ارزیابی حساسیت مدل‌های مختلف تبخیر- تعرق مرجع (ET_o) به سیگنال‌های تغییر اقلیم در اقلیم سرد نیمه خشک همدان

علی‌اکبر سبزی‌پرور[۱*]، فرزین تفضلی[۱]، حمید زارع ابیانه[۱]، حسین بانژاد[۱]، محمد غفوری[۲]، محمد موسوی بایگی[۳] و زهره مریانجی[۴]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۴/۱)

چکیده

در تنوع اقلیمی ایران، سنجش حساسیت مدل‌های رایج تخمین تبخیر- تعرق قبل از انتخاب و معرفی مناسبت‌ترین مدل امری ضروری بنظر می‌رسد. در این تحقیق، حساسیت مدل‌های مختلف تبخیر- تعرق به متغیرهای مختلف هواشناسی (به منظور کاربرد در برآورد پیامدهای نوسانات تغییر اقلیم و هم‌چنین ارزیابی دامنه خطاهای احتمالی در محاسبات تبخیر- تعرق) در شرایط اقلیمی سرد نیمه خشک همدان با استفاده از آمار ۳۵ ساله هواشناسی (۸۴-۱۳۵۰) بررسی شد. بدین منظور، مدل‌های پنمن- مانتیث فائو۵۶ (PMF56)، جنسن هیز (JH 1,2)، مک کینک (MK)، هنسن (HN)، هارگریوز- سامانی (HS)، تورک مناطق مرطوب (TH) و تورک مناطق خشک (TA) به کار گرفته شدند. در این راستا، حساسیت (sensitivity) نسبی مدل‌های فوق به پارامترهای مختلف هواشناسی بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. محدوده تغییرات پارامترهای مذکور در راستای برنامه‌های هیئت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) معادل ۱۰ و۲۰ درصد در طول فصل رشد (اردیبهشت- آبان) انتخاب شد. نتایج حاکی از این است که در شرایط اقلیمی همدان، اغلب مدل‌های برآورد ET_o بیشترین حساسیت را (تا ۱۰/۸ در صد ازای ۱۰ درصد تغییر در ورودی) به ترتیب به تغییرات کوتاه مدت و دراز مدت پارامترهای تابش و دما نشان می‌دهند. نتایج نشان داد که در به کارگیری داده‌های تجربی یا شبیه‌سازی شده تابش و ضریب آلبیدو، باید دقت کافی به عمل آید. پیش‌بینی می‌شود که در اقلیم‌های سرد نیمه خشک، افزایش دمای هوا در طول دوره رشد، به طور متوسط موجب ۸/۵ در صد افزایش (براساس مدل PMF56) نیاز آبی گیاه مرجع تا سال ۱۴۲۹ (۲۰۵۰ میلادی) می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم سرد نیمه خشک، حساسیت مدل‌های تبخیر- تعرق مرجع، سیگنال‌های تغییر اقلیم، همدان

۱. به ترتیب دانشیار، دانشجوی سابق کارشناسی ارشد و استادیاران مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

۲. استادیار پژوهشی مرکز حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران

۳. استادیار آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴. مربی پژوهشی مرکز هواشناسی اصفهان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: swsabzi@basu.ac.ir

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

مقدمه

برآورد نیاز آبی از مهم‌ترین مراحل طراحی یک سیستم آبیاری می‌باشد. بررسی اثر پارامترهای هواشناسی در این برآورد، ضمن نشان دادن حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo)، می‌تواند نیاز آبی گیاهان را در شرایط مختلف اقلیمی برآورد نماید. مطالعاتی که تا کنون انجام شده است نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی گوناگون، پاسخ (حساسیت) مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق به پارامترهای هواشناسی یکسان نیست (۱)، که این امر می‌تواند منجر به خطاهایی با دامنه‌های متفاوت در خروجی این مدل‌ها شود. مطالعات زیادی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در مناطق مختلف دنیا و ایران صورت گرفته است. مطالعات انجام یافته برای تبخیر و تعرق را می‌توان در قالب روش‌های تجربی برآورد تبخیر و تعرق مرجع در پنج گروه ترکیبی، دمایی، تشعشعی، رطوبتی و تشت تبخیر طبقه‌بندی نمود (۴). در گروه ترکیبی روش‌های پنمن، پنمن- کیمبرلی و پنمن- مانتیث و در گروه دمایی روش‌هایی چون جنسن (۱۸) جنس- هیز (۱۷)، هارگریوز- سامانی (۱۵) و بلانی- کریدل قرار دارند (۱۲). از طرف دیگر هارگریوز و سامانی (۱۵) و دورنباس و پروئیت (۱۲) اعتقاد دارند که معادلات دمایی با توجه به سادگی از دقت لازم جهت تخمین ETo برخوردار هستند.

در ایران نیز ضیاء تباراحمدی (۵)، نیکبخت و همکاران (۸) و ناصری و همکاران (۷) تعدادی از روش‌های ترکیبی و دمایی را مورد بررسی قرار دادند. در مجموع، محققین فوق با توجه به اهداف مورد مطالعه، هر دو روش ترکیبی و دمایی را پیشنهاد نموده‌اند. در اغلب مطالعات انجام یافته در ایران بر استفاده از روش‌های تجربی برآورد تبخیر– تعرق مرجع با توجه به میزان دسترسی به داده‌های هواشناسی، حساسیت مدل‌ها به پارامترهای ورودی و دقت مورد نیاز تأکید شده است. متأسفانه در این‌گونه مطالعات، به حساسیت روابط تجربی به تغییرات داده‌های هواشناسی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع کمتر توجه شده است. تمسگن و همکاران (۲۸) نشان دادند که عدم توجه به شرایط استاندارد تعریف شده برای تبخیر و تعرق مرجع موجب فرا برآورد ET_o تا سقف ۲۵ درصد می‌شود. ساکستون (۲۷) نشان داد که در روش پنمن- ون باول به ازای هر واحد افزایش در تابش خالص (Rn) و یا فشار بخار آب (e) به ترتیب ۹۰-۵۰ درصد و ۳۰-۲۰ درصد فرا برآورد ET_o وجود خواهد داشت. می یر و همکاران (۲۲) حساسیت مدل پنمن به خطاهای سیستماتیک و تصادفی داده‌های هواشناسی را شبیه‌سازی نمودند. نتایج مطالعات آنان حاکی از تأثیر قابل ملاحظه خطای پارامترهای تابش خورشیدی و رطوبت نسبی در ET_o نسبت به سایر پارامترها می‌باشد. ضمن آن که سرعت باد (U) کمترین اثر را در برآورد تبخیر و تعرق مرجع داشت. پایپر (۲۴) نشان داد که معادله پنمن (۲۳) بیشترین حساسیت را به پارامتر اقلیمی دمای هوا دارد. مطالعه لی و همکاران (۲۰) بیشترین اثر تغییرات داده‌های هواشناسی را در معادله پنمن کیمبرلی متوجه پارامتر ترکیبی دمای حداکثر و حداقل هوا دانسته‌اند. گویال (۱۳) دریافت که افزایش ۲۰ درصدی یکی از پارامترهای دما، تابش یا سرعت باد در اقلیم خشک هندوستان به ترتیب موجب ۱۴/۸، ۱۱ و ۷ درصد فرابرآورد ET_o به روش پنمن- مانتیث می‌شود.

پیامدهای زیانبار گرمایش جهانی، تغییر عناصر چرخه آب را در طبیعت به دنبال دارد (۱۶)، که همین امر سبب افزایش نیاز آبی گیاهان خواهد شد. لذا تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی در مدیریت برنامه‌های آبی دراز مدت اثرگذار است. کوچکی و همکاران (۱۹) براساس مدل منطقه‌ای گردش عمومی جو UKMO پیش‌بینی نمودند که دمای هوای ایران تا سال ۲۰۵۰ به مقدار $۲/۷^{o}C$ افزایش خواهد یافت که این افزایش دما می‌تواند افزایش نیاز آبی گیاهان را به دنبال داشته باشد.

با این فرض که پاسخ (حساسیت) هر یک از مدل‌های تبخیر و تعرق به تغییرات اعمال شده در پارامترهای هواشناسی متفاوت است، و شرایط اقلیمی نیز بر دامنه حساسیت اثر گذارند، هدف از این تحقیق برآورد کمی دامنه حساسیت مدل‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ET_o) به تغییرات تعریف

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

شده پارامترهای مختلف هواشناسی در اقلیم سرد نیمه خشک همدان (براساس طبقه‌بندی آمبرژه) (۳) می‌باشد. سنجش نسبی حساسیت مدل‌های تبخیر و تعرق به تغییرات پارامترهای هواشناسی، به دلایل زیر در برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان حائز اهمیت است:

۱- ارزیابی بهتر محدوده خطاهای ایجاد شده (مانند خطاهای MBE، SE و RMSE) در خروجی مدل‌های برآورد ET_o ،

۲- کمک به انتخاب مدل (مدل‌های) مناسبی که کمترین خطا را در برآورد ET_o موجب شود.

۳- ارزیابی نسبی تأثیر پارامترهای مختلف هواشناسی در خروجی مدل‌های تبخیر- تعرق و مقایسه نسبی فرا برآورد آنها با یکدیگر.

۴- محدودیت در دسترسی به برخی از پارامترهای هواشناسی جهت به کارگیری در مدل‌های تبخیر- تعرق و نیاز به انتخاب مدل (های) مناسب با توجه به حساسیت‌های به دست آمده در آن شرایط اقلیمی.

از آن‌جایی که امکان پیش‌بینی هم‌زمان تغییرات تمامی پارامترهای هواشناسی در اثر پدیده گرمایش جهانی وجود ندارد، در این مطالعه تأثیر افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی متوسط دمای حداکثر و متوسط دمای حداقل هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی، ضریب آلبیدو، تابش کل و تابش خالص بر ET_o، به طور منفرد (تک متغیره) بررسی گردید. یکی از اهداف فرعی مطالعه حاضر نیز محاسبه افزایش ET_o در اقالیم سرد نیمه خشک به واسطه پدیده گرمایش جهانی براساس پیش‌بینی کوچکی و همکاران (۱۹) است.

مواد و روش‌ها

برای انجام این تحقیق از داده‌های هواشناسی (۳۵ ساله) ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان (۲) استفاده شد. ایستگاه سینوپتیک همدان به عنوان یکی از ایستگاه‌های معتبر غرب کشور در طول جغرافیایی E ′۳۲ °۴۸، عرض جغرافیایی N ′۵۱ °۳۴ و ارتفاع ۱۷۴۰ متر از سطح آب‌های آزاد واقع شده است. آمار و اطلاعات مورد استفاده برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع شامل: تابش کل خورشیدی، تابش خالص، متوسط دمای حداقل، متوسط دمای حداکثر، ساعات آفتابی، سرعت باد، و رطوبت نسبی است. جدول۱ میانگین اقلیمی ۳۵ ساله (۸۴-۱۳۵۰) پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک همدان در طول فصل رشد را نشان می‌دهد.

کنترل کیفی داده‌ها به روش آزمون همگنی (Run-test) انجام شد. در این راستا، آن دسته از داده‌هایی که نسبت به میانگین اقلیمی انحراف آماری قابل ملاحظه داشتند حذف شدند. علاوه بر این، به منظور حصول اطمینان از کافی بودن طول دوره آماری جهت ارزیابی‌های اقلیمی، داده‌ها تحت آزمون موکوس (Mockus test) قرار گرفتند (۶). بعد از انجام آزمون‌های فوق، تبخیر و تعرق مرجع ماهانه به روش ترکیبی پنمن- مانتیث فائو-۵۶ (PMF56) (۱۱)، روش دمایی هارگریوز- سامانی (HS) (۱۵)، جنسن- هیز ($JH_{1,2}$) (۱۷)، مک کینک (MK) (۲۱)، هنسن (HN) (۱۴)، تورک مناطق خشک (TA) و تورک مناطق مرطوب (TH) (۲۹)، محاسبه شد. سپس براساس پیشنهاد هیئت بین الدول تغییر اقلیم (۱۶)، با افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای مؤثر بر تبخیر و تعرق، درصد تغییرات ET_o محاسبه گردید. افزایش‌های اعمال شده عمدتاً شامل تشعشع خالص، تشعشع با طول موج کوتاه، دمای متوسط حداقل و حداکثر، سرعت باد و رطوبت نسبی بود. در پایان نیز با توجه به پیش‌بینی افزایش ۲/۷ درجه سانتی‌گراد که براساس مدل‌های گردش عمومی UKMO، GISS و GFDL به دست آمده (۱۹) افزایش نسبی نیاز آبی گیاه مرجع در شرایط اقلیمی استان همدان شبیه‌سازی گردید. شرح جزئیات مدل‌های تبخیر- تعرق مورد استفاده در این تحقیق در مراجع ذکر شده موجود می‌باشد.

نتایج و بحث

براساس میانگین پارامترهای هواشناسی ارائه شده در جدول۱، اقلیم همدان بر مبنای اقلیم‌نمای کوپن، آمبرژه و دومارتن در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

جدول ۱. میانگین‌های ماهانه پارامترهای هواشناسی ایستگاه فرودگاه همدان (۸۴-۱۳۵۰)

ماه	تابش فوق جوی (R_a)	تابش کل* (R_s)	متوسط دما(°C)	متوسط حداکثر دما (°C)	متوسط حداقل دما (°C)	سرعت باد دو متری (m/s)	حداکثر رطوبت نسبی (%)	حداقل رطوبت نسبی (%)
اردیبهشت	۹۲۳	۵۸۲	۱۴/۷	۲۱/۷	۶/۳	۲/۱	۷۸	۳۰
خرداد	۹۷۹	۶۲۳	۲۰/۰	۲۷/۸	۹/۳	۱/۵	۷۱	۲۵
تیر	۹۵۵	۶۱۶	۲۴/۳	۳۲/۸	۱۲/۷	۱/۵	۶۲	۲۲
مرداد	۹۲۴	۵۸۵	۲۵/۰	۳۴/۱	۱۳/۱	۱/۳	۵۸	۲۱
شهریور	۸۱۵	۴۴۸	۲۱/۵	۳۰/۹	۹/۲	۱/۱	۶۱	۲۰
مهر	۶۶۸	۳۱۲	۱۵/۴	۲۴/۱	۴/۹	۱/۳	۷۱	۲۶
آبان	۵۲۵	۲۰۷	۸/۷	۱۶/۰	۰/۹	۱/۲	۸۱	۳۷

*: برحسب کالری بر سانتی‌متر مربع بر روز. با توجه به عدم همگنی داده‌های تابش در ایستگاه فرودگاه، تابش کل خورشیدی با استفاده از مدل اصلاح شده دانشیار محاسبه گردیده است (۲۶).

کلاس سرد نیمه خشک (BSK) قرار دارد (۲۶). هم‌چنین بررسی‌های ۳۵ ساله داده‌های هواشناسی همدان حاکی از تبخیر سالانه ۱۵۰۴ میلی‌متر بر اساس آمار تشت تبخیر است (۳). جداول ۲ الی ۵ نتایج حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع به پارامترهای ورودی نظیر تابش کل، تابش رسیده به سطح زمین، دمای حداکثر، دمای حداقل و سایر پارامترهای هواشناسی در طول فصل رشد را نشان می‌دهند. جدول ۲ میزان حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به روش PMF56 در ازای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای مختلف هواشناسی را نشان می‌دهد. جدول ۲ حاکی از تأثیر قابل ملاحظه پارامتر R_s در خروجی ET_o در مقایسه با سایر پارامترها است. به طوری که با افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی مقدار R_s، در طول فصل رشد (اردیبهشت- آبان)، مدل PMF56 به ترتیب ۱۰/۱ و ۱۹/۴ درصد فرابرآورد ET_o را موجب می شود (با احتساب کل ماه‌های سال این مقادیر به ۷/۷ و ۱۵/۴ درصد کاهش می‌یابند). مشابه با نتایج آسلینگ (۱۰) می‌توان اذعان نمود که تبخیر و تعرق شدیداً به تابش کل (R_s) وابسته و با آن رابطه نسبتاً خطی دارد. متأسفانه فقدان شبکه منظم اندازه‌گیری تشعشع خورشیدی سبب محدودیت به کارگیری پارامتر تشعشع در مدل‌های تبخیر و تعرق می‌شود. هم‌چنین بر اساس نتایج جدول ۲، حساسیت مدلPMF56 به پارامتر دما در جایگاه دوم اهمیت قرار دارد.

براساس نتایج جدول ۲ ، افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی تابش، R_s موجب حد اکثر افزایش ET_o در شهریور ماه شد. بر خلاف R_s، برای تابش فوق جوی (R_a)، حداکثر حساسیت مدل PMF56 در تیر ماه مشاهده شد. این اختلاف زمانی بدین علت است که تابش فوق جوی تحت تأثیر عواملی نظیر مقدار ابرناکی، رطوبت هوا، آلبیدو، تعداد روزهای ابری و دیگر عوامل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

جدول ۲. دامنه حساسیت خروجی مدل تبخیر و تعرق مرجع PMF56 به ازای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای هواشناسی (کلیه مقادیر به درصد)

ماه	تابش کل (Rs)	تابش فوق جوی (Ra)	تابش خالص (Rn)	متوسط دما (Ta)	متوسط حداکثر دما (Tmax)	متوسط حداقل دما (Tmin)	سرعت باد دومتری	حداکثر رطوبت نسبی	حداقل رطوبت نسبی	ساعات آفتابی واقعی	آلبیدو
اردیبهشت	۸/۵*	۴/۷	۵/۸	۴/۹	۵/۲	۰/۲	۲/.	-۱/۲	-۱/۳	۲/۷	-۲/۴
	۱۶/۶**	۹/۴	۱۱/۵	۹/۷	۱۱/۲	۰/۴	۴/۱	-۲/۴	-۲/۶	۵/۳	-۴/۸
خرداد	۹/۷	۵/۳	۶/۵	۵/۱	۵/۵	۰/۳	۲/۰	-۰/۵	-۰/۶	۳/۳	-۲/۷
	۱۸/۷	۱۰/۸	۱۲/۱	۱۰/۲	۱۲/۰	۰/۶	۴/	-۱/۱	-۱/۲	۶/۵	-۵/۳
تیر	۱۰/۳	۵/۴	۶/۵	۵/۴	۶/۲	۰/۵	۲/۳	-۰/۲	-۰/۳	۳/۳	-۲/۷
	۱۹/۵	۱۰/۸	۱۲/۱	۱۰/۸	۱۳/۶	۱/۱	۵/۵	-۰/۵	-۰/۶	۶/۷	-۵/۵
مرداد	۱۰/۵	۵/۱	۶/۴	۵/۸	۶/۷	۰/۶	۲/۵	-۰/۲	-۰/۲	۳/۲	-۲/۷
	۱۹/۸	۱۰/۳	۱۲/۰	۱۱/۴	۱۴/۷	۱/۲	۵/۸	-۰/۴	-۰/۵	۶/۴	-۵/۵
شهریور	۱۰/۸	۴/۹	۶/۴	۵/۶	۶/۱	۰/۳	۲/۵	-۰/۲	-۰/۲	۳/۱	-۳/۰
	۲۰/۸	۹/۸	۱۲/۴	۱۱/۳	۱۳/۳	۰/۷	۵/۵	-۰/۳	-۰/۴	۶/۱	-۶/۱
مهر	۱۰/۲	۳/۹	۵/۷	۵/۷	۶/۰	۰/۲	۲/۹	-۰/۵	-۰/۷	۲/۴	-۲/۹
	۲۰/۰	۷/۸	۱۱/۷	۱۱/۸	۱۲/۹	۰/۳	۵/۹	-۱/۱	-۱/۵	۴/۷	-۵/۹
آبان	۱۰/۱	۲/۷	۵/۳	۴/۴	۴/۵	۰/۰۴	۳/۰	-۱/۴	-۱/۷	۱/۵	-۳/۰
	۲۰/۱	۵/۵	۱۱/۷	۹/۱	۹/۵	۰/۰۷	۵/۲	-۲/۹	-۳/۶	۳/۱	-۶/۰

*: افزایش ۱۰ در صد پارامترها

** : افزایش ۲۰ در صد پارامترها

جدول ۳ . دامنه حساسیت خروجی مدل تبخیر و تعرق مرجع [HS] به ازای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای هواشناسی (کلیه مقادیر به درصد)

ماه	تابش فوق جوی (R_a)	متوسط دما (T_a)	حداکثر دما (T_{max})	حداقل دما(T_{min})	
				-%	+%
اردیبهشت	۱۰	۴/۵	۶/۸	۶/۸	-۲/۱
	۲۰	۹/۱	۱۲/۲	۱۳/۲	-۴/۱
خرداد	۱۰	۵/۳	۷/۲	۷/۲	-۲/۵
	۲۰	۱۰/۵	۱۴/۱	۱۴/۱	-۵/۱
تیر	۱۰	۵/۷	۷/۸	۷/۸	-۳/۲
	۲۰	۱۱/۵	۱۵/۱	۱۵/۱	-۶/۵
مرداد	۱۰	۵/۸	۷/۸	۷/۸	-۳/۱
	۲۰	۱۱/۷	۱۵/۱	۱۵/۱	-۶/۴
شهریور	۱۰	۵/۴	۶/۹	۶/۹	-۲/۱
	۲۰	۱۰/۹	۱۳/۳	۱۳/۳	-۴/۳
مهر	۱۰	۴/۶	۶/۱	۶/۱	-۱/۲
	۲۰	۹/۳	۱۱/۸	۱۱/۸	-۲/۶
آبان	۱۰	۳/۳	۵/۱	۵/۱	-۰/۳
	۲۰	۶/۵	۱۰/۱	۱۰/۱	-۰/۶

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

دینامیکی جو قرار ندارد. لذا زمان وقوع حداکثر حساسیت تحت تأثیر زمان وقوع حد اکثر تابش فوق جوی (اواخر خرداد) قرار می‌گیرد.

در جدول ۲ اثر افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی ضریب آلبیدو بر ET_o نیز نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در اغلب مطالعات، اثر تغییرات ضریب آلبیدو بر ET_o و معادلات چرخه آب ناچیز در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که بر اساس نتایج جدول ۲ تأثیر ضریب آلبیدو می‌تواند در حد تأثیرات سرعت باد باشد. به این ترتیب، افزایش ضریب آلبیدو بویژه در مناطق صنعتی (۳۰)، آلوده و بیابانی و تأثیر آن بر کاهش ET_o به عنوان خنثی کننده بخشی از اثرات منفی گرمایش جهانی قابل تأمل است.

در جدول ۳ تغییرات نیاز آبی بر اساس مدل‌هارگریوز-سامانی (۱۵) به عنوان یکی از مدل‌های دمایی محاسبه شده است. محمدیان و همکاران (۹) نشان دادند که میزان خطای برآورد تبخیر و تعرق به روش هارگریوز-سامانی برای ایستگاه سینوپتیک گلمکان (مشهد) قابل ملاحظه نیست (کمتر از ۳ در صد). این در حالی است که بر اساس نتایج تحقیق حاضر، هر ۱۰ درصد خطا در پارامترهای دمایی می‌تواند تا ۷/۸ درصد (حداکثر حساسیت Tmax در تیر ماه) خطا را در خروجی مدل در طول دوره رشد ایجاد نماید.

جدول ۴ درصد حساسیت تبخیر و تعرق مرجع به ازای ۱۰ و ۲۰ درصد افزایش پارامترهای هواشناسی به روش‌های جنسن- هیز (۱۷) و تورک (۲۹) را نشان می‌دهد. بنا به نظر رزنبرگ (۲۵)، مدل جنسن- هیز تبخیر و تعرق را در شرایط واحه‌ای خیلی کمتر از واقعیت برآورد می‌کند، به طوری که مدل جنسن- هیز اصلاح شده نیز نتوانست مشکل فوق را بر طرف نماید. این امر ممکن است به علت تأثیر نسبتاً شدید دما و تابش (جدول ۴) و امکان افزایش خطا در خروجی مدل جنسن- هیز باشد.

حساسیت مدل‌های مک کینک و هنسن به پارامترهای ورودی در جدول ۵ نمایش داده شده است. مدل مک کینک نشان‌دهنده کاهش تبخیر و تعرق تأثیر ماه به واسطه افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی فشار بخار آب است. بر خلاف دیگر مدل‌های مورد مطالعه، پس از تیر ماه مقدار حساسیت افزایش یافته است. مقایسه روند تغییرات حساسیت مدل‌های مک کینک و هنسن به پارامتر فشار بخارآب (جدول ۵) عکس روند تغییرات تابش فوق جوی در مدل PMF56 است. علت این امر این است که مقدار فشار بخار آب رابطه مستقیم با دمای هوا (T_a) در ماه مربوطه دارد. در حالی که تابش فوق جوی صرفا" تابع موقعیت فصلی خورشید است. با توجه به جدول ۵ مشاهده می‌شود که در مدل‌های MK و HN، روند کاهش حساسیت تا مرداد ماه برای دمای هوا (همگام با فشار بخار آب) نیز وجود دارد.

لازم به ذکر است که مدل مک کینک جهت محاسبه مقادیر مطلق تبخیر تعرق مرجع در اقالیم مرطوب سرد نتایج خوبی ارائه نموده است، در حالی که در مناطق خشک نتایج رضایت بخش نبوده است (۲۱). ولی با توجه به اینکه هدف این تحقیق قیاس نسبی حساسیت مدل‌ها میباشد، حساسیت این مدل نیز جهت مقا یسه با نتایج سایر مدل‌ها تحت بررسی قرار گرفت.

از آن‌جایی که یکی از اهداف فرعی این تحقیق بررسی تغییرات تبخیر تعرق مرجع به ازای افزایش دمای پیش بینی شده برای سال ۱۴۲۹ شمسی (۲۰۵۰ میلادی) بود، لذا درصد فرابرآورد تبخیر تعرق مرجع را به ازای افزایش ۲/۷ درجه (۱۹) دما با مدل‌های مختلف نیز محاسبه گردید (جدول ۶). همانطور که در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد، درصد افزایش ET_o تا سال ۱۴۲۹ شمسی که توسط مدل‌های مختلف پیش بینی شده است بسیار متفاوت می‌باشد. به طوری که مقدار افزایش پیش بینی شده ET_o توسط مدل MK تقریبا" ۳/۵ برابر افزایش پیش بینی شده توسط مدل JH2 می‌باشد. لذا می بایست احتیاط لازم در انتخاب مدل مناسب جهت پیش بینی افزایش نیاز آبی گیاه بعمل آید. با توجه به تأکید سازمان کشاورزی و خواروبار جهانی (فائو)، مبنی بر استفاده از مدل ترکیبی PMF56 در مناطق خشک و نیمه خشک، مقدار در صد افزایش ET_o تا سال ۱۴۲۹ در شرایط اقلیمی استان همدان به طور متوسط با مدل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

جدول ۴. دامنه حساسیت خروجی مدل‌های تبخیر و تعرق مرجع [$JH_{1,2}$]، [TH] و [TA] به ازای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای هواشناسی (کلیه مقادیر به درصد)

ماه	جنسن- هیز ۱ [JH_1]			جنسن- هیز ۲ [JH_2]			تورک برای مناطق خشک [TA]		تورک برای مناطق مرطوب [TH]	
	تابش کل (Rs)	متوسط دما (T_a)	متوسط رطوب نسبی	متوسط دما (T_a)	متوسط رطوب نسبی	تابش کل(Rs)	متوسط دما (T_a)	متوسط رطوب نسبی	تابش کل(Rs)	متوسط دما (T_a)
اردیبهشت	۱۰	۶/۳	NI	۸/۲	NI	۹/۱	۴/۸	-۷/۴	۹/۱	۴/۸
	۲۰	۱۲/۷		۱۶/۴		۱۸/۳	۹/۱	-۱۴/۷	۱۸/۳	۹/۱
خرداد	۱۰	۶/۷	NI	۸/۶	NI	۹/۲	۴/۰	-۵/۷	۹/۲	۴/۰
	۲۰	۱۳/۴		۱۷/۲		۱۸/۵	۷/۷	-۱۱/۴	۱۸/۵	۷/۷
تیر	۱۰	۶/۸	NI	۸/۸	NI	۹/۲	۳/۶	-۴/۵	۹/۲	۳/۶
	۲۰	۱۳/۷		۱۷/۶		۱۸/۵	۶/۸	-۹/۱	۱۸/۵	۶/۴
مرداد	۱۰	۶/۸	NI	۸/۸	NI	۹/۲	۳/۵	-۴/۱	۹/۲	۳/۵
	۲۰	۱۳/۷		۱۷/۷		۱۸/۹	۶/۶	-۸/۲	۱۸/۴	۶/۶
شهریور	۱۰	۶/۶	NI	۸/۷	NI	۹/۱	۳/۸	-۴/۲	۹/۱	۳/۸
	۲۰	۱۳/۳		۱۷/۴		۱۸/۳	۷/۳	-۸/۴	۱۸/۳	۷/۳
مهر	۱۰	۶/۲	NI	۸/۲	NI	۸/۹	۴/۹	-۵/۹	۸/۹	۴/۷
	۲۰	۱۲/۵		۱۶/۵		۱۷/۹	۸/۹	-۱۱/۸	۱۷/۹	۸/۹
آبان	۱۰	۵/۲	NI	۷/۳	NI	۸/۵	۶/۱	-۹/۳	۸/۵	۶/۱
	۲۰	۱۰/۵		۱۴/۶		۱۷/۱	۱۱/۸	-۱۸/۷	۱۷/۱	۱۱/۸

NI : این متغیر در مدل موجود نمی‌باشد.

توصیه شده حدود ۸/۵ درصد پیش‌بینی می‌گردد (جدول ۶). در شرایطی که ایستگاه کامل هواشناسی (سینوپتیک) با داده‌های معتبر تابش در منطقه مورد مطالعه موجود باشد، به کار گیری مدل‌های ترکیبی نظیر مدل PMF56 جهت پیش‌بینی تبخیر- تعرق مرجع مناسب‌تر می‌باشند، زیرا احتمال همپوشانی خطاهای مثبت و منفی پارامترهای مختلف در مدل (نظیر دما، تابش، رطوبت، ضریب آلبیدو) میانگین خطای اریب (Mean Bias Error) خروجی مدل PMF56 را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که طبق نتایج جدول ۲، ضرایب حساسیت برخی پارامترهای هواشناسی (مانند رطوبت و آلبیدو) دارای گرایش منفی است که این امر می‌تواند بخشی از خطاهای مثبت ایجاد شده توسط دیگر پارامترها (مانند تابش و دما) را در مدل خنثی نماید.

با توجه به نتایج به‌دست آمده در جداول ۲ الی ۵، رفتار حساسیت مدل‌های مختلف مورد مطالعه به پارامترهای هواشناسی در محدوده تغییرات اعمال شده به صورت زیرجمع‌بندی می‌شود:

تابش کل (R_s)

تقریباً همه مدل‌ها به تابش کل حساسیت زیادی نشان می‌دهند (با میانگین ۹/۵ در صد به ازای ۱۰ % تغییر در تابش ورودی)، ولی در مجموع مدل محاسباتی تبخیر و تعرق مرجعِ تورک

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

جدول ۵ . دامنه حساسیت خروجی مدل‌های تبخیر و تعرق مرجع [MK] و [HN] به ازای افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی پارامترهای هواشناسی (کلیه مقادیر به درصد)

ماه	مدل [HN]			مدل [MK]		
	تابش کل (Rs)	فشار بخار آب	متوسط دما(Ta)	تابش کل (Rs)	فشار بخار آب (e)	متوسط دما(Ta)
اردیبهشت	۱۰	۳/۱۳	۲/۷۶	۹/۶۹	۳/۰۳	۲/۶۸
	۲۰	۵/۹۰	۴/۹۹	۱۹/۳۸	۵/۷۲	۴/۸۳
خرداد	۱۰	۲/۵۵	۲/۵۹	۹/۷۵	۲/۴۹	۲/۵۳
	۲۰	۴/۷۹	۵/۱۱	۱۹/۵۰	۴/۶۷	۴/۹۸
تیر	۱۰	۲/۱۵	۲/۳۱	۹/۷۷	۲/۱۰	۲/۲۵
	۲۰	۴/۰۱	۴/۹۰	۹/۵۵	۳/۹۲	۴/۷۹
مرداد	۱۰	۲/۰۸	۲/۲۸	۹/۷۶	۲/۰۳	۲/۲۳
	۲۰	۳/۸۸	۴/۸۵	۱۹/۵۳	۳/۷۹	۴/۷۳
شهریور	۱۰	۲/۴۰	۲/۳۷	۹/۷۳	۲/۳۳	۲/۳۰
	۲۰	۴/۴۹	۵/۰۲	۱۹/۴۵	۴/۳۷	۴/۸۹
مهر	۱۰	۳/۰۵	۲/۳۳	۹/۶۲	۲/۹۴	۲/۲۵
	۲۰	۵/۷۵	۵/۰۱	۱۹/۲۴	۵/۵۳	۴/۸۲
آبان	۱۰	۳/۹۲	۲/۰۸	۹/۳۹	۳/۶۸	۱/۹۵
	۲۰	۷/۴۴	۴/۰۳	۱۸/۷۸	۶/۹۸	۳/۷۹

جدول ۶ . افزایش (درصد) پیش‌بینی شده (تا سال ۱۴۲۹) مقدار تبخیر- تعرق مرجع (ETo) با مدل‌های مختلف به ازای افزایش گرمایش جهانی به مقدار ۲/۷ درجه سانتی‌گراد در همه ماه‌ها

ماه	PMF56	HS	JH_1	JH_2	TA	TH	HN	MK
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
اردیبهشت	۱۰/۱۷	۱۰/۳۶	۱۳/۷۳	۱۷/۷۳	۱۰/۳۶	۱۰/۳۶	۵/۹۳	۵/۷۸
خرداد	۶/۷۵	۵/۸۷	۸/۳۸	۱۱/۶۲	۵/۴۶	۵/۴۶	۳/۴۹	۳/۴۱
تیر	۶/۱	۵/۵۸	۷/۵۷	۹/۸۰	۳/۹۸	۳/۹۸	۲/۵۶	۲/۴۹
مرداد	۶/۲	۶/۲۵	۷/۳۲	۹/۴۸	۳/۷۷	۳/۷۷	۲/۴۳	۲/۳۸
شهریور	۶/۹۲	۶/۸۳	۸/۳۲	۱۰/۲۵	۴/۸۳	۴/۸۳	۲/۹۶	۲/۸۷
مهر	۹/۴۵	۸/۰۵	۱۰/۸۸	۱۴/۴۹	۸/۵۵	۸/۵۵	۴/۰۷	۳/۹۳
آبان	۱۳/۷۹	۱۰/۱۶	۱۶/۱۸	۲۲/۶۳	۱۸/۹۱	۱۸/۹۱	۶/۴۴	۶/۰۴

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

(THو TA) در طول فصل رشد حدود یک در صد (به ازای ۱۰% تغییر در R_s) کمتر از سایر مدل‌ها به تغییرات R_s حساسیت نشان می‌دهد. ضمناً در طول ماه‌های رشد، بیشینه حساسیت در ماه‌های گرم سال مشاهده شد.

دمای متوسط (T_a)

در بین مدل‌های مورد مطالعه، مدل جنسن-هیز۲ (JH_2) به تغییرات دمای متوسط بیشترین حساسیت را نشان داد (۷/۳ الی ۸/۸ درصد به ازای ۱۰ درصد افزایش دما). بر خلاف مدل JH_2، مدل مک کینک (MK) کمترین حساسیت را به تغییرات T_a دارد (۱/۹ الی ۲/۶ درصد افزایش ET_o به ازاء ۱۰ درصد افزایش دما). در طول ماه‌های رشد، بیشینه حساسیت به تغییرات T_a در ماه‌های گرم (تیر – مرداد) مشاهده گردید.

متوسط دمای حداکثر (T_{max})

نتایج محاسبات نشان داد که مدل‌های هارگریوز- سامانی (HS) و PMF56 دارای حساسیت نسبتاً زیادی به تغییرات دمای حداکثر می باشند. در بین مدل‌های تحت بررسی، مدل HS حداکثر حساسیت را به T_{max} در محاسبات تبخیر تعرق مرجع نشان داد . لازم به ذکر است که در محاسبه اثر بخشی حساسیت T_{max}و T_{min} در معادلات و مدل‌های تبخیر و تعرق، می‌توان به دو صورت عمل نمود: الف) تغییر پارامترها با ثابت نگه داشتن دمای متوسط (T_a)، و ب) تغییر با شناور کردن دمای متوسط. در این تحقیق پس از تغییر T_{max} و T_{min} مقدار دمای متوسط (T_a) ثابت نگه داشته شد. لازم به ذکر است که در شرایط واقعی جو، تغییر دمای حداکثر و حداقل، غالباً تغییر دمای متوسط را به دنبال دارد. مشابه بقیه پارامترها، در طول ماه‌های رشد بیشترین حساسیت مدل‌ها بهT_{max} در ماه‌های گرم سال به وقوع پیوست.

متوسط دمای حداقل (T_{min})

جهت تعیین حساسیت مدل‌های تبخیر و تعرق HS و PMF56 به تغییرات T_{min}، به شرط ثابت ماندن دمای متوسط (T_a)، مقدار T_{min} در محدوده ۱۰± الی ۲۰± درصد تغییر داده شد. در این حالت، نتایج محاسبات در طول فصل رشد (اردیبهشت- آبان) نشان داد که افزایش T_{min} (بالا رفتن حداقل دمای شبانه به شرط ثابت ماندن میانگین دمای شبانه‌روزی) در مدل‌هارگریوز- سامانی منجر به کاهش ET_o می گردد (جدول ۳) و میزان تغییرات در ماه‌های گرم تیر و مرداد بیش ازسایر ماه‌ها می‌باشد. با توجه به اینکه در شرایط واقعی جو، بالا رفتن حداقل دمای شبانه می بایست منجر به افزایش تبخیر و تعرق گیاه شود، لذا تحت شرایط فرض شده (ثابت ماندن دمای متوسط)، (جدول ۳)، مدل‌هارگریوز- سامانی جهت برآورد ETo توصیه نمی‌شود.

حداکثر و حداقل رطوبت نسبی (RH)

از بین مدل‌های تحت بررسی، دو مدل PMF56 و تورک برای مناطق خشک به پارامتر رطوبت نسبی(RH) حساسیت بیشتری نشان دادند (جداول ۲ و ۴). به طوری که با افزایش یا کاهش رطوبت نسبی مقدار ET_o حاصل از این مدل‌ها به تناسب کمتر یا بیشتر می‌شود. نتایج بررسی نشان داد که با افزایش حد اکثر رطوبت نسبی (RH_{max}) به مقدار ۱۰ درصد، ET_o حاصل از مدل PMF56 حدودا" بین ۰/۲الی ۱/۵ درصد درطول فصل رشد کاهش می‌یابد (جدول ۲). بر خلاف دما و تابش، در مدل‌های ذکر شده حد اکثر حساسیت در ماه‌های سرد (آبان) مشاهده گردید. علت این امر بالا بودن مقدار رطوبت نسبی همدان در ماه‌های سرد سال است. مشابه بقیه پارامترهای ورودی، روند حساسیت مدل‌ها به تغییرات RH_{max} رفتار نسبتاً خطی را نشان داد، به طوری که افزایش ۲۰ درصدی RH_{max} به کاهش حدود ۰/۴ الی ۳ درصدی ET_o منجر شد. نتایج آزمون حساسیت برای RH_{min} نیز تقریباً مشابه RH_{max} به‌دست آمد، با این تفاوت که دامنه حساسیت مدل PMF56 به تغییرات RH_{min} کمی بیش از RH_{max} می‌باشد.

مقایسه حساسیت دو مدل PMF56 و TA به رطوبت نسبی (RH) نشان داد که مدل TA (تورک برای مناطق خشک) نسبت به RH حساسیت بیشتری دارد (جداول۲ و ۴). مشابه مدل

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

PMF56، در مدل تورک مناطق خشک (TA) بیشینه حساسیت در سرد ترین ماه فصل رشد (آبان) مشاهده شد به طوری که افزایش ۱۰ درصدی RH در مدل فوق به کاهش ۹/۳ درصدی ET_o در ماه آبان منجر گردید. لذا با توجه به دامنه خطای نسبتاً زیاد ادوات اندازه‌گیری رطوبت نسبی در ایستگاه‌ها، در به کارگیری مدل تورکِ مناطق خشک در ماه‌های سرد سال می‌بایست احتیاط لازم به عمل آید. کمترین حساسیت مدل تورک به RH (۴/۱ درصد کاهش ET_o به ازای ۱۰ درصد افزایش RH) در گرم‌ترین ماه سال (مرداد) به وقوع پیوست.

ضریب آلبیدو

با توجه به این که تأثیر ضریب البیدو بر ET_o به طور مستقیم در فرمول‌های محاسباتی ظاهر نمی‌گردد، مطالعه‌ای که حساسیت مدل‌های تبخیر و تعرق را به این پارامتر نشان دهد تاکنون در ایران انجام نگرفته است. در مطالعه حاضر تأثیر ضریب آلبیدو به طور غیر مستقیم فقط در مدل PMF56 دیده می‌شود. براساس نتایج به‌دست آمده (جدول ۲) ضریب آلبیدو رابطه معکوس با مقدار ET_o دارد. به طوری که پیش‌بینی می‌شود که افزایش احتمالی ضریب آلبیدوی کره زمین در سال‌های اخیر (۳۰) (به دلیل افزایش فعالیت‌های صنعتی) منجر به کاهش ET_o گردد. همان‌طور که در جدول ۲ دیده می شود، افزایش ۱۰ درصدی آلبیدو موجب ۲/۴ الی ۳ درصد کاهش نیاز آبی گیاه مرجع گردیده است. براساس نتایج آزمون حساسیت مدل PMF56، اهمیت تأثیر ضریب آلبیدو، تقریباً مشابه اثر سرعت باد است (تأثیر ۱۰ درصد افزایش آلبیدو تقریباً معادل تأثیر ۱۰ در صد کاهش سرعت باد در منطقه است). لذا توصیه می‌شود که جهت تخمین ET_o در شرایط مزرعه، حتی‌الامکان به جای مقادیر شبیه‌سازی شده و ثابت (۰/۲۳)، از مقادیر دقیق اندازه‌گیری شده آلبیدو در معادلات ترکیبی مانند مدل PMF56 استفاده شود.

نتیجه‌گیری

محاسبات انجام شده در محدوده تغییرات ۱۰ الی ۲۰ درصد پارامترهای هواشناسی یک روند نسبتا خطی را برای حساسیت اغلب مدل‌های تخمین تبخیر و تعرق به تغییرات اعمال شده نشان می‌دهند. به طوری که حساسیت مدل‌ها مورد مطالعه به ۲۰ در صد تغییر در مقدار ورودی، تقریباً دو برابر تغییر ایجاد شده حاصل از ۱۰ در صد تغییر در ورودی می‌باشد. نتایج نشان داد که اغلب این مدل‌ها، بیشترین حساسیت را به پارامتر تابش کل رسیده به زمین (R_s) نشان می‌دهند (با میانگین ۹/۵ در صد به ازای ۱۰ % تغییر در تابش ورودی). لذا ضروری است احتیاط و دقت لازم در خصوص استفاده از داده‌های تابش (چه داده‌های اندازه‌گیری شده و چه داده‌های تابش شبیه‌سازی شده با مدل‌های تابش) در مدل‌های محاسباتیET_o به عمل آید.

از بین مؤلفه‌های مختلف تابش، تابش کل رسیده به سطح زمین (R_s)، در مقایسه با تابش خالص (R_n) و تابش فوق جوی (R_a)، تغییرات بیشتری را در خروجی مدل‌های تبخیر و تعرق موجب گردید. علاوه بر این، حساسیت اغلب مدل‌هایET_o به تابش کل ورودی (R_s) با اختلاف ناچیزی تقریباً مشابه است، ولی معمولاً در طول فصل رشد به دلیل بالا بودن ضریب شفافیت جو و افزایش ساعات آفتابی، حساسیت مدل‌های ET_o در ماه‌های تیر و مرداد بیشتر ازسایر ماه‌ها می‌باشد. بعد از پارامتر تابش، پارامترهای دمایی بیشترین تغییرات را در خروجی مدل‌های ET_o موجب شدند (با میانگین حساسیت ۵ درصد تغییر در ET_o به ازای ۱۰ در صد افزایش دما). با توجه به دقت بالای دماسنج‌های موجود در شبکه ایستگاه‌های هواشناسی (در حد ۰/۱ درجه سانتی‌گراد)، استفاده از مدل‌های ET_o با مبنای دمایی در مناطق فاقد داده‌های تابش، گزینه مناسبی جهت برآورد نسبی تبخیر-تعرق مرجع است. ضمناً، مدل‌های ET_o به پارامتر دمای حد اکثر (T_{max}) حساسیت بیشتری در مقایسه با میانگین دما (T_a) نشان دادند. این موضوع با توجه به نقش مهم دمای حداکثر در تغییرات اخیر اقلیمی (۳۱)، نیازمند مطالعات بیشتری می‌باشد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

با توجه به حساسیت مدل PMF56 به داده‌های ورودی، بعد از تابش و دما، پارامترهای ساعات آفتابی (n)، ضریب آلبیدو، سرعت باد (u_2) و رطوبت نسبی (RH) به ترتیب در درجات اهمیت بعدی قرار دارند.

نکته قابل تأمل از مدل‌های PMF56 و هارگریوز- سامانی مؤید این واقعیت است که افزایش دمای متوسط کره زمین که بیشتر به علت افزایش دمای حداکثر روزانه T_{max} به وقوع پیوسته (۳۰)، تبخیر و تعرق (نیاز آبی) بیشتری را در خروجی مدل‌های فوق موجب گردیده است (در مقایسه با دیگر پارامترهای دمایی). لذا اگر حتی تغییری در میانگین دمای هوا (T_a) در دراز مدت رخ ندهد، نوسانات متوسط دمای حد اکثر روزانه (T_{max}) و متوسط حداقل دمای شبانه (T_{min}) می‌تواند تغییراتی را در مقدار ET_o ایجاد نماید.

در مطالعه جاری، حساسیت مدل‌ها به پارامترهای هوا شناسی به صورت تک متغیره (تغییر یک پارامتر و ثابت فرض نمودن بقیه پارامترها) بررسی گردیده است. در شرایط واقعی جو، به علت وجود پس خوردها، در اثرتغییر یک پارامتر، دیگر پارامترهای هواشناسی متعاقباً تحت تأثیر قرار می‌گیرند. به دلیل پیچیدگی ارتباط هم‌زمان بین پارامترهای هواشناسی، این موضوع تا کنون در ایران بررسی نشده است. به کارگیری مدل‌های جامع دینامیک جو نظیر مدل‌های منطقه‌ای GFDL، UKMO، MM5 و دیگر مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) جهت پیش‌بینی هم‌زمان متغیرهای هواشناسی، در آینده این امکان را میسر می‌نماید

توصیه می‌شود قبل از انتخاب مدل نهایی برآورد تبخیر و تعرق مرجع در یک منطقه، علاوه بر ملحوظ نمودن داده‌های تجربی (شاهد) لایسیمترها، ابتدا لازم است که حساسیت مدل‌های پیشنهادی به پارامترهای هواشناسی ارزیابی گردد، و سپس براساس داده‌های هواشناسی قابل دسترس در منطقه، میزان صحت داده‌ها، محدوده دقت ادوات اندازه‌گیری پارامترهای مستقر در ایستگاه، به انتخاب مدل نهایی برآورد ET_o در منطقه مورد مطالعه اقدام نمود. در شرایطی که داده‌های مورد نیاز روش‌های ترکیبی در دسترس نباشد و یا صحت برخی داده‌های اندازه‌گیری شده مورد اطمینان نباشد، روش‌های دمایی که دارای تعداد متغیرهای کمتری هستند توصیه می‌شوند. در خاتمه، ذکر این نکته ضروری است که علی‌رغم پاسخ خطی مدل‌های تبخیر و تعرق به سیگنال‌های اعمال شده، به دلیل فیزیولوژی پیچیده گیاه، پاسخ واقعی گیاهان به نوسانات اقلیمی ممکن است خطی نباشد. بررسی دقیق این موضوع به مطالعات میدانی جامعی نیازمند است.

منابع مورد استفاده

۱. تفضلی، ف. ۱۳۸۵. ارزیابی حساسیت مدل‌های برآورد تبخیرو تعرق به تابش ورودی روزانه در شرایط اقلیمی همدان. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۲. سازمان هواشناسی کشور ۱۳۸۴. داده‌های هواشناسی دوره اقلیمی ۱۳۵۰ الی ۱۳۸۴. مرکز اطلاعات و آمار، تهران.

۳. سبزی پرور، ع. ا. ۱۳۷۹. مطالعه سینوپتیکی خشکسالی هواشناسی استان همدان. طرح تحقیقاتی، سازمان هواشناسی کشور، تهران.

۴. شریفیان، ح.، ب. قهرمان، ا. علیزاده، و س. م. میرلطیفی. ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق مرجع (ترکیبی و دمایی) با روش استاندارد و بررسی اثرات خشکی هوا بر آن. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی (۱)۱۳: ۱۸-۲۹.

۵. ضیاء تباراحمدی، م. خ. ۱۳۷۴. بررسی و مقایسه روش‌های محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل در استان مازندران. نیوار ۲۸: ۴۰-۵۵.

۶. علیزاده، ا.، غ. کمالی، ف. موسوی و م. موسوی بایگی. ۱۳۸۳. *هوا و اقلیم شناسی*. چاپ ششم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

۷. ناصری، ع .ع.، ا. محسنی‌موحد، ح ع. کشکولی، م.ر. احسانی و ح. زارع ابیانه. ۱۳۷۸. ارزیابی روش‌های تجربی برآورد تبخیر و

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]

تعرق پتانسیل در منطقه همدان. مجله پژوهش کشاورزی ۱ (۱): ۳۹-۴۹.

۸. نیک‌بخت، ج.، س. م. میرلطیفی، و غ. ع. کمالی. ۱۳۸۰. مقایسه تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش‌های فائو-پنمن-مانتیث، پنمن-رایت و هارگریوز-سامانی در منطقه تهران. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی ۸(۴): ۳-۱۳.

۹. محمدیان، آ.، ا. علیزاده، و م. نصیری محلاتی. ۱۳۸۵. بررسی تأثیر خشکی ایستگاه بر دما، رطوبت و تبخیر- تعرق مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه‌های سینوپتیک مشهد و گلمکان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی. ۱۳ (۱): ۱۰-۱۸.

10. Aslyng, H.C. 1974. Evapotranspiration and Plant Production directly related to global radiation. Nordic Hydrol. 5: 247-256.
11. Allen, R.G., L.S. Raes Pereira and M. Smith. 1998**.** Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56, Rome.
12. Doorenbos, J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrig. And Drain. Paper No. 24. Food and Agric. Org. (FAO), Rome, Italy.
13. Goyal, R. K. 2004. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). Agric. Water Manag. 69: 1-11.
14. Hansen, S. 1984. Estimation of potential and actual evapotranspiration. Nordic Hydrol. 15: 205-212.
15. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature .Appl. Eng. in Agric. 1(2): 96-99.
16. IPCC, 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change,WMO-UNDP, United Nations, Executive Summary Report. Cambridge University Press, New York, USA.
17. Jensen, M. E. and H. R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. J. Irrig. and Drain. ASCE 89: 15-41.
18. Jensen, M.E., R.D. Burman and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 70, American Society of Civil Engineers, New York.
19. Koocheki, A., M. Nasiri, G.A. Kamali and H. Shahandeh. 2006. Potential impacts of climate change on agro climatic indicators in Iran. Arid Land Res. and Manag. 20: 245-259.
20. Ley, T.W., R.W. Hill and D.T. Jensen. 1994. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses Trans. ASCE 37(6): 1853-1861.
21. Makkink, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeter. J. the Inst. of Water Eng. 11: 227-288.
22. Meyer, S.J., K.G. Hubbard and D.A. Wilhite. 1989. Estimation of potential evapotranspiration: The effects of random and systematic errors. Agric. Forest Meteorol. 56(4): 285-296.
23. Penman, H.L. 1963. Vegetation and hydrology. Comm. Agriculture Bureau. Tech. Communication No. 53.
24. Piper, B. S. 1989. Sensitivity of Penman estimates of evapotranspiration to errors in input data. Agric. Water Manag. 15(3): 279-300.
25. Rosenberg, N.J. 1974. Microclimate: the Biological Environment. Juhn Wiley Pub., New York.
26. Sabziparvar, A.A. 2007. General formula for estimation of monthly mean global solar radiation in different climates on the south and north coasts of Iran. Int. J. Photoenergy (e. Journal), doi:10.1155/ j.photoenergy.
27. Saxton, K.E. 1975. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. Agric. Forest Meteorol. 15(3): 343-353.
28. Temesgen, B., R.G. Allen, and D.T. Jensen. 1999. Adjusting temperature parameters to reflect well-watered conditions. J. Irrg. and Drain. Eng. ASCE 125(1): 26-33.
29. Turc, L.J. 1970. Evaporation of brine: a field study of the Bonneville Salt Flats. Utah Water Resour. Res. 6: 1209–1215.
30. Weisenstein, D.K., G.K. Yue, M.K.W. Ko, N.D. Sze, J.M. Rodriguez and C.J. Scott. 1997. A two-dimensional model of sulfur species and aerosols. J. Geophys. Res. 102: 13019-13035.
31. Zhang, X.B, E. Aguilar, S. Sensoy, H. Melkonyan, U. Tagiyeva, N. Ahmed, N. Kutaladze, F. Rahimzadeh, A. Taghipour, T.H. Hantosh, P. Albert, M. Semawi, M. Ali, MK. Al-shabibi, MHS. Al-OulanZ. Ztari, T. Khelet, I. A. Hamoud, S. Sagir, R. Demircan, M. Eken, M. Adiguzel, L. Alexaneder, T.C. Peterson and T. Walli. 2005. Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003. J. Geophys. Res., D: Atmospheric 110 (22): 1-12.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-28]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1387.12.46.44.3]