره تحلیل عاملی اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی مؤثر بر ET_o را بررسی نمودند. براساس نتایج آن‌ها در اقلیم مرطوب، مدل‌های تابشی عملکرد بهتری داشتند، در حالی‌که در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک، مدل‌های دمایی عملکرد بهتری داشتند. در هر ۳ اقلیم، داده‌های دمای حداقل و دمای حداکثر بیش‌ترین اهمیت را در تعیین ET_o داشتند، ضمن آن‌که در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب متغیرهای رطوبت نسبی و تابش خورشیدی از اهمیت بالاتری در تعیین ET_o برخوردار بودند.

با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته و با وجود این‌که درستی روش FPM برای اقلیم‌های مختلف ارزیابی و تأیید شده است، ولی نیاز آن به پارامترهای ورودی متنوع که به‌ندرت در مناطق دورافتاده قابل دسترس می‌باشند، استفاده گسترده از این روش را محدود کرده است. از طرفی در بیش‌تر ایستگاه‌های سینوپتیک تجهیزات اندازه‌گیری پارامترهای معادله FPM به‌عنوان روش استاندارد در سال‌های آغازین تاسیس ایستگاه یا در مقاطعی از دوره آماری وجود ندارد. وضعیت‌های مختلف

نبود و یا کمبود پارامترهای هواشناسی در دوره‌های آماری ضرورت به‌کارگیری معادله‌های تجربی با پارامترهای ورودی کم‌تر را برای برآورد صحیح ET_o در مواردی ایجاب می‌نماید. بنابراین، هدف این پژوهش ارزیابی معادله‌های مختلف تجربی و تخمینی برآورد ET_o در شرایط گوناگون نبود پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده با استفاده از اطلاعات هواشناسی ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در ٤ 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 به‌کارگیری آماره ترکیبی به‌نسبت جدید IPE[1]، بهترین معادله برآورد ET_o 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 ١٦٤٨٠٠٠ کیلومترمربع در محدوده عرض‌های شمالی ٤٠-٢٥ درجه و طول‌های شرقی ٦٤-٤٤ درجه گسترده شده است و از نظر آب و هوایی، با متوسط بارندگی سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده است. در این پژوهش آمار ماهانه پارامترهای هواشناسی دمای حداقل، دمای حداکثر، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد، ۱۲ 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 ۲۰۰۷-۱۹۹۰ میلادی از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید. در جدول ۱ برخی از خصوصیات جغرافیایی و آب هوایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی ارایه شده است.

معادله‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع: تبخیر و تعرق به‌علت نیاز به فاکتورهای اقلیمی مختلف و اثر متقابل این فاکتورها بر هم‌دیگر یک پدیده غیرخطی و پیچیده است. تاکنون بیش از ۵۰ روش تخمین ET_o، در قالب روش‌های ترکیبی، آئرودینامیک و تجربی ارایه شده است که بیش‌تر با توجه به داده‌های مورد استفاده، نتایج متفاوتی دارند (زارع‌ابیانه و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش از ٦ معادله

1- Ideal Point Error

تجربی FPM، HS، T، PT، Th و MK برای برآورد ET_o استفاده شده است که رابطه‌های ریاضی آن‌ها در جدول ۲ ارایه شده است. هم‌چنین علاوه‌بر 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 ایستگاه‌های سینوپتیک مورد بررسی.

ایستگاه	خصوصیات جغرافیایی			خصوصیات آب و هوایی		
	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (متر)	متوسط سالانه دما (سانتی‌گراد)	بارش سالانه (میلی‌متر)	متوسط رطوبت نسبی (درصد)	ناحیه آب و هوایی
بندرانزلی	۳۷ درجه و ۲۸ دقیقه	٤۹ درجه و ۲۸ دقیقه	-۲٦/۲	۱٦/۲	۱۸٤٥	۸٤	مرطوب
رشت	۳۷ درجه و ۱۲ دقیقه	٤۹ درجه و ۳۹ دقیقه	۳٦/۷	۱٥/۹	۱۳٥۰	۷۸	مرطوب
نوشهر	۳٦ درجه و ۳۹ دقیقه	٥۱ درجه و ۳۰ دقیقه	-۲۰/۹	۱٦/۱	۱۲۹۳	۸۳	مرطوب
مشهد	۳٦ درجه و ۱٦ دقیقه	٥۹ درجه و ۳۸ دقیقه	۹۹۹/۲	۱٤/۳	۲٥۲	٥٥	نیمه‌خشک
تبریز	۳۸ درجه و ٥ دقیقه	٤٦ درجه و ۱۷ دقیقه	۱۳٦۱	۱۲/٥	۲۸۷	٥٤	نیمه‌خشک
همدان	۳٥ درجه و ۱۲ دقیقه	٤۸ درجه و ٤۳ دقیقه	۱٦۷۹/۷	۱۱/۱	۳۲۷	٥۳	نیمه‌خشک
کرمان	۳۰ درجه و ۱٥ دقیقه	٥٦ درجه و ٥۸ دقیقه	۱۷٥٤	۱٥/۸	۱٥۲	۳۳	خشک
یزد	۳۱ درجه و ٥٤ دقیقه	٥٤ درجه و ۱۷ دقیقه	۱۲۳۷	۱۹/۱	٦۱	۳۲	خشک
زاهدان	۲۹ درجه و ۲۸ دقیقه	٦۰ درجه و ٥۳ دقیقه	۱۳۷۰	۱۸/٥	۸٤	۳۳	خشک
اهواز	۳۱ درجه و ۱٥ دقیقه	٤۸ درجه و ۳۳ دقیقه	۱۲	۲٥/۳	۲۲۷	٤۳	گرم و نیمه‌خشک
بوشهر	۲۸ درجه و ٥۹ دقیقه	٥۰ درجه و ٥۰ دقیقه	۱۹/٦	۲۱/۱	۲۷۸	٦٥	گرم و نیمه‌خشک
بندرعباس	۲۷ درجه و ۱۳ دقیقه	٥٦ درجه و ۲۲ دقیقه	۱۰	۲٦/۹	۱۸۲	٦٦	گرم و نیمه‌خشک

جدول ۲- رابطه‌های ریاضی و علایم اختصاری معادله‌های تجربی برآورد ET_o.

معادله	نماد اختصاری	روابط ریاضی برآورد ET_o
فائو پنمن- مانتیث	FPM	$FPM = \frac{۰/٤۰۸\,\Delta(R_n - G) + \gamma\left(۹۰۰/(T+۲۷۳)\right)U_۲(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(۱+۰/۳٤\,U_۲)}$
ترنت‌وایت	Th	$Th = ۱٦N_m\left(\frac{۱۰T_m}{I}\right)^a$
هارگریوز- سامانی	HS	$HS = ۰/۰۰۲۳\frac{R_a}{\lambda}\left(T_{mean} + ۱۷/۸\right)\sqrt{T_{\max} - T_{\min}}$
پریستلی- تیلور	PT	$PT = \frac{a}{\lambda}\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\left(R_n - G\right)$
مک‌کینک	MK	$MK = ۰/٦۱\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\frac{R_s}{\lambda} - ۰/۱۲$
تورک	T	$T = a_T ۰/۰۱۳\frac{T_{mean}}{T_{mean}+۱۵} + \frac{۲۳/۸۸۵٦R_s + ۵۰}{\lambda}$ $RH \geq ۵۰ \rightarrow a_T = ۱$ $RH < ۵۰ \rightarrow a_T = ۱ + \frac{۵۰ - RH}{۷۰}$

پارامترهای به‌کار رفته در جدول ۲ به‌شرح زیر می‌باشند:

T_{min}: دمای حداقل روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{max}: دمای حداکثر روزانه (درجه سانتی‌گراد)، T_{mean}: میانگین دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد)، N_m: 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: شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa\ C^{-1}$)، R_n: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، G: چگالی شار گرمای خاک ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، R_s: تابش خورشیدی روزانه ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، R_a: تابش برون‌زمینی ($MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$)، ضریب α برابر ۱/۲٦، γ: ضریب سایکرومتری رطوبتی ($kPa\ C^{-1}$)، $U_۲$: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، e_s: فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، e_a: فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال)، e_{sTmin}: فشار بخار اشباع در دمای حداقل روزانه (کیلوپاسکال)، e_{sTmax}: فشار بخار اشباع در دمای حداکثر روزانه (کیلوپاسکال) و RH: متوسط رطوبت نسبی روزانه (درصد) (لاندراس و همکاران، ۲۰۰۸).

در معادله‌های تجربی جدول ۲ مقادیر تابش خورشیدی از رابطه انگستروم- پرسکات با ضرایب تجربی a برابر با ۰/۲۵ و b برابر با ۰/۵۰ (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) محاسبه شده‌اند. معادله‌های تخمینی

FPM_{Rsest}، T_{Rsest}، MK_{Rsest} و PT_{Rsest} به‌ترتیب شکل‌های تغییریافته معادله‌های تجربی FPM، T، MK و PT می‌باشند که در آن‌ها، مقادیر تابش‌خورشیدی براساس پارامترهای دمایی از طریق رابطه ۱ برآورد شده‌اند.

$$R_{sest} = ۰/۱۶ R_a \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} \quad (۱)$$

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 ۳ به‌جای رابطه ۲ برآورد می‌شود.

$$e_a = \frac{RH}{۱۰۰}\left[\frac{e_s(T_{\min}) + e_s(T_{\max})}{۲}\right] \quad (۲)$$

$$e_a = ۰/۶۱۱ \exp\frac{۱۷/۲۷ T_{\min}}{T_{\min} + ۲۳۷/۳} \quad (۳)$$

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 HS، T، PT، Th و MK و معادله‌های تخمینی PT_{Rsest}، T_{Rsest}، MK_{Rsest}، FPM_{Rsest} و $FPM_{RsRHest}$ براساس پارامترهای هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه ET_o، در ۳ گروه تقسیم‌بندی شده‌اند. معادله‌های گروه نخست، مبتنی بر پارامترهای دما و یا رطوبت نسبی می‌باشند و شامل معادله‌های Th، PT_{Rsest}، T_{Rsest}، MK_{Rsest} و HS می‌باشند. در گروه دوم معادله‌های PT، MK و T قرار دارند که برای محاسبه ET_o، 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_o در جدول ۳ آورده شده است.

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

و سپس مقادیر ET_o با استفاده از معادله‌های تجربی FPM، HS، T، PT، Th و MK و تخمینی PT_{Rsest}، MK_{Rsest}، T_{Rsest}، FPM_{Rsest} و $FPM_{RsRHest}$ 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 ۲۰۰۷-۱۹۹۰ به ۲ دوره واسنجی (۲۰۰۳-۱۹۹۰) و دوره صحت‌سنجی (۲۰۰۷-۲۰۰٤) 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 ۱۱ ماه (ایستگاه بوشهر) تا ۲ ماه (ایستگاه رشت)، از مجموع ۲۱٦ ماه در نوسان می‌باشد.

جدول ۳- تقسیم‌بندی معادله‌های مختلف براساس پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه ET_o.

گروه	نام اختصاری معادله‌ها	پارامترهای هواشناسی مورد نیاز
معادله‌های مبتنی بر پارامترهای دما و یا رطوبت نسبی (گروه اول)	Th	$T_{mean,max,min}$
	PT_{Rsest}	$T_{mean,max,min}$
	MK_{Rsest}	$T_{mean,max,min}$
	HS	$T_{mean,max,min}$
	T_{Rsest}	$T_{mean,max,min}$, RH
معادله‌های مبتنی بر پارامتر تابش خورشیدی (گروه دوم)	PT	$T_{mean,max,min}$, R_s
	MK	$T_{mean,max,min}$, R_s
	T	$T_{mean,max,min}$, R_s, RH
معادله‌های مبتنی بر روش FPM (گروه سوم)	FPM_{Rsest}	$T_{mean,max,min}$, $u_۲$, RH
	$FPM_{RsRHest}$	$T_{mean,max,min}$, $u_۲$

برای واسنجی معادله‌های مختلف برآورد ET_o، به کمک آمار سال‌های ۲۰۰۳-۱۹۹۰ با مرجع قرار دادن معادله FPM به‌عنوان روش استاندارد، از رابطه ٤ استفاده گردید.

$$FPM = a + b\, ET_{Model} \qquad (٤)$$

در این رابطه، E_{Model} مقدار ET_o محاسبه شده از معادله‌های مختلف و ضرایب a و b به‌ترتیب عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون می‌باشند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸).

معیارهای ارزیابی نتایج: با توجه به آن‌که استفاده از آماره‌های مختلف می‌تواند منجر به انتخاب معادله‌های متفاوتی به‌عنوان معادله‌های مناسب گردد، در این پژوهش مقادیر ET_o 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 خطا (RMSE)[2]، میانگین قدرمطلق 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 (الشوربگی و همکاران، ۲۰۰۹).

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

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

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

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

$$IPE = \left\{0.25\left[\left(\frac{RMSE_{ij}}{\max RMSE_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{MARE_{ij}}{\max MARE_{ij}}\right)^2 + \left(\frac{MBE_{ij}}{\max|MBE_{ij}|}\right)^2 + \left(\frac{R^2_{ij} - 1.0}{\sqrt{\max R^2_{ij}}}\right)^2\right]\right\}^{1/2} \quad (9)$$

در رابطه‌های ۵ تا ۸ پارامتر O_i مقادیر معادله FPM به‌عنوان روش استاندارد (مشاهداتی) و P_i مقادیر برآوردی از معادله‌های مختلف و $\overline{O_i}$ و $\overline{P_i}$ نیز به‌ترتیب میانگین مقادیر مشاهداتی و برآوردی 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 (۲۰۰۸) با محاسبه مقادیر RMSE برای معادله‌های واسنجی‌شده ($RMSE_{ET_oCalibrated}$) و معادله‌های واسنجی‌نشده ($RMSE_{ET_onotCalibrated}$)، از رابطه ۱۰ برای تعیین میزان تأثیر عمل واسنجی بر مقدار خطا استفاده نمودند که براساس آن، مقادیر مثبت RaRMSE[1] نشان‌دهنده بهبود عملکرد و کاهش مقدار خطا و مقادیر منفی آن نشان‌دهنده افزایش مقدار خطا در اثر واسنجی است.

$$RaRMSE = 1 - \frac{RMSE_{ET_oCalibrated}}{RMSE_{ET_onotCalibrated}} \qquad (10)$$

در این پژوهش، براساس مفاهیم رابطه ۱۰ و با توجه به آماره IPE، آماره RaIPE به‌صورت رابطه ۱۱، تعریف و معیار سنجش میزان تأثیر عمل واسنجی بر افزایش یا کاهش دقت معادله‌های برآورد ET_o قرار گرفت.

$$RaIPE = 1 - \frac{IPE_{ET_oCalibrated}}{IPE_{ET_onotCalibrated}} \qquad (11)$$

در گام نهایی با توجه به مقادیر آماره IPE معادله‌های تجربی و تخمینی واسنجی‌شده در دوره ۲۰۰۷-۲۰۰٤ و در نظر گرفتن اثر واسنجی بر مقدار خطا، 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 ۲۰۰۳-۱۹۹۰: همان‌گونه که بیان شد، با استفاده از آمار پارامترهای هواشناسی در دوره ۲۰۰۳-۱۹۹۰، مقادیر ET_o برای هر یک از معادله‌های تجربی و تخمینی محاسبه گردید. سپس با استفاده از رابطه ٤، ضرایب رگرسیون خطی برای واسنجی معادله‌های مختلف در ایستگاه‌های مورد بررسی به‌دست آمد که نتایج ضرایب رگرسیون خطی معادله‌های مختلف در جدول ٤ ارایه شده است.

1- Root Mean Square Error Ratio

جدول ٤- ضرایب رگرسیون خطی معادلات مختلف برآورد ET_o در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	ضرایب واسنجی	معادله‌های گروه اول					معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه سوم	
		Th	HS	PT_{Rsest}	MK_{Rsest}	T_{Rsest}	PT	MK	T	FPM_{Rsest}	$FPM_{RsRHest}$
بندرانزلی	a	۰/٦۹	۱/۳۱	۱/۲۲	۱/۸۸	۳/٦۷	۰/۷۹	۱/۱۳	۲/۳٥	۱/٤٥	۱/٥۸
	b	۰/٦٥	-۰/٤۱	-۰/۲۳	-۰/٤۹	-۰/٥۸	۰/۱٦	-۰/۰٦	-۰/۱٤	-۰/٤۰	-۰/٥٤
	R^2	۰/۹۳۳	۰/۹۷٤	۰/۹٦۷	۰/۹٦۳	۰/۹٥٥	۰/۹۸۹	۰/۹۸۸	۰/۹۸۳	۰/۹۸۳	۰/۹۷٥
رشت	a	۰/٤٤	۰/۸۸	۱/۲٦	۰/۸٦	۲/٥۱	۰/۸۲	۱/۱٦	۲/۳٥	۱/۰٤	۱/۰۹
	b	۰/۸۰	-/۳۰	-۰/۰۲	-۰/٤۲	-۰/۳۷	۰/۱۰	-۰/۱۱	-۰/۱٤	-۰/۱۲	-۰/۲٤
	R^2	۰/۹۱۱	۰/۹۸٥	۰/۹۷۸	۰/۹۷۷	۰/۹٦۷	۰/۹۹٥	۰/۹۹۳	۰/۹۸۳	۰/۹۸۸	۰/۹۸۸
نوشهر	a	۰/٦۱	۱/۰۱	۰/۹۱	۱/٤٦	۲/۸٥	۰/۷۸	۱/۱۷	۲/۳۸	۱/۱٦	۱/۱۹
	b	۰/۷۹	-۰/۲۹	۰/۰٦	-۰/٤۲	-۰/٤۰	۰/۲۱	-۰/۱۷	-۰/۲۰	-۰/۱۷	-۰/۲٦
	R^2	۰/۸۸۹	۰/۹۷۳	۰/۹۷٤	۰/۹٥۹	۰/۹۹۱	۰/۹۸٦	۰/۹۸۲	۰/۹۸۲	۰/۹۹۰	۰/۹۸٥
مشهد	a	۱/۰٤	۱/۱۳	۱/۲۷	۱/٦۱	۲/٥۱	۱/۲۱	۱/٤٦	۲/۳۰	۱/۰٤	۱/۲٦
	b	۱/۰٥	-۰/٤٥	-۰/۰٥	-۰/۸۲	۰/۱٥	۰/۰٦	-۰/٤٥	۰/۳٦	-۰/۱۰	-۰/۳٤
	R^2	۰/۹٦۱	۰/۹۷۳	۰/۹۲٤	۰/۹٥۹	۰/۹٦۰	۰/۹٥۱	۰/۹۷٤	۰/۹٦۱	۰/۹۹۷	۰/۹۸۷
تبریز	a	۱/٤۹	۱/۲۰	۱/۳۸	۱/٦۳	۲/٦۸	۱/۲۷	۱/٥٤	۲/٤۱	۱/۰٥	۱/۳۳
	b	۱/۱۸	-۰/۰۳	-۰/۰۲	-۰/۲۸	۰/٥۳	۰/۰۹	-۰/٤٥	۰/٦۰	-۰/۰۹	-۰/۱٥
	R^2	۰/۹٥٦	۰/۹٦۷	۰/۹۲٦	۰/۹۳۹	۰/۹۷۱	۰/۹٤۹	۰/۹۷٥	۰/۹۷۷	۰/۹۹۹	۰/۹۸٥
همدان	a	۱/۱۸	۰/۹۸	۱/۱٦	۱/۳۳	۱/۹۸	۱/۳۱	۱/٥۲	۲/۲۲	۰/۹٥	۱/۱۰
	b	۱/۱۸	-۰/۰۸	۰/۰٦	-۰/٤۹	۰/۸۱	-۰/۰۳	-۰/٤۷	۰/۸۲	۰/۰۲	-۰/۱۷
	R^2	۰/۹٦٦	۹۸٥	۰/۹۳۳	۰/۹۷۳	۰/۹۷۳	۰/۹٤٥	۰/۹۷۸	۰/۹۷۲	۰/۹۹۹	۰/۹۹۲
کرمان	a	۰/۹٦	۱/۰۱	۱/۲۸	۱/٤۷	۱/۸٤	۱/۳٦	۱/٥۳	۱/۹۲	۰/۹۸	۱/۱۳
	b	۱/۹٥	-۰/۱٤	۰/۲۱	-۰/۸٤	۰/٦٥	۰/۱٦	-۰/٦٦	۰/۷۲	۰/۰۰	-۰/۰۷
	R^2	۰/۹۱۲	۰/۹٥۱	۰/۹٥٦	۰/۹٤۹	۰/۹۲٤	۰/۹۷۰	۰/۹٥۳	۰/۹۲٤	۰/۹۹۹	۰/۹۸۷
یزد	a	۰/٦۷	۱/۰۹	۱/٤۲	۱/٦۸	۲/۰۹	۱/۳٦	۱/۰٤	۱/۹۲	۱/۰۳	۱/۲٤
	b	۲/۳۰	-۰/۰۸	۰/۳٦	-۰/۸۰	۰/٤۰	۰/٤۲	-۰/٥٦	۰/٥٦	-۰/۰۸	-۰/۰٦
	R^2	۰/۸۸٥	۰/۹٤۱	۰/۸۹۲	۰/۹۳۲	۰/۹۳۳	۰/۹۱۷	۰/۹٤۸	۰/۹۳٦	۰/۹۹۸	۰/۹۷٥
زاهدان	a	۰/۸۱	۱/۰۱	۱/۳۰	۱/٥۱	۱/۹۰	۱/۳۳	۱/٥٥	۱/۹۳	۱/۰۰	۱/۱۸
	b	۲/٤۹	۰/۳۰	۰/٦٦	-۰/۳٥	۰/۸۹	۰/٦۱	-۰/٤۲	۰/۸۷	-۰/۰۱	۰/۰٦
	R^2	۰/۹۰۷	۰/۹۲۱	۰/۹۲۲	۰/۹۱۲	۰/۹۰۰	۰/۹٤۰	۰/۹۳۷	۰/۹۱۷	۰/۹۹۸	۰/۹۷۰
اهواز	a	۰/۳۳	۱/۱۱	۱/٦۲	۱/۸٥	۲/٥۸	۱/٦٦	۱/۹٥	۲/٦۹	۰/۹۹	۱/۲۰
	b	۲/٦۹	-۰/٤۳	-۰/٤۹	-۱/۰۸	-۰/۱۲	-۰/٦٥	-۱/٤۸	-۰/۳٤	۰/۰۷	-۰/۱٤
	R^2	۰/۸٥٥	۰/۹٦۲	۰/۹٤٤	۰/۹٥٦	۰/۹٥٤	۰/۹٤۱	۰/۹٤۹	۰/۹٥٤	۰/۹۹۸	۰/۹۸۷
بوشهر	a	۰/۳۸	۱/۲۱	۱/۲۸	۱/۹٥	٤/۱۸	۰/۹۹	۱/٥۱	۳/۲۷	۱/۱٤	۱/٤۰
	b	۲/٤٥	-۰/٤۸	-۰/۰٥	-۰/۹۸	-۱/٤٤	۰/۳۹	-۰/٦۳	-۰/۹۹	-۰/۱٦	-۰/٥٦
	R^2	۰/۸۳۹	۰/۹۳۹	۰/۹٤۱	۰/۹۲۷	۰/۹۲۸	۰/۹۳۲	۰/۹۳۸	۰/۹٤۱	۰/۹۷۸	۰/۹٦۹
بندرعباس	a	۰/۲۷	۱/۱۷	۱/۱٤	۱/۸٥	٤/۰۹	۰/۸۹	۱/٥۲	۳/۳٥	۱/۱۸	۱/۳۲
	b	۲/۸۱	-۰/٤٤	۰/۳٥	-۰/۸۲	-۱/٤۸	۰/٦۷	-۰/۸۲	-۱/۲۹	-۰/۲۷	-۰/۳۷
	R^2	۰/۸٥۳	۰/۸۹۲	۰/۹۱۰	۰/۸۳۲	۰/۸٥٤	۰/۹٤۲	۰/۹٥۹	۰/۹٦۳	۰/۹۷۰	۰/۹۳۹

نتایج ارزیابی معادله‌های ET_o واسنجی‌شده در دوره صحت‌سنجی ۲۰۰۷-۲۰۰٤: در ادامه با استفاده از ضرایب رگرسیون خطی محاسبه شده برای معادله‌های مختلف (جدول ٤) و رابطه ٤، مقادیر ET_o واسنجی‌شده برای هر یک از معادله‌های تجربی و تخمینی در دوره ۲۰۰۷-۲۰۰٤ محاسبه گردید. انتخاب معادله مناسب در هر ایستگاه از میان معادله‌های مختلف هر گروه با توجه به این‌که کدام‌یک از آماره‌های ارزیابی ملاک قضاوت واقع شود، می‌تواند منجر به نتایج متفاوتی گردد. به‌عنوان نمونه در ایستگاه رشت (جدول ٥) از میان معادله‌های گروه اول براساس آماره RMSE، معادله PT_{Rsest}، براساس آماره‌های MBE، MARE و IPE معادله MK_{Rsest} و براساس آماره R، معادله HS و از میان معادله‌های گروه دوم براساس تمامی آماره‌ها معادله واسنجی‌شده MK به‌عنوان 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 به‌ترتیب معادله‌های واسنجی‌شده MK_{Rsest} و MK به‌عنوان معادله‌های مناسب انتخاب می‌گردند. ضمن آن‌که در گروه سوم براساس آماره‌های مختلف (به‌جز MBE) معادله واسنجی‌شده FPM_{Rsest} انتخاب می‌شود. نتایج مقادیر آماره IPE برای معادله‌های مختلف واسنجی‌شده برای برآورد ET_o در ایستگاه‌های مورد بررسی در دوره صحت‌سنجی در جدول ٦ آورده شده است.

جدول ٥- نتایج ارزیابی معادله‌های مختلف واسنجی‌شده در ایستگاه رشت در گروه‌های سه‌گانه براساس آماره‌های مختلف ارزیابی.

آماره	معادله‌های گروه اول					معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه سوم	
ارزیابی	Th	HS	PT_{Rsest}	MK_{Rsest}	T_{Rsest}	PT	MK	T	FPM_{Rsest}	$FPM_{RsRHest}$
RMSE	۱/٤٥۹	۰/٥۸۷	۰/٤۲۷	۰/٤۹٤	۱/٥۸۸	۰/٤٥۳	۰/۳٦۳	۱/٥٥٥	۰/۱٦۳	۰/۲۲٦
MBE	-۰/٥۹۰	-۰/٥٤۱	-۰/۲۹۸	۰/۲٤۹	۱/۳۲٤	-۰/۳۱٥	۰/۲۷۱	۱/۳۲۹	۰/۰۱٤	-۰/۰۱۰
MARE	۰/٤۲۱	۰/۲۹۱	۰/۱٦۰	۰/۱۱۱	۰/٥۱۸	۰/۱٤۳	۰/۱۰٦	۰/٥۳٥	۰/۰٤۳	۰/۰۸۷
R^2	۰/۸٤۲	۰/۹۷٥	۰/۹٦٥	۰/۹٦٥	۰/۹٤٥	۰/۹۸۹	۰/۹۹۳	۰/۹٦٦	۰/۹۹۱	۰/۹۸٦
IPE	۰/۳۰۳	۰/۱۹۹	۰/۱۱۳	۰/۰۸٦	۰/۳۸۷	۰/۱۰٤	۰/۰۸۰	۰/۳۹٤	۰/۰۳۰	۰/۰٥۷

جدول ٦- نتایج معادله‌های مختلف واسنجی‌شده در ایستگاه‌های مورد بررسی براساس آماره IPE.

ایستگاه	معادله‌های گروه اول					معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه سوم	
	Th	HS	PT_{Rsest}	MK_{Rsest}	T_{Rsest}	PT	MK	T	FPM_{Rsest}	$FPM_{RsRHest}$
بندرانزلی	۰/۰۸٦	۰/۰۵۳	۰/۰۸۳	۰/۰٦۷	۰/۰۷۷	۰/۰٤۹	۰/۰۳۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	۰/۰۵۷
رشت	۰/۳۰۳	۰/۱۹۹	۰/۱۱۳	۰/۰۸٦	۰/۳۸۷	۰/۱۰٤	۰/۰۸۰	۰/۳۹٤	۰/۰۳۰	۰/۰۵۷
نوشهر	۰/۰۸۲	۰/۰٤۱	۰/۰۷۰	۰/۰۵۰	۰/۰٦۲	۰/۰۵۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۹	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲
مشهد	۰/٦۰۲	۰/۰٦۰	۰/۰۹۱	۰/۰۹٦	۰/۰۸۲	۰/۰۷۸	۰/۰۸۵	۰/۰۹۸	۰/۰٤۸	۰/۰٦۱
تبریز	۰/۳۱۷	۰/۱۳۲	۰/۱٤۷	۰/۲۰۲	۰/۱۸۸	۰/۲۰٦	۰/۲۹۰	۰/۳۵۰	۰/۱۲٤	۰/۱۵۲
همدان	۰/۱۹۵	۰/۲۰۳	۰/۲٦٤۵	۰/۲۱٦	۰/۲٦۱	۰/۲٦۵	۰/۲٤۵	۰/۲۷۵	۰/۰۸۵	۰/۱۳۹
کرمان	۰/۱۱۹	۰/۰۵۸	۰/۰٤۹	۰/۰۵۷	۰/۰۸٦	۰/۰۵۲	۰/۰٦٦	۰/۰۹٦	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳
یزد	۰/۱۳۱	۰/۰۳۷	۰/۲۱٦	۰/۱٦٦	۰/۱۷۵	۰/۲۰٤	۰/۱۵۲	۰/۱۷۹	۰/۰۷۰	۰/۱۱۲
زاهدان	۰/۰۸۳	۰/۰۵۵	۰/۰٦۹	۰/۰۵۹	۰/۰۸۷	۰/۰٦۵	۰/۰٦۲	۰/۰۸۷	۰/۰۰۸	۰/۰۳۳
اهواز	۰/۱۷۵	۰/۰۹٤	۰/۱۰٦	۰/۱۱۱	۰/۰۹٤	۰/۰۸۹	۰/۰۸۳	۰/۰۷۹	۰/۰۱٤	۰/۰۵۷
بوشهر	۰/۱٤۷	۰/۳۷٦	۰/۲۸۰	۰/٤۱٤	۰/۳۹۰	۰/۰٤۹	۰/۰٦۲	۰/۰٦٤	۰/۱۳٤	۰/۲۹۰
بندرعباس	۰/۲۰۱	۰/۲۰٦	۰/۲٤۷	۰/۲۲۲	۰/۲۱۸	۰/۲۸۹	۰/۲۷٤	۰/۲۷۱	۰/۰۹٤	۰/۰٦۷

ارزیابی میزان تأثیر عمل واسنجی بر عملکرد معادله‌های مختلف: همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها بیان گردید با محاسبه مقادیر IPE برای معادله‌های واسنجی‌شده ($IPE_{(ETO\ Calibrated)}$) و معادله‌های بدون عمل واسنجی ($IPE_{(ETO\ not\ Calibrated)}$) در دوره صحت‌سنجی 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 خطا 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 خطا همراه گردیدند. در ایستگاه‌های رشت و همدان نیز بیش‌تر معادله‌ها با افزایش خطا 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 خطا در بیش‌تر معادله‌های تجربی و تخمینی و در بیش‌تر ایستگاه‌ها شده است اما با توجه به‌وجود معادله‌های با RaIPE منفی، معادله‌های یاد شده نیازمند برازش روابطی غیرخطی برای واسنجی می‌باشند.

جدول ۷- نتایج مقدار RaIPE برای معادله‌های مختلف برآورد ET_o در گروه‌های سه‌گانه در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	معادله‌های گروه اول					معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه سوم	
	Th	HS	PT_{Rsest}	MK_{Rsest}	T_{Rsest}	PT	MK	T	FPM_{Rsest}	$FPM_{RsRHest}$
بندرانزلی	۵۵/۹۸	۲۷/۵٤	۸/۷۹	۷۱/۷۳	۸۳/۵٦	٦۲/٤۳	۵٤/۲۳	۹۰/۱۱	٦٦/۱۷	۵۷/٦۱
رشت	۰/۷۸	۱/۰۲	-۱/۳۳	-۱/۹٤	۱/۱۸	-۰/٤۵	۰/۵۱	۱/٤٦	-۱/۸۱	-۰/۵٤
نوشهر	٦۱/۹۸	٤۵/٦۰	۵/۳٦	٦۵/۵۳	۸۵/٤۵	۵٦/۲۵	۵٦/۲۱	۹۰/۲۲	۵۹/۲٤	۳۸/٤٤
مشهد	-۸۸/٦۷	۱۷/۹۹	۵۰/۸۳	٤۸/۱٦	۸۳/۹٤	٤۹/۵۱	٤۳/۹۸	۸۰/۰٤	-۱۲۲/٦۷	٤٦/٦٦
تبریز	۳٦/۷۸	-٦/۵۲	۳٤/٦۱	۲۰/۹٤	٦۷/۹۲	۳٤/۸۳	۲۹/۳۳	٤۵/۵۷	-٤۸/۰۱	-۸/۲۹
همدان	٤۹/۲۷	-۷۸/۹۸	-۱۵۱/۱۲	-۱۱۱/٦۲	٤۹/٤۲	-۱۱٦/۱۳	-۸۰/۰۵	٤۹/۲٤	-۱٦۳/۷۷	-۱۸۳/۱۷
کرمان	۷۱/۲۱	۱۸/۳۱	۷٦/۵٦	٦۳/۰۸	۸۲/۱۵	۸۰/۲٤	٦۵/۷۲	۸۱/۰۱	۵۵/۲۵	۷۲/۵٦
یزد	٦۳/۵۳	۵٦/٦٦	٤۲/۵۸	٤۷/۷۳	٦۹/۱۵	٤۲/۵۵	٤٤/۸۳	٦۷/۱٦	-۳٤٤/۵۰	٤۱/۷۷
زاهدان	۸۰/۸۰	٤۱/۰۹	۸۱/۹۰	۸۰/٤٦	۸٤/۷٤	۸۳/۰٤	۸۰/۰۸	۸٤/۸۷	-۱۱/۵۰	۸۱/۰۸
اهواز	۷۸/۹۵	-۱۲/۲۸	٦٦/۷٦	٦٦/۱۰	۸٤/٦۰	۷۲/۸۱	۷٤/۹۲	۸۷/۱۲	۳/۲۸	۵۲/۷٤
بوشهر	٦۳/۸٦	-۹۱/۹۰	۰/۵۱	۵/۸٦	٤٤/۱۹	۵۳/۲٤	۷۵/۲۹	۸۹/۵۹	-٤/۹۷	-۱۰/٦۹
بندرعباس	٦۸/۲۰	-۵۲/۸۸	۳/۳٦	٤٦/٤۸	٦۹/۲۷	-۱۰۳/٦۲	۷/۷٤	۵۸/۹٦	-۱۱/۸٤	٦۷/۳۷

با توجه به نتایج جدول ٦ و در نظر گرفتن تأثیر واسنجی بر عملکرد معادله‌ها (جدول ۷)، نتایج معادله‌های مختلف در دوره صحت‌سنجی براساس آماره IPE در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۸ ارایه شده است. در جدول ذکر شده برای معادله‌هایی که عمل واسنجی سبب افزایش خطای آن‌ها شده بود (معادله‌ها با RaIPE منفی در جدول ۷)، مقدار IPE معادله واسنجی‌نشده در دوره صحت‌سنجی 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_{Rsest} 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 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_{Rsest} با تخمین تنها یک پارامتر تابش خورشیدی است. به‌عبارت دیگر انتظار می‌رود در صورتی‌که پارامترهای بیش‌تری به‌صورت تخمینی (به‌جای اندازه‌گیری مستقیم) وارد معادله شوند، دقت مدل هم کاهش یابد.

جدول ۸- نتایج معادله‌های مختلف با اعمال اثر واسنجی در دوره صحت‌سنجی براساس آماره IPE در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	معادله‌های گروه اول					معادله‌های گروه دوم			معادله‌های گروه سوم	
	Th	HS	PT_{Rsest}	MK_{Rsest}	T_{Rsest}	PT	MK	T	FPM_{Rsest}	$FPM_{RsRHest}$
بندرانزلی	۰/۰۸٦	۰/۰۵۳	۰/۰۸۳	۰/۰٦۷	۰/۰۷۷	۰/۰٤۹	۰/۰۳۰	۰/۰۳۹	۰/۰۳۸	۰/۰۵۷
رشت	۰/۳۰۳	۰/۱۹۹	۰/۱۱۱*	۰/۰۸۵*	۰/۳۸۷	۰/۱۰۳*	۰/۰۸۰	۰/۳۹٤	۰/۰۲۹*	۰/۰۵٦*
نوشهر	۰/۰۸۲	۰/۰٤۱	۰/۰۷۰	۰/۰۵۰	۰/۰٦۲	۰/۰۵۳	۰/۰۳۲	۰/۰۳۹	۰/۰۱۹	۰/۰۳۲
مشهد	۰/۳۱۹	۰/۰٦۰	۰/۰۹۱	۰/۰۹٦	۰/۰۸۲*	۰/۰۷۸	۰/۰۸۵	۰/۰۹۸	۰/۰۲۲*	۰/۰٦۱
تبریز	۰/۳۱۷	۰/۱۲٤*	۰/۱٤۷	۰/۲۰۲	۰/۱۸۸	۰/۲۰٦	۰/۲۹۰	۰/۳۵۰	۰/۰۸٤*	۰/۱٤۰*
همدان	۰/۱۹۵	۰/۱۱۳*	۰/۱۰۵*	۰/۱۰۲*	۰/۲٦۱	۰/۱۲۳*	۰/۱۳٦*	۰/۲۷۵	۰/۰۳۲*	۰/۰٤۹*
کرمان	۰/۱۱۹	۰/۰۵۸	۰/۰٤۹	۰/۰۵۷	۰/۰۸٦	۰/۰۵۲	۰/۰٦٦	۰/۰۹٦	۰/۰۰۸	۰/۰۲۳
یزد	۰/۱۳۱	۰/۰۳۷	۰/۲۱٦	۰/۱٦٦	۰/۱۷۵	۰/۲۰٤	۰/۱۵۲	۰/۱۷۹	۰/۰۱٦*	۰/۱۱۲
زاهدان	۰/۰۸۳	۰/۰۵۵	۰/۰٦۹	۰/۰۵۹	۰/۰۸۷	۰/۰٦۵	۰/۰٦۲	۰/۰۸۷	۰/۰۰۷*	۰/۰۳۳
اهواز	۰/۱۷۵	۰/۰۸۳*	۰/۱۰٦	۰/۱۱۱	۰/۰۹٤	۰/۰۸۹	۰/۰۸۳	۰/۰۷۹	۰/۰۱٤	۰/۰۵۷
بوشهر	۰/۱٤۷	۰/۱۹٦*	۰/۲۸۰	۰/٤۱٤	۰/۳۹۰	۰/۰٤۹	۰/۰٦۲	۰/۰٦٤	۰/۱۲۷*	۰/۲٦۲*
بندرعباس	۰/۲۰۱	۰/۱۳۵*	۰/۲٤۷	۰/۲۲۲	۰/۲۱۸	۰/۱٤۲*	۰/۲۷٤	۰/۲۷۱	۰/۰۸٤*	۰/۰٦۷

* بیانگر استفاده از مقدار IPE معادله واسنجی‌نشده 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 به‌جز برای معادله HS صادق است و معادله‌های تجربی T، MK و PT از دقت بالاتری نسبت به معادله‌های تخمینی T_{Rsest}، MK_{Rsest} و PT_{Rsest} برخوردارند. در ایستگاه رشت معادله‌های گروه دوم به‌جز معادله T دارای دقت بیش‌تری نسبت به معادله‌های گروه اول (مبتنی بر دما و یا رطوبت نسبی) می‌باشند و نتیجه بهترین معادله در گروه دوم (MK) نسبت به بهترین معادله در گروه اول (MK_{Rsest}) 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 به‌جای تابش خورشیدی، تابش برون‌زمینی دخالت دارد یا مقدار آن به کمک پارامترهای دمایی برآورد می‌گردد، در حالی‌که در نواحی مرطوب 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 مرطوب از میان معادله‌های گروه دوم، معادله واسنجی‌شده MK در هر ۳ ایستگاه دارای کم‌ترین مقدار IPE در مقایسه با سایر معادله‌ها می‌باشد. در این ناحیه

نتایج بهترین معادله برآورد ET_o در ایستگاه رشت با دو ایستگاه نوشهر و بندرانزلی در گروه اول تفاوت دارد به‌طوری‌که در ایستگاه‌های بندرانزلی و نوشهر معادله واسنجی‌شده HS و در ایستگاه رشت معادله واسنجی‌نشده MK_{Rsest} دارای بیش‌ترین دقت می‌باشند. این موضوع در شرایطی است که در ایستگاه‌های بندرانزلی و نوشهر معادله MK_{Rsest} بعد از معادله HS در رتبه دوم قرار دارد. هم‌چنین در این ناحیه معادله Th با بیش‌ترین مقدار IPE دارای ضعیف‌ترین برآورد (به‌جز رشت) می‌باشد. به‌نظر می‌رسد مقدار فاصله از دریا (منبع اصلی تامین رطوبت) روی این موضوع مؤثر باشد. زیرا فاصله رشت از دریا حدود ۵۰ کیلومتر بوده و تقریباً ۷۰ متر بالاتر از سطح دریای خزر قرار دارد، در حالی‌که شهرهای بندرانزلی و نوشهر در کنار دریا و تقریباً هم‌تراز سطح آب دریای خزر واقع شده‌اند.

در ۳ 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 T_{Rsest}، MK_{Rsest} و PT_{Rsest} نسبت به معادله‌های تجربی T، MK و PT دارای خطای کم‌تری می‌باشند که این موضوع نشان‌دهنده نقش بیش‌تر پارامترهای دمایی در برآورد ET_o این ناحیه می‌باشد. در هر ۳ ایستگاه مشهد، تبریز و همدان واقع در ناحیه نیمه‌خشک از میان معادله‌های گروه دوم، معادله PT به‌عنوان مناسب‌ترین معادله برآورد ET_o انتخاب شده است و از میان معادله‌های گروه اول در ایستگاه‌های تبریز و مشهد معادله HS و در ایستگاه همدان معادله واسنجی‌شده MK_{Rsest} از دقت بالاتری نسبت به سایر معادله‌ها برخوردارند.

در ایستگاه‌های یزد و زاهدان واقع در نواحی خشک (به‌جز 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_o این نواحی می‌باشد. ایستگاه کرمان با ارتفاع ۱۷۵٤ متر در رقوم ارتفاعی بالاتری نسبت به دو ایستگاه دیگر قرار دارد و با مقدار بارش متوسط سالانه ۱۵۲ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۵/۸ درجه سانتی‌گراد (جدول ۱) 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 (به‌جز 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 T_{Rsest}، MK_{Rsest} و PT_{Rsest} 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_o در این ناحیه می‌باشد. در ایستگاه‌های اهواز و بندرعباس در گروه اول معادله واسنجی‌شده 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 واسنجی‌شده HS و MK به‌ترتیب با مقادیر IPE برابر با ۰/۰۵۳ و ۰/۰۳۰ از دقت بالاتری برخوردارند این در حالی است که در گروه سوم معادله واسنجی‌شده FPM_{Rsest} 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_o در گروه اول از معادله واسنجی‌شده HS و در گروه‌های دوم و سوم از معادله واسنجی‌شده MK محاسبه می‌گردد. در ایستگاه مشهد مقدار ET_o در گروه‌های اول، دوم و سوم به‌ترتیب از معادله‌های واسنجی‌شده HS، PT و معادله واسنجی نشده FPM_{Rsest} 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_o در این ایستگاه در گروه‌های اول و دوم از معادله HS محاسبه می‌شود.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش مقدار ET_o 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_o، 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_o را برای هر ایستگاه از ابتدای تاسیس تاکنون ایجاد نمود. علاوه‌بر آن سایر نتایج این پژوهش به‌شرح زیر می‌باشند:

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
رشت	MK_{Rsest}^{*}	MK	FPM_{Rsest}^{*}
نوشهر	HS	MK	FPM_{Rsest}
مشهد	HS		FPM_{Rsest}^{*}
تبریز	HS^{*}		FPM_{Rsest}^{*}
همدان	MK_{Rsest}^{*}		FPM_{Rsest}^{*}
کرمان	PT_{Rsest}		FPM_{Rsest}
یزد	HS		FPM_{Rsest}^{*}
زاهدان	HS		FPM_{Rsest}^{*}
اهواز	HS^{*}	FPM_{Rsest}^{*}	FPM_{Rsest}^{*}
بوشهر	Th	PT	FPM_{Rsest}
بندرعباس	HS^{*}		$FPM_{RsRHest}$

اگرچه انجام عمل واسنجی سبب کاهش خطا 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 خطا 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 MBE، RMSE، MARE و R^{2} ملاک قضاوت 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_o در این نواحی می‌باشد. در ضمن ارتفاع این نواحی کم‌تر از ۵۰ متر و در بعضی از

ایستگاه‌ها منفی است. ضمن آن‌که در ایستگاه‌های واقع در نواحی خشک و نیمه‌خشک (به‌جز کرمان) این موضوع برعکس است که نشان‌دهنده اهمیت بیش‌تر پارامترهای دمایی نسبت به تابش خورشیدی و رطوبت می‌باشد. در این نواحی ارتفاع ایستگاه‌ها ۱۰۰۰ متر و بیش‌تر می‌باشد.

بررسی مقدار آماره‌های خطای معادله‌های تخمینی T_{Rsest}، MK_{Rsest} و PT_{Rsest} 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 ۱۸۳۲۸ انجام شده است، که از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد تشکر 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 Procceding 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 Procceding 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. Evaulation of different methods of reference evapotranspiration estimation and Zoning in Iran. Natural Georaphy 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. Mosaedi[1] and M. Ghabaei Sough[2]**

[1]Associate Prof., Faculty of Natural Resources and Environmental, Ferdowsi University of Mashhad, [2]Ph.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 period1990-2003. 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