نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۳، جلد۴، زمستان ۱۳۸۹، ص. ۳۲۹-۳۱۹

Iranian Journal of Irrigation and drainage
No. 3, Vol. 4, Winter 2011, p. 319-329

اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف

سعید یزدان خواه[۱] و سید مجید میر لطیفی[۲*]

چکیده

تخمین تبخیر-تعرق مرجع در مدیریت منابع آب دارای اهمیت زیادی می‌باشد. روش ترکیبی فائو-پنمن-مانتیس به عنوان یک روش استاندارد برای تخمین ET_o توصیه شده است. با این حال به دلیل نیاز این روش به داده‌های متعدد، برای تخمین ET_o از مدل‌های تجربی با داده‌های ورودی کمتر، می‌توان استفاده کرد. در این تحقیق، عملکرد پنج مدل تابشی و دمایی تخمین ET_o روزانه در نه ایستگاه با اقلیم‌های مختلف ارزیابی شد. در اقلیم مرطوب مدل‌های تابشی عملکرد خوبی داشتند، در حالی که در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک، مدل‌های دمایی عملکرد بهتری داشتند. در هر ایستگاه اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی موثر در ET_o با استفاده از روش آماری چندمتغیره تحلیل عاملی بررسی شد. در هر سه اقلیم، داده‌های دمای حداقل و دمای حداکثر بیشترین اهمیت را در تعیین ET_o داشتند. در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب متغیرهای رطوبت نسبی و تابش خورشیدی نیز دارای اهمیت بالایی در تعیین ET_o بودند، در حالی که در ایستگاه‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک تاثیر این دو متغیر کمتر بود. تاثیرمتغیر سرعت باد بر ET_o در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب بسیار ناچیز بود، در حالی‌که در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک سرعت باد تاثیر بیشتری بر روی ET_o داشت.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق مرجع، متغیرهای هواشناسی، تحلیل عاملی

مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی است و تعیین مقدار صحیح آن برای انجام مطالعات توازن هیدرولوژیکی آب، طراحی و مدیریت سیستمهای آبیاری، شبیه‌سازی میزان محصول و طراحی و مدیریت منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار است. روش معمول برای تخمین تبخیر-تعرق در هر زمان و برای هر نوع گیاه این است که ابتدا تبخیر-تعرق مرجع را برآورد نموده و سپس با استفاده از یک ضریب گیاهی تجربی مقدار تبخیر-تعرق محاسبه می‌گردد.

تبخیر-تعرق مرجع یک پدیدهٔ پیچیده است، چرا که تابعی از چندین عامل اقلیمی نظیر دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی است. برای اندازه گیری تبخیر- تعرق واقعی از لایسیمتر استفاده می‌شود، با این حال اندازه‌گیری ET_o با لایسیمتر به دلیل این که روش پرهزینه‌ای است و نیاز به دقت و تجربه زیادی دارد همواره ممکن نیست. از این رو از روش‌های غیر مستقیم تخمین ET_o که با استفاده از داده‌های اقلیمی ET_o را تخمین می‌زنند استفاده می‌شود. این روش‌ها از مدل‌های ساده تجربی تا روش‌های پیچیده ترکیبی مانند معادله پنمن-مانتیس که بر قوانین فیزیکی استوار هستند تغییر می‌کنند.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که ET_o محاسبه شده با استفاده از روش پنمن-مانتیس در اقلیم‌های مختلف به مقادیر مشاهده شده نزدیک‌ترین می‌باشد (Jensen et al., 1990)، (Allen et al. ,1998)، (Xu et al. ,2002)، (Irmak et al. ,2003)، (Itenfiso et al., 2003)، (DehghaniSanij et al. ,2004). سازمان فائو نیز استفاده از نسخه استاندارد شده معادله پنمن-مانتیس (FAO56-PM) را به عنوان روش استاندارد محاسبه ET_o توصیه کرده است (Allen et al. ,1998).

معادله FAO56-PM نیازمند داده‌های دما، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین و سرعت باد می باشد. با توجه به این که داده‌های کامل هواشناسی در تعداد معدودی از ایستگاه‌های هواشناسی اندازه‌گیری می‌شود، در مکان‌هایی که داده‌های کامل وجود ندارد نیاز به استفاده از روش‌هایی می‌باشد که با داده‌های ورودی کمتری ET_o را تخمین بزنند. در این راستا می‌توان از معادلات تجربی تابشی یا دمایی که به داده‌های ورودی کمتری نیاز دارند استفاده کرد. بر خلاف معادله پنمن-مانتیس که در شرایط اقلیمی مختلف نتایج مناسبی را به دست می‌دهد، اغلب مدل‌های ساده‌تر در برخی اقلیم‌ها عملکرد بهتری نسبت به اقلیم‌های دیگر نشان می‌دهند (Jensen et al. ,1990)، (George et al. ,2002)، (Hargreaves et al. ,2003). با توجه به این که این معادلات ساده‌تر به صورت تجربی و با استفاده از روش‌های رگرسیونی و بدون

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس
(* - نویسنده مسئول (Email: Mirlat_m@modares.ac.ir)

Archive of SID
www.SID.ir

در نظر گرفتن قوانین فیزیکی حاکم بر تبخیر–تعرق استخراج شده‌اند، عملکرد مناسب یک روش در یک اقلیم خاص را تنها از طریق تحلیل آماری مجموعه داده‌ها در آن اقلیم می‌توان توضیح داد. همچنین با توجه به برهمکنش بین متغیرهای اقلیمی، تحلیل‌های ساده همبستگی برای بررسی این موضوع ممکن است مناسب نباشد و بایستی از اصول و روش‌های آماری چند متغیره استفاده کرد (Nandagiri and Kovoor ,2006). با استفاده از روش آماری چند متغیره تحلیل عاملی(Factor Analysis) می‌توان اهمیت نسبی متغیرهای موثر در تبخیر–تعرق مرجع را بررسی کرد. تحلیل مولفه‌های اصلی و تحلیل عاملی از جمله روش‌های پرکاربرد تحلیل داده‌های چند متغیره هستند و مطالعات فراوانی برای بررسی ساز و کار فرایندهای هیدرولوژیکی مختلف با استفاده از روش تحلیل عاملی انجام گرفته است. اکثر کاربردهای تحلیل عاملی در هیدرولوژی در زمینه مطالعات مرتبط با بارندگی بوده است. بر خلاف بارندگی، در زمینه استفاده از تحلیل عاملی برای بررسی پدیده تبخیر–تعرق مطالعات اندکی انجام شده است. در مطالعه‌ای بر روی تبخیر–تعرق مرجع ماهانه در هشت ایستگاه با اقلیم‌های مختلف در هند، تحلیل عاملی برای تعیین تاثیر نسبی متغیرهای بارندگی، دمای حداقل و حداکثر، سرعت باد، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی بر روی تبخیر–تعرق استفاده شد (Mohan and Arumugam, 1996). در این تحقیق عامل‌های استخراج شده تحت دوران Varimax قرار گرفته و سپس عامل‌های دوران داده شده به عوامل فیزیکی نسبت داده شدند. نتایج تحقیق در اقلیم‌های مورد مطالعه نشان دهندهٔ اهمیت نسبی بالای متغیرهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد در تبخیر–تعرق مرجع بود، در حالی که متغیرهای بارندگی و ساعات آفتابی تاثیر کمتری در تبخیر–تعرق مرجع داشتند.

در مطالعه دیگری بر روی داده‌های چهار ایستگاه با اقلیم‌های مختلف در هند، اهمیت نسبی داده‌های هواشناسی روزانه شامل دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی حداکثر و حداقل، ساعات آفتابی و سرعت باد در تبخیر–تعرق مرجع تعیین شد. متغیرهای دما در کلیه اقلیم‌ها دارای بیشترین اهمیت در تخمین تبخیر–تعرق مرجع بودند. اهمیت نسبی سایر متغیرها با توجه به اقلیم ایستگاه مورد نظر تفاوت داشت (Nandagiri and Kovoor, 2006).

هدف از تحقیق حاضر در گام نخست تعیین اهمیت نسبی متغیرهای موثر در تبخیر–تعرق مرجع در شرایط اقلیمی متفاوت است که با استفاده از روش آماری چند متغیره تحلیل عاملی انجام شده است. همچنین عملکرد روش‌های مختلف تابشی و دمایی برای تعیین تبخیر–تعرق مرجع در اقلیم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته و ارتباط عملکرد معادلات مختلف تخمین تبخیر–تعرق مرجع با اهمیت نسبی داده‌های ورودی معادلات در شرایط اقلیمی مختلف بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

ایستگاه‌ها و داده‌های هواشناسی

ایستگاه‌های هواشناسی در این تحقیق بر اساس نوع اقلیم ایستگاه‌ها انتخاب شدند. بدین ترتیب که با استفاده از نتایج تحقیق Dinpashoh (2006) که کل ایران را به سه اقلیم شامل اقلیم بسیار خشک، اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم مرطوب تقسیم کرد، از هر اقلیم تعداد سه ایستگاه انتخاب شدند.

دسته‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها با استفاده از پارامتر P/ET_o تعریف شد که P میانگین دراز مدت بارندگی سالانه و ET_o مقدار

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی و اقلیم ایستگاههای هواشناسی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)	P/ET_o	نوع اقلیم
بندرانزلی	۳۷°۲۸′	۴۹°۲۸′	-۲۶٫۲	۲٫۲۲	مرطوب
رامسر	۳۶°۵۴′	۵۰°۴۰′	-۲۰٫۰	۱٫۴۰	مرطوب
رشت	۳۷°۱۲′	۴۹°۳۹′	۳۶٫۷	۱٫۳۲	مرطوب
کرج	۳۵°۵۵′	۵۰°۵۴′	۱۳۱۲٫۵	۰٫۱۹	خشک و نیمه‌خشک
کرمانشاه	۳۴°۲۱′	۴۷°۰۹′	۱۳۱۸٫۶	۰٫۲۹	خشک و نیمه‌خشک
مشهد	۳۶°۱۶′	۵۹°۳۸′	۹۹۹٫۲	۰٫۱۹	خشک و نیمه‌خشک
زاهدان	۲۹°۲۸′	۶۰°۵۳′	۱۳۷۰٫۰	۰٫۰۴	بسیار خشک
کرمان	۳۰°۱۵′	۵۶°۵۸′	۱۷۵۳٫۸	۰٫۰۹	بسیار خشک
یزد	۳۱°۵۴′	۵۴°۱۷′	۱۲۳۷٫۲	۰٫۰۴	بسیار خشک

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲- مقادیر میانگین روزانه پارامترهای هواشناسی در ایستگاه‌های مختلف

نام ایستگاه	دمای حداقل (سلسیوس)	دمای حداکثر (سلسیوس)	دمای نقطه شبنم (سلسیوس)	رطوبت نسبی متوسط (درصد)	ساعات آفتابی (ساعت)	سرعت باد (متر در ثانیه)	بارش روزانه (میلی‌متر)
زاهدان	۱۰٫۶۹	۲۶٫۷۹	-۳٫۱۴	۲۸٫۶۱	۹٫۲۷	۲٫۲۷	۰٫۱۹
کرمان	۷٫۰۳	۲۵٫۰۱	-۳٫۲۴	۳۲٫۴۷	۸٫۹۶	۱٫۹۴	۰٫۳۹
یزد	۱۲٫۰۲	۲۶٫۵۳	-۱٫۱۲	۳۱٫۳۵	۸٫۸۸	۱٫۶۵	۰٫۱۷
بندرانزلی	۱۳٫۴۷	۱۸٫۵۹	۱۳٫۳۵	۸۶٫۰۰	۴٫۸۹	۱٫۳۲	۴٫۸۱
رامسر	۱۲٫۹۱	۱۹٫۲۵	۱۳٫۱۴	۸۴٫۳۶	۴٫۳۰	۱٫۱۶	۳٫۳۶
رشت	۱۲٫۰۴	۲۰٫۵۷	۱۲٫۷۳	۸۴٫۵۵	۴٫۶۳	۰٫۷۵	۳٫۸۷
کرج	۸٫۵۷	۲۰٫۹۵	۲٫۱۷	۴۷٫۵۱	۸٫۰۷	۰٫۶۷	۱٫۶۷
کرمانشاه	۶٫۶۵	۲۳٫۳۷	۰٫۱۸	۴۴٫۷۸	۸٫۰۶	۱٫۲۰	۱٫۶۳
مشهد	۸٫۴۱	۲۱٫۶۶	۳٫۳۲	۵۳٫۴۲	۷٫۹۸	۰٫۶۸	۱٫۶۴

میانگین دراز مدت تبخیر-تعرق مرجع سالانه است و با استفاده از روش هارگریوز-سامانی (Hargreaves and Samani, 1985) تخمین زده شد. با توجه به مقدار P/ETo، ایستگاه‌های هواشناسی در سه اقلیم بسیار خشک، خشک و نیمه خشک و مرطوب به شرح زیر دسته‌بندی شدند (Dinpashoh, 2006):

اقلیم مرطوب که P/ET_o مساوی یا بالاتر از ۱ است.

اقلیم خشک و نیمه‌خشک که P/ET_o بین ۰٫۱ و ۱ است.

اقلیم بسیار خشک که P/ET_o پایین‌تر از ۰٫۱ است.

با در نظر گرفتن شرایط ذکر شده، در نهایت تعداد نه ایستگاه هواشناسی طوری انتخاب شدند که در هر کدام از انواع اقلیم‌های مورد نظر سه ایستگاه هواشناسی قرار گرفته باشند. در جدول (۱) موقعیت جغرافیایی و همچنین اقلیم ایستگاه‌های انتخاب شده نشان داده شده‌اند. داده‌های هواشناسی استفاده شده در این تحقیق از شبکه ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی تهیه شد. پارامترهای دمای هوای حداقل و حداکثر، دمای نقطهٔ شبنم، رطوبت نسبی متوسط، ساعات روشنایی روز، سرعت باد و مقدار بارندگی به صورت مقادیر روزانه همراه با موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌ها برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع از روش‌های مختلف استفاده شدند. دوره آماری داده‌های هواشناسی برای همه ایستگاه‌ها از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۴ میلادی (۱۰ سال) بود. در جدول (۲) مقادیر میانگین روزانه پارامترهای ذکر شده در هر ایستگاه نشان داده شده‌اند.

صحت‌سنجی داده‌ها

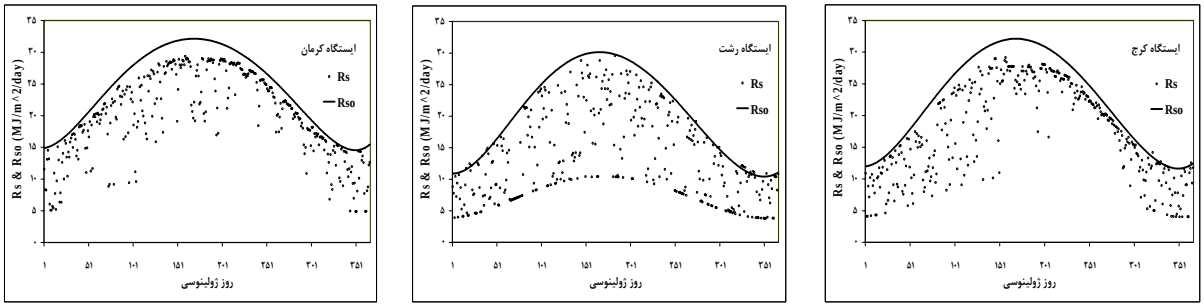
صحت تخمین تبخیر-تعرق مرجع به کیفیت داده‌هایی که در محاسبه آن استفاده شده‌اند وابسته است. کیفیت داده‌های هواشناسی قبل از استفاده در معادلات تخمین تبخیر-تعرق مرجع بایستی مورد ارزیابی قرار بگیرد و در صورت نیاز داده‌هایی که تحت شرایط واسنجی نامناسب دستگاه‌های اندازه‌گیری یا در اقلیم خشک اندازه‌گیری شده‌اند، تصحیح شوند (Allen, 1996). صحت داده‌های دمای هوا، رطوبت نسبی و تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین با استفاده از توصیه‌های سازمان فائو در نشریه فائو ۵۶ (Allen et al. 1998) و انجمن مهندسی عمران امریکا ASCE (EWRI 2001) بررسی شد. تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s) در تعدادی از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری نشده است، در نتیجه R_s بنا به توصیه فائو ۵۶ با استفاده از ساعات آفتابی روزانه تخمین زده شد. مقادیر R_s محاسبه شده در برابر مقادیر حداکثر تابش خورشیدی (R_{so}) رسم شد. مقادیر R_s بایستی زیر منحنی R_{so} قرار بگیرند به طوری که مقدار R_s در روزهای صاف نزدیک به R_{so} و در روزهای ابری پایین‌تر از آن باشد. مقادیر R_s و R_{so} در یک نمودار در مقابل مقادیر روز از سال، برای هر سال به صورت جداگانه رسم شدند.

برای نمونه نمودار R_s و R_{so} در برابر روز از سال در سال ۲۰۰۴ در ایستگاه‌های رشت، کرج و کرمان در شکل (۱) نشان داده شده‌است. با بررسی نمودار R_s و R_{so} در برابر روز از سال برای ایستگاه‌های مختلف نتیجه گرفته شد که مقادیرR_s برای استفاده در محاسبه ET_o قابل قبول هستند و بدون تغییر در محاسبات استفاده شدند.

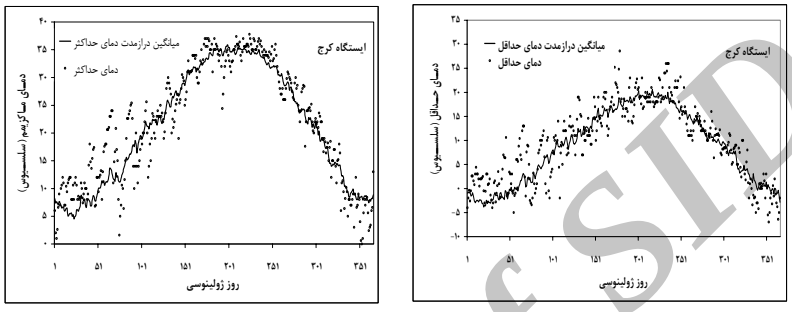
دمای هوا اغلب ساده‌ترین و مطمئن‌ترین پارامتر هواشناسی است که با کیفیت بالا اندازه‌گیری می‌شود (EWRI 2001). به منظور بررسی وجود ثبات یا روند خارج از انتظار در داده‌های دما مقادیر دمای حداکثر و حداقل روزانه برای هرسال و مقدار میانگین دمای حداکثر و حداقل برای کل دوره آماری در مقابل روز از سال برای هر ایستگاه رسم شدند. در شکل (۲) نمودارهای دمای حداکثر و دمای حداقل روزانه برای سال ۲۰۰۴ و مقادیر میانگین دراز مدت هر کدام، برای ایستگاه کرج نشان داده شده‌اند. با بررسی نمودارهای رسم شده هیچ روند خارج از انتظاری در داده‌های دمای هوا مشاهده نشد و کیفیت

Archive of SID

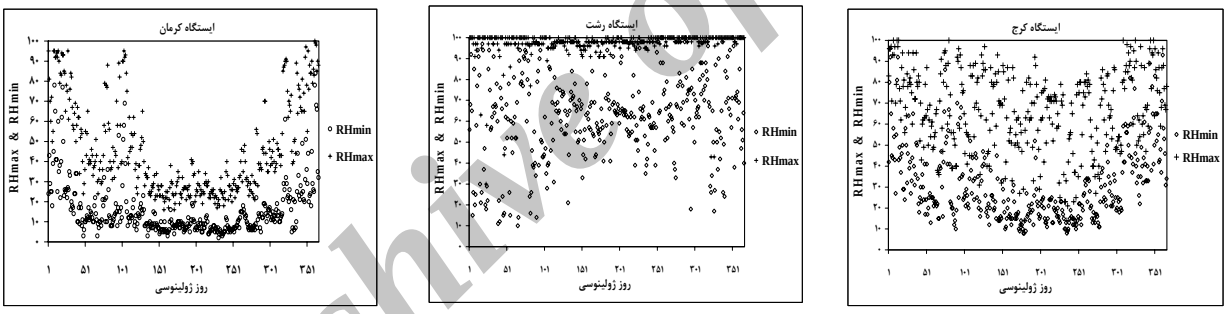
www.SID.ir



شکل ۱- صحت‌سنجی مقادیر R_s برای سال ۲۰۰٤ در ایستگاه‌های کرج ، رشت و کرمان



شکل ۲- دمای حداکثر و حداقل روزانه و مقادیر میانگین دراز مدت هر کدام در ایستگاه کرج برای سال ۲۰۰٤



شکل ۳- رطوبت نسبی حداقل و حداکثر روزانه برای سال ۲۰۰٤ در ایستگاه‌های کرج ، رشت و کرمان

داده‌های دمای هوا مناسب ارزیابی شد.

داده‌های رطوبت نسبی نیز قبل از استفاده بایستی به منظور شناسایی داده‌های قابل تردید یا داده‌های اشتباه بررسی شوند. برای این کار بایستی تصوری از مقادیر قابل قبول یا غیر قابل قبول داشته باشیم. برای مثال مقادیر رطوبت نسبی کمتر از ۵٪ در مناطق خشک و کمتر از ۳۰٪ در مناطق نیمه مرطوب غیرمعمول می‌باشند و ممکن است ناشی از وجود مشکل در دستگاه اندازه‌گیری باشند. به طور مشابه مقادیر بالاتر از ۱۰۰٪ در محیط طبیعی نمی‌تواند اتفاق بیفتد و ممکن است نشان دهنده عدم واسنجی درست دستگاه اندازه‌گیری باشد (EWRI 2001). در شکل (۳) مقادیر رطوبت نسبی حداقل و حداکثر روزانه برای سال ۲۰۰۴ در سه ایستگاه رشت، کرج و کرمان نشان داده شده‌اند. با بررسی این نمودارها برای ایستگاه‌های مختلف در کل دوره آماری دیده شد که مقدار رطوبت نسبی حداقل در ایستگاه‌هایی با اقلیم بسیار خشک (ایستگاه‌های زاهدان، کرمان و یزد)، عمدتاً مقداری بالاتر از ۵٪ (به استثنای چند روز در سال) می‌باشد. همچنین مقدار رطوبت نسبی حداقل در ایستگاه‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک (ایستگاه‌های کرج، کرمانشاه و مشهد) بالاتر از ۱۰٪ و در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب (ایستگاه‌های رشت، رامسر و بندرانزلی) بالاتر از ۲۵٪ بود که این محدوده‌ها با در نظر گرفتن موقعیت اقلیمی این ایستگاه‌ها منطقی به‌نظر می‌رسد. همچنین در کلیه ایستگاه‌ها مقادیر بالاتر از ۱۰۰٪ در داده‌های رطوبت نسبی روزانه میانگین وجود نداشت. مقادیر رطوبت نسبی در صورتی که ایستگاه مورد نظر شرایط ایستگاه مرجع را نداشته باشد، ممکن است تحت تاثیر خشکی هوا قرار بگیرند. در چنین شرایطی، برای این‌که تبخیر-تعرق محاسبه شده نشان دهنده تبخیر-تعرق مرجع باشد، داده‌های دما و رطوبت نسبی بایستی تصحیح شوند که در این تحقیق

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۳- معادلات استفاده شده برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع

مدل تخمین ET_o	معادله تخمین ET_o	مرجع
فائو پنمن-مانتیس	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	Allen et al. (1998)
پریستلی-تیلور	$ET_o = \alpha \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \frac{R_n}{\lambda}$	Priestley and Taylor (1972)
تورک	$ET_o = 0.31 \frac{T}{T+15}(R_s + 2.09) \quad RH \geq 50$ $ET_o = 0.31 \frac{T}{T+15}(R_s + 2.09)\left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) \quad RH \leq 50$	Turc (1961)
ایرماک	$ET_o = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T$	Irmak et al. (2003)
هارگریوز-سامانی	$ET_o = 0.0023R_a (T + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$	Hargreaves and Samani (1985)
هارگریوز-سامانی اصلاح شده	$ET_o = 0.0135K_T R_a (T + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}}$ $K_T = 0.00185TD^2 - 0.0433TD + 0.4023$	Samani (2000)

جدول ٤- مقایسه پارامترهای ورودی مورد نیاز معادلات مختلف تخمین تبخیر-تعرق مرجع

	علامت اختصاری	دمای حداقل	دمای حداکثر	رطوبت نسبی	سرعت باد	ساعات آفتابی
فائو پنمن-مانتیس	FAO56-PM	*	*	*	*	*
پریستلی-تیلور	PT	*	*			*
تورک	T	*	*	*		*
ایرماک	IR	*	*			*
هارگریوز-سامانی	HG	*	*			
هارگریوز-سامانی اصلاح شده	MHG	*	*			

از دستورالعمل نشریه فائو ۵۶ (Allen et al. ,1998) برای تصحیح داده‌های دما و رطوبت نسبی در شرایط غیرمرجع استفاده شد.

مدل‌های تخمین ETo

مدل‌های تخمین ET_o که در این تحقیق ارزیابی شدند در جدول (۳) نشان داده شده‌اند. از مدل ترکیبی فائو-پنمن-مانتیس به عنوان روش استاندارد برای تخمین ET_o استفاده شد و عملکرد معادلات تابشی و دمایی برای تخمین ET_o در مقایسه با مدل فائو پنمن-مانتیس ارزیابی شد.

برای مشاهده جزییات مربوط به محاسبه این مدل‌ها به منابع ذکر شده در جدول (۳) رجوع شود. برای انجام محاسبات ET_o از مدل‌های مختلف، یک برنامه کامپیوتری به زبان Visual Basic تهیه شد. در جدول (۴) علامت اختصاری استفاده شده در این تحقیق برای روش‌های تخمین تبخیر-تعرق مرجع نشان داده شده و پارامترهای ورودی مورد نیاز در معادلات مختلف مقایسه شده است. معادله فائو پنمن-مانتیس بیشترین تعداد داده ورودی را به خود اختصاص داده، در حالی که روش‌های دمایی (هارگریوز-سامانی، هارگریوز-سامانی اصلاح شده) فقط از داده‌های دمای هوا به‌عنوان ورودی استفاده می‌کنند.

پارامترهای آماری برای ارزیابی عملکرد مدل‌های تخمین ET_o

در اغلب مطالعاتی که در زمینه ارزیابی عملکرد مدل‌ها در تخمین عوامل محیطی انجام گرفته، از پارامترهای مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE)، خطای انحراف میانگین (MBE) و ضریب تبیین (R^2) برای مقایسهٔ کارآیی مدل‌های مختلف استفاده شده است (Jacovides and Kontoyiannis, 1995). پارامترهای RMSE و

Archive of SID

www.SID.ir

MBE با استفاده از روابط (۱) و (۲) تعریف می شوند:

$$RMSE = (\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2)^{0.5} \quad (۱)$$

$$MBE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i) \quad (۲)$$

که در آن N تعداد نمونه‌ها، P_i مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و O_i مقادیر مشاهده شده می‌باشند. پارامترهای RMSE و MBE هم بعد با پارامترهایی که از آنها به دست آمده می‌باشند و R^2 نیز بدون بعد است.

مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) با فراهم کردن مقایسهٔ جمله به جملهٔ اختلاف بین مقادیر پیش بینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه گیری شده، معلوماتی در مورد عملکرد کوتاه مدت مدل به دست می‌دهد. هر چه مقدار RMSE کمتر باشد نشانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد. با این حال RMSE در مورد کم برآورد یا بیش برآورد کردن مدل اطلاعاتی به دست نمی‌دهد. خطای انحراف میانگین (MBE) در رابطه با عملکرد دراز مدت مدل معلوماتی را فراهم می‌کند. مقدار مثبت MBE مقدار متوسطی از بیش برآورد در مقادیر پیش بینی شده توسط مدل را به دست می‌دهد و مقدار منفی MBE مقدار متوسطی از کم برآورد در مقادیر پیش بینی شده توسط مدل را به دست می‌دهد. همچنین هر چقدر قدر مطلق MBE کوچکتر باشد نشانگر عملکرد بهتر مدل می‌باشد.

استفاده از هر کدام از پارامترهای ذکر شده به تنهایی برای ارزیابی عملکرد مدل ممکن است مناسب نباشد، چرا که هر پارامتر جنبه‌ی خاصی از مدل را نشان می‌دهد (Bellocchi et al., 2002). به منظور لحاظ نمودن جنبه‌های مختلف عملکرد مدل در ارزیابی آن، می‌توان از تمامی پارامترهای آماری مورد نظر به طور همزمان استفاده کرد. یکی از روش‌هایی که برای این منظور می‌توان استفاده کرد، تعیین عملکرد مدل با توجه به هر یک از پارامترها و سپس تعیین عملکرد مدل بر اساس متوسط عملکرد آن برای کلیه پارامترها می‌باشد(Nandagiri and Kovoor 2006). بنابراین، ابتدا رتبه مدل از نظر پارامترهای آماری RMSE، MBE و R^2 جداگانه تعیین شد و سپس رتبه کلی مدل با میانگین‌گیری از رتبه مدل بر اساس پارامترهای آماری RMSE، MBE و R^2 تعیین شد.

تحلیل عاملی

تمامی پدیده‌های هیدرولوژیکی به طور طبیعی پدیده‌های تصادفی هستند. این پدیده‌ها را می‌توان با استفاده از تعدادی متغیر تعیین کرد که ممکن است این متغیرها با یکدیگر دارای همبستگی زیادی باشند. تبخیر–تعرق یک فرایند هیدرولوژیکی است که به تعداد زیادی متغیر وابسته است. شناخت تاثیر نسبی متغیرها و عوامل دخیل در فرایند تبخیر–تعرق در مدیریت منابع آب به خصوص درکشوری مانند ایران که اغلب مناطق آن دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک هستند، اهمیت زیادی دارد. از آن‌جایی که داده‌های تمامی متغیرهای موثر در تبخیر–تعرق معمولا موجود نیستند، بررسی و تحلیل داده‌های موجود به منظور شناخت اهمیت نسبی این متغیرها ضروری می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل همزمان داده‌های مربوط به چند متغیر از روش‌های آماری چند متغیره استفاده می‌شود. یکی از روش‌های آمار چند متغیره که امروزه به طور وسیعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش تحلیل عاملی است. این روش بین مجموعه‌ای بزرگ از داده‌های به ظاهر بی‌ارتباط، رابطه خاصی را تحت یک مدل فرضی برقرار می‌کند، سپس هر متغیر را به صورت ترکیب خطی از عامل‌های پنهان تبدیل می‌کند. هدف اصلی این روش کاهش ابعاد داده‌ها با کمترین اطلاعات از دست رفته است.

مفهوم تحلیل عاملی بر این اساس است که p متغیر تصادفی مشاهده شدهٔ X، صرفنظر از مقداری خطا می‌تواند به صورت تابعی خطی از m ($m < p$) متغیر فرضی یا عامل نوشته شود. به عبارت دیگر، در صورتی‌که $x_1, x_2, \dots, x_p$ متغیرها و $F_1, F_2, \dots, F_m$ عامل‌ها باشند، می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} X_1 &= l_{11}F_1 + l_{12}F_2 + \dots + l_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 &= l_{21}F_1 + l_{22}F_2 + \dots + l_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ &\vdots \\ X_p &= l_{p1}F_1 + l_{p2}F_2 + \dots + l_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{aligned} \quad (۳)$$

ضرایب l_{ij} را بار متغیر i ام بر روی فاکتور (عامل) j ام گویند و در اصطلاح ضرایب بار عاملی نام دارند. این ضرایب عاملی نشان دهنده اهمیت هر عامل در تبیین متغیر X است. در واقع بار عامل‌ها همبستگی بین عامل‌ها و متغیرهای اصلی است. ε_j نیز مقدار خطا می‌باشد.

به طور معمول تحلیل عاملی بر روی تعدادی متغیر که از نظر تحلیل‌گر در متغیر وابسته موثر هستند انجام می‌گیرد. با این حال در این تحلیل می‌توان متغیر وابسته را نیز وارد کرد. در این حالت مولفه‌های اصلی فقط برای P متغیر مستقل محاسبه نمی‌شوند، بلکه این مولفه‌ها برای (P+1) متغیر، شامل P متغیر مستقل و یک متغیر وابسته محاسبه می‌شوند. در این حالت، مولفه‌های اصلی که دارای بار عاملی کوچکی برای متغیر وابسته هستند، تاثیر زیادی در پیش‌بینی متغیر وابسته ندارند. در صورتی که در یک عامل که متغیر وابسته دارای بار عاملی بزرگی است، متغیرهای مستقلی که آن‌ها نیز دارای بار عاملی بزرگی در همان عامل هستند به عنوان متغیرهای دارای اهمیت در تبیین واریانس کل شناخته می‌شوند (Jollife, 1976). با در نظر گرفتن توضیحات ذکر شده، در این تحقیق تحلیل عاملی بر روی پنج متغیر مستقل (دمای هوای حداقل، دمای هوای حداکثر، رطوبت

Archive of SID

www.SID.ir

نسبی متوسط، سرعت باد، ساعات آفتابی) و یک متغیر وابسته (تبخیر-تعرق مرجع) انجام گرفت.

برای استخراج عامل‌ها از روش مولفه‌های اصلی استفاده شد. عامل‌های به دست آمده، با روش دوران Varimax دوران داده شدند. دوران Varimax یک دوران متعامد است، به این معنی که هنگامی که عامل‌ها را دوران می‌دهیم، عامل‌های به دست آمده نیز با یکدیگر ناهمبسته می‌باشند. در کلیه ایستگاه‌ها حداقل تعداد عامل‌ها که ۹۰ درصد واریانس در متغیرهای اصلی را در بر داشته باشند، سه عامل تعیین شد و در نتیجه در همه ایستگاه‌ها سه عامل استخراج شدند.

برای اجرای تحلیل عاملی در این تحقیق از نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. تحلیل عاملی برای کلیه ایستگاه‌ها به صورت جداگانه انجام گرفت. داده‌های هواشناسی استفاده شده در تحلیل عاملی به صورت متوسط روزانه بودند. دوره زمانی داده‌های هواشناسی که در تحلیل عاملی به کار گرفته شدند مشابه با دوره زمانی برای مقایسه مدل‌های مختلف تخمین تبخیر-تعرق مرجع (۲۰۰۴-۱۹۹۵) بود.

نتایج و بحث

ارزیابی عملکرد مدل ها

مقادیر میانگین ET_o محاسبه شده از روش فائو پنمن-مانتیس برای کلیه ایستگاه‌ها و دورهٔ زمانی (۲۰۰۴-۱۹۹۵) در جدول (۵) نشان داده شده است. کمترین ET_o میانگین روزانه در ایستگاه رامسر (۲٫۲۰ میلی‌متر در روز) و بیشترین مقدار آن در ایستگاه زاهدان (۳٫۹۹ میلی-متر در روز) بود.

نتایج آماری مقایسه عملکرد متوسط مدل‌های تجربی برآورد ET_o روزانه در اقلیم‌های مختلف تحت بررسی در جدول (۶) نشان داده شده است. مقدار خطای RMSE و MBE برای مدل‌های دمایی در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک بالاتر و مقدار R^2 مدل‌های دمایی در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک پایین‌تر بود. عکس این حالت برای مدل‌های تابشی صدق می‌کرد، به این ترتیب که مقدار خطای مدل‌های تابشی در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک پایین‌تر و مقدار R^2 مدل‌های دمایی در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک بالاتر بود. البته در مورد خطای MBE دو مورد استثنا وجود داشت، به این صورت که MBE مدل تابشی تورک در اقلیم خشک و نیمه‌خشک کمتر از مقدار آن در اقلیم مرطوب بود و همچنین MBE مدل دمایی هارگریوز-سامانی در اقلیم بسیار خشک

جدول ۵- مقادیر میانگین ET_o روزانه در ایستگاه‌های مختلف

	بندر انزلی	رامسر	رشت	کرج	کرمانشاه	مشهد	زاهدان	کرمان	یزد
ET_o روزانه (میلی متر در روز)	۲٫۲۹	۲٫۲۰	۲٫۳۰	۳٫۶۳	۳٫۵۴	۳٫۷۳	۳٫۹۹	۳٫۸۴	۳٫۶۵

جدول ٦- عملکرد روزانه مدل‌های مختلف در مقایسه با روش استاندارد در هر اقلیم

اقلیم	نام روش	RMSE	MBE	R^2	رتبه کل
مرطوب	HG	۰٫۷۱ (۴)	۰٫۰۷ (۱)	۰٫۸۷ (۳)	۴
	MHG	۱٫۰۶ (۵)	۰٫۸۲ (۵)	۰٫۸۷ (۳)	۵
	PT	۰٫۶۶ (۳)	۰٫۳۰ (۳)	۰٫۹۲ (۱)	۲
	T	۰٫ ۴۸(۱)	۰٫۱۸ (۲)	۰٫۹۲ (۱)	۱
	IR	۰٫۵۵ (۲)	۰٫۳۱ (۴)	۰٫۹۱ (۲)	۳
خشک و نیمه‌خشک	HG	۰٫۶۱ (۱)	۰٫۰۵ (۲)	۰٫۹۳ (۱)	۱
	MHG	۰٫۶۶ (۲)	۰٫۲۷ (۳)	۰٫۹۲ (۲)	۲
	PT	۰٫۷۴ (۳)	−۰٫۴۵ (۵)	۰٫۹۳ (۱)	۳
	T	۰٫۹۵ (۵)	۰٫۰۳ (۱)	۰٫۸۸ (۴)	۴
	IR	۰٫۸۵ (۴)	−۰٫۴۴ (۴)	۰٫۹۱ (۳)	۵
بسیار خشک	HG	۰٫۶۲ (۱)	−۰٫۱۵ (۱)	۰٫۸۸ (۲)	۱
	MHG	۰٫۷۹ (۲)	۰٫۳۰ (۲)	۰٫۸۴ (۳)	۲
	PT	۰٫۸۱ (۳)	−۰٫۵۸ (۵)	۰٫۹۰ (۱)	۳
	T	۱٫۲۰ (۵)	۰٫۴۵ (۳)	۰٫۸۸ (۲)	۵
	IR	۰٫۸۵ (۴)	−۰٫۵۳ (۴)	۰٫۸۸ (۲)	۴

Archive of SID

www.SID.ir

بالاتر از مقدار آن در اقلیم مرطوب بود.

اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در تبخیر-تعرق مرجع

به منظور بررسی اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی در تبخیر-تعرق مرجع در سه اقلیم مورد مطالعه از روش آماری تحلیل عاملی استفاده شد. نتایج این تحلیل برای هر اقلیم به صورت جداگانه ارائه شده است.

با توجه به این‌که تحلیل عاملی هنگامی موثر است که متغیرهای مورد بررسی با یکدیگر دارای همبستگی بالایی باشند، در گام نخست ماتریس ضرایب همبستگی برای مجموعه داده‌های هر ایستگاه محاسبه شد (به منظور رعایت اختصار نشان داده نشده‌اند). بررسی ماتریس همبستگی بین متغیرها در هر ایستگاه نشان داد که در بین اغلب متغیرها همبستگی بالایی وجود دارد. به خصوص متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر و تبخیر-تعرق مرجع در کلیه ایستگاه‌ها همبستگی بسیار بالایی با یکدیگر داشتند. مقادیر ضریب همبستگی بین برخی متغیرها در اقلیم مرطوب نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک متفاوت است. از جمله سرعت باد و رطوبت نسبی متوسط در ایستگاه‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک نسبت به ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب همبستگی بالاتری با تبخیر-تعرق مرجع داشتند. همچنین رطوبت نسبی متوسط مقدار ضریب همبستگی بالاتری با دمای حداقل و دمای حداکثر در ایستگاه‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک نسبت به ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب داشت. مقادیر بارهای عاملی برای سه عامل استخراج شده در اقلیم‌های مختلف در جدول (۷) نشان داده شده است.

در اقلیم مرطوب دو عامل یک و دو دارای بار عاملی بزرگی برای متغیر وابسته (ET_o) بودند. بنابراین متغیرهای مستقلی که در این دو عامل بار عاملی بزرگی داشته باشند، مقدار بیشتری از تغییرات در ET_o را بیان می‌کنند. عامل یک نسبت به عامل دو بار عاملی بزرگتری برای ET_o داشت. دو متغیر دمای حداقل و دمای حداکثر دارای بارهای عاملی بسیار بزرگی در عامل یک بودند، در نتیجه این دو متغیر مقدار زیادی از تغییرات در ET_o را توضیح می‌دهند.

جدول ۷- مقادیر بارهای عاملی برای متغیرهای هواشناسی در اقلیم‌های مختلف

		بارهای عاملی		
اقلیم	متغیر	عامل یک	عامل دو	عامل سه
مرطوب	دمای حداقل	۰/۹۸۴	۰/۰۴۰	-۰/۰۲۰
	دمای حداکثر	۰/۹۰۷	۰/۳۴۸	-۰/۰۳۶
	رطوبت نسبی	-۰/۱۵۴	-۰/۸۳۳	-۰/۲۱۵
	ساعات آفتابی	۰/۲۴۱	۰/۸۲۵	-۰/۲۴۹
	سرعت باد	-۰/۰۱۱	-۰/۰۱۴	۰/۹۷۸
	تبخیر-تعرق مرجع	۰/۷۴۲	۰/۶۲۴	۰/۰۶۰
خشک و نیمه‌خشک	دمای حداقل	۰/۹۳۷	۰/۲۲۱	۰/۱۵۳
	دمای حداکثر	۰/۸۵۵	۰/۴۹۰	۰/۰۳۲
	رطوبت نسبی	-۰/۵۷۰	-۰/۷۰۱	۰/۰۴۴
	ساعات آفتابی	۰/۲۷۰	۰/۹۳۳	-۰/۰۰۵
	سرعت باد	۰/۱۲۰	-۰/۰۱۸	۰/۹۸۳
	تبخیر-تعرق مرجع	۰/۷۳۰	۰/۴۴۷	۰/۳۲۴
بسیارخشک	دمای حداقل	۰/۹۵۲	۰/۱۲۴	۰/۱۸۱
	دمای حداکثر	۰/۸۸۵	۰/۴۳۵	۰/۰۰۹
	رطوبت نسبی	-۰/۴۸۶	-۰/۷۳۹	-۰/۰۲۸
	ساعات آفتابی	۰/۱۸۶	۰/۹۲۸	-۰/۰۸۳
	سرعت باد	۰/۱۶۷	-۰/۰۵۶	۰/۹۸۱
	تبخیر-تعرق مرجع	۰/۸۰۵	۰/۴۳۹	۰/۲۹۰

Archive of SID

www.SID.ir

در عامل دو که دومین بار عاملی بزرگ برای ET_o را دارد، دو متغیر رطوبت نسبی متوسط و ساعات آفتابی دارای بار عاملی بزرگی بودند، در نتیجه دو متغیر رطوبت نسبی متوسط و ساعات آفتابی نیز در تخمین ET_o در اقلیم مرطوب از اهمیت بالایی برخوردارند. متغیر سرعت باد بر روی عامل سه بار عاملی بسیار بزرگی داشت، ولی با توجه به این‌که بار عاملی ET_o در عامل سه بسیار ناچیز بود، سرعت باد نقش کمی در تبیین تغییرات ET_o در این اقلیم داشت.

هم اکنون می‌توان با استفاده از نتایج حاصل از تحلیل عاملی و با توجه به اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی مختلف بر روی تبخیر-تعرق مرجع، عملکرد مدل‌های تجربی تخمین ET_o در اقلیم مرطوب را تفسیر کرد. در اقلیم مرطوب متغیرهای دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی دارای اهمیت نسبی بالایی بودند، بنابراین می‌توان انتظار داشت که معادله‌ای که از داده‌های دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی استفاده کند، عملکرد بهتری در برآورد ET_o داشته باشد که ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف (جدول (۶)) نیز نشان داد که مدل T که از هر سه نوع متغیر (دما، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی) استفاده می‌کرد، در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها داشت. به همین ترتیب مدل‌های تابشی PT و IR که از داده‌های دما و ساعت آفتابی استفاده می‌کردند، نسبت به مدل‌های دمایی که فقط از داده دمای هوا استفاده می‌کردند، عملکرد بهتری داشتند.

در اقلیم خشک و نیمه‌خشک عامل یک بزرگترین بار عاملی را بر روی ET_o داشت و مشابه با اقلیم مرطوب، در این اقلیم نیز دو متغیر دمای حداقل و دمای حداکثر بزرگترین بار عاملی را در این عامل داشتند و در نتیجه نسبت به دیگر متغیرها، دارای اهمیت بیشتری در تخمین ET_o بودند. مقادیر بارهای عاملی برای متغیر ET_o در عامل-های دو و سه نسبت به مقادیر آن‌ها در اقلیم مرطوب رفتار متفاوتی داشت. در اقلیم خشک و نیمه‌خشک عامل دو بار عاملی کوچکتری برای ET_o داشت و در نتیجه عامل دو در این اقلیم مقدار کمتری از واریانس در متغیر ET_o را در برداشت. دو متغیر رطوبت نسبی متوسط و ساعت آفتابی در این عامل دارای بار عاملی بزرگی بودند، با این حال این دو متغیر نسبت به اقلیم مرطوب تاثیر کمتری در توضیح واریانس در ET_o داشتند، چرا که ET_o در عامل دو دارای بار عاملی کوچکتری نسبت به اقلیم مرطوب بود. با توجه به اهمیت نسبی بیشتر متغیرهای دما در اقلیم خشک و نیمه‌خشک نسبت به اقلیم مرطوب، عملکرد بهتر معادلات دمایی در این اقلیم توجیه می‌شود.

بر خلاف عامل دو، در اقلیم خشک و نیمه‌خشک، عامل سه دارای بار عاملی بزرگتری برای متغیر ET_o نسبت به اقلیم مرطوب بود. با توجه به این‌که در عامل سه، مقدار بار عاملی برای متغیر سرعت باد بسیار بالا است، می‌توان نتیجه گرفت که در این اقلیم سرعت باد تاثیر بیشتری بر ET_o نسبت به اقلیم مرطوب دارد.

نتایج تحلیل عاملی در اقلیم بسیار خشک، مشابه با نتایج این تحلیل در اقلیم خشک و نیمه‌خشک بود. در اقلیم بسیار خشک نیز متغیرهای دمای حداقل و دمای حداکثر بیشترین تاثیر را بر روی ET_o داشتند. میزان اهمیت این دو متغیر در اقلیم بسیار خشک، نسبت به میزان اهمیت این دو متغیر در اقلیم خشک و نیمه‌خشک بیشتر بود، چرا که مقدار بار عاملی ET_o در عامل یک که متغیرهای دما نیز بر روی این عامل بار عاملی بزرگی داشتند، نسبتا بزرگتر بود. در این اقلیم، بار عاملی متغیر ET_o بر روی عامل دو که متغیرهای رطوبت نسبی و ساعات آفتابی دارای بار عاملی بزرگی در این عامل بودند، نسبت به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کمتر بود. در نتیجه متغیرهای رطوبت نسبی و ساعات آفتابی در اقلیم بسیار خشک تاثیر کمتری در تخمین ET_o نسبت به دو اقلیم دیگر داشتند. با توجه به این‌که در عامل سه که بار عاملی برای متغیر سرعت باد بسیار بالا بود، متغیر ET_o نیز بار عاملی نسبتا بالایی داشت، همانند اقلیم خشک و نیمه خشک، متغیر سرعت باد در اقلیم بسیار خشک نیز نقش نسبتا بالایی در تخمین ET_o داشت.

نتایج تحلیل عاملی در ایستگاه‌های با اقلیم بسیار خشک نیز با نتایج حاصل از مقایسه عملکرد روش‌های تجربی تخمین ET_o تطابق داشت. در این اقلیم نیز مشابه با اقلیم خشک و نیمه‌خشک، با توجه به این‌که متغیرهای دمایی اهمیت بالایی در تخمین ET_o داشتند و متغیرهای رطوبت نسبی و ساعات آفتابی نسبت به اقلیم مرطوب از اهمیت کمتری در تعیین ET_o داشتند، مدل‌های دمایی عملکرد خوبی داشتند.

با استفاده از نتایج تحلیل عاملی می‌توان کوچک بودن خطا در تخمین ET_o در اقلیم مرطوب نسبت به دو اقلیم دیگر را توضیح داد. با در نظر گرفتن تاثیر زیاد متغیر سرعت باد در تعیین ET_o در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیار خشک بر خلاف اقلیم مرطوب و این نکته که متغیر سرعت باد در هیچ کدام از مدل‌های دمایی و تابشی استفاده نشده است، مقادیر خطا برای روش‌های مختلف تخمین ET_o در اقلیم مرطوب نسبت به دو اقلیم دیگر کوچک‌تر بود.

نتیجه‌گیری

ارزیابی عملکرد مدل‌های تابشی و دمایی برآورد ET_o نسبت به روش فائو-پنمن-مانتیس در شرایط اقلیمی مختلف نشان داد که عملکرد این مدل‌های تجربی در تخمین ET_o به شرایط اقلیمی ایستگاه تحت بررسی وابسته است، به طوری که در اقلیم مرطوب مدل‌های تابشی عملکرد بسیار خوبی

داشتند، در حالی که در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک، مدل‌های دمایی عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های

Archive of SID

www.SID.ir

تابشی داشتند.

نتایج حاصل از تحلیل عاملی نشان داد که در کلیه ایستگاه‌ها داده‌های دمای حداقل و دمای حداکثر بیشترین اهمیت را بر روی ET_o دارند. در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب متغیرهای رطوبت نسبی و ساعات آفتابی نیز دارای اهمیت بالایی بر روی ET_o هستند، در حالی که در ایستگاه‌های با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک تاثیر این دو متغیر در ET_o کمتر است. تاثیر متغیر سرعت باد بر ET_o در ایستگاه‌های با اقلیم مرطوب بسیار ناچیز است، در حالی که در اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک سرعت باد تاثیر بیشتری بر ET_o دارد. با استفاده از نتایج تحلیل عاملی در تعیین اهمیت نسبی متغیرهای هواشناسی بر روی ET_o می‌توان عملکرد وابسته به اقلیم مدل‌های تابشی و دمایی را تفسیر کرد. در اقلیم مرطوب اهمیت نسبی داده‌های دما و ساعات آفتابی بالا بود و در نتیجه مدل‌های تابشی که از این متغیرها استفاده کرده بودند نسبت به مدل‌های دمایی که فقط از داده‌های دما استفاده کرده بودند، عملکرد بهتری داشتند. برعکس در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک و اقلیم بسیارخشک اهمیت نسبی متغیر دما بر روی ET_o بسیار بالا بود و در نتیجه روش‌های دمایی در این دو اقلیم نسبت به روش‌های تابشی عملکرد بهتری داشتند.

مراجع

Allen, R. G. (1996), Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 122 (2), 97–106.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., and Smith, M. (1998), Crop evapotranspiration guide line for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

Bellocchi, G., Acutis, M., Fila, G., and Donatelli, M. (2002), An indicator of solar radiation model performance based on a fuzzy expert system. Agron. J., 94, 1222–1233.

DehghaniSanij, H., Yamamoto, T., and Rasiah, V. (2004), Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semiarid environments. Agricultural Water Management, 64, 91–106.

Dinpashoh, Y. (2006), Study of reference crop evapotranspiration in I.R. of Iran. Agricultural water management, 84, 123-129.

EWRI (2001), The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Environmental and Water Resources Institute of the ASCE Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee.

George, B. A., Reddy, B. R. S., Raghuwanshi, N. S., and Wallender, W. W. (2002), Decision support system for estimating reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 128, 1–10.

Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. (1985), Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Appl. Eng. Agric., 1(2), 96-99.

Hargreaves, G. H., and Allen, R. G. (2003), History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129, 53–62.

Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G., and Jones, J. W. (2003), Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129, 336–347.

Itenfisu, D., Elliot, R. L., Allen, R. G., and Walter, I. A. (2003), Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 129, 440–448.

Jacovides, C. P., and Kontoyiannis, H. (1995), Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computation models. Agricultural water management, 27, 365-371.

Jensen, M. E., Burman, R. D., and Allen, R. G. (1990), Evapotranspiration and Irrigation water Requirements. ASCE manuals and reports on engineering practice, No. 70, ASCE.

Jollife, I. T. (1986), Principal components analysis, Springer.

Mohan, S., and Arumugam, N. (1996), Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration, Factor analysis approach. Water Resources Management, 10, 1–20.

Nandagiri, L., and Kovoor, M. G. (2006), Performance Evaluation of Reference Evapotranspiration Equations across a Range of Indian Climates. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 132, 238-249.

Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J., (1972), On the assessment of surface heat and evaporation using large-scale parameters. Monthly Weather Review, 100, 81–92.

Samani, Z. (2000), Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 126, 265–267.

Turc, L. (1961), Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration, a simple climatic formula evolved up to date. Annals of Agronomy, 12, 13-49.

Xu, C. Y., and Singh, V. P. (2002), Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. Water Resources Management, 16, 197–219.

تاریخ دریافت: ۸۷/۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۸۹/۹/۱

Archive of SID

www.SID.ir

Iranian Journal of Irrigation and drainage
No. 3, Vol. 4, Winter 2011, p. 319-329

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره ۳، جلد۴، زمستان ۱۳۸۹، ص. ۳۲۹-۳۱۹

Relative Importance of Meteorological Variables in Estimating Reference Evapotranspiration for Different Climatic Regions

S. Yazdankhah[1], **S. M. Mirlatifi***[2]

Abstract

Estimating reference evapotranspiration (ET_o) is essential in studies related to water resource management. The FAO56-Penman-Monteith combination method (FAO56-PM) is recommended as a standard method for estimating ET_o. Since FAO56-PM method needs many input variables, ET_o can be estimated by empirical methods that need fewer input variables. In this paper, performance of five radiation and temperature based methods for estimating daily ET_o at nine stations in different climates were evaluated. Radiation based models ranked as the best method in humid climate, while in both arid-semiarid and extremely arid climates, temperature based models performance were better. Relative importance of meteorological variables influencing ET_o was studied using multivariate statistical method of Factor Analysis. The minimum and maximum temperatures were most important variables in estimating ET_o at all climates. Relative humidity and sunshine hours had also high effect on ET_o at humid climate, while they had less effect on ET_o at arid-semiarid and extremely arid climates. Effect of wind speed on ET_o in the humid climate was negligible, while it had relatively high effect on ET_o at arid-semiarid and extremely arid climates.

Keywords: Reference Evapotranspiration, Meteorological Variables, Factor Analysis

Archive of SID

1- Graduate student, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Iran
2- Associate professor, Dept. of Irrigation and Drainage Engineering, Tarbiat Modares University, Iran
(*-Corresponding Author Mirlat_m@modares.ac.ir)

www.SID.ir