ارزیابی دو مدل ترکیبی برآورد تبخیر- تعرق مرجع چمن در بازه زمانی ساعتی (مطالعه موردی اقلیم کرمان)

بهرام بختیاری[۱*]، عبدالمجید لیاقت[۲]، علی خلیلی[۲] و محمد جواد خانجانی[۳]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۲/۷ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۷/۸/۱۹)

چکیده

در این مطالعه از مدل‌های پنمن- مونتیث فائو-۵۶ و پنمن- مونتیث انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE) جهت برآورد تبخیر- تعرق مرجع چمن (ET_o) در بازه زمانی ساعتی در اقلیم نیمه خشک کرمان استفاده گردیده است. مقادیر ساعتی حاصل از دو مدل فوق با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی الکترونیکی طی ماه‌های فروردین لغایت شهریور سال ۱۳۸۴ (تعداد ۳۳۵۲ داده ET_o ساعتی) مورد مقایسه قرار گرفتند. تحلیل رگرسیون خطی و آماره‌های مربوطه از جمله جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق (d) جهت مقایسه مقادیر مشاهداتی و محاسباتی به کار برده شد. میانگین داده‌های ساعتی اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط هر یک از روش‌ها برای داده‌های یکپارچه شده، به ترتیب برابر ۰/۲۸ و۰/۲۳ میلی‌متر بر ساعت به دست آمد، به طوری‌که میانگین مقادیر ET_o محاسبه شده در حدود ۲۱٪ کمتر از میانگین مقادیر ET_o اندازه‌گیری شده می‌باشد. این تحلیل به تفکیک برای داده‌های ساعتی مربوط به هر یک از ماه‌های مطالعاتی نیز انجام پذیرفته است. مقایسه مقادیر حاصل از روش پنمن- مونتیث فائو-۵۶ و مقادیر مشاهداتی نمایانگر برآورد کم ET_o محاسباتی به میزان ۱۸/۴٪، ۱۹/۳٪، ۲۶/۳٪، ۲۰/۴٪، ۲۱/۴٪ و ۲۲/۱٪ به ترتیب برای ماه‌های فروردین لغایت شهریور بود. برآورد کم مقادیر محاسباتی توسط روش پنمن- مونتیث ASCE نسبت به مقادیر لایسیمتری برای هر یک از ماه‌های مطالعاتی به ترتیب ۱۷٪، ۱۹/۶٪، ۱۸/۴٪، ۱۸/۲٪، ۱۹/۷٪ و ۲۰/۹٪ به دست آمده است که دلیل آن وجود پدیده ادوکسیون در منطقه بوده و با لحاظ نمودن تابع باد محلی قابل اصلاح می‌باشد. هم‌چنین روابط رگرسیون جهت تبدیل داده‌های ساعتی محاسباتی به داده‌های اندازه‌گیری شده به تفکیک هر ماه ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق مرجع، بازه ساعتی، پنمن- مونتیث فائو-۵۶، پنمن- مونتیث ASCE، لایسیمتر

۱. دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. به ترتیب دانشیار و استاد مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: drba777@yahoo.com

Archive of SID

www.SID.ir

مقدمه

با توجه به میزان اندک نزولات جوی و محدودیت منابع آب در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک ایران، مدیریت صحیح منابع آب از اهمیت زیادی برخوردار بوده و لازم است دقت برآورد آن را در زمینه‌های مختلف افزایش داد. در این راستا تعیین نیاز آبی گیاهان، رکن اساسی در طرح‌های آبیاری بوده که لازمه آن محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل سطوح گیاهی مرجع (ET_o) برای منطقه طرح می‌باشد. ET_o علاوه بر نشان دادن ویژگی‌های یک اقلیم، برای تعیین نیاز آبی گیاهان مختلف به کار برده می‌شود. تبخیر-تعرق به عوامل اقلیمی نظیر دمای هوا، رطوبت، سرعت باد و تابش بستگی دارد. لذا از آنجایی‌که مقدار تابش و دیگر پارامترهای اقلیمی از محلی به محل دیگر و با گذشت زمان تغییر می‌یابند، ET_o نیز دارای تغییرات زمانی و مکانی است. دورنباس و پروت (۱۷) ET_o را تبخیر- تعرق از یک سطح نامحدود با پوشش گیاهی علفی سبز با ارتفاع یکنواخت ۸ تا ۱۵ سانتی‌متر، رشد فعال و بدون کمبود آب، که تمام سطح زمین را با سایه خود می‌پوشاند، تعریف نمودند. آلن و همکاران (۱۱)، گیاه چمن را به عنوان گیاه مرجع به صورت یک سطح پوشیده به ارتفاع ۱۲ سانتی‌متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر وضریب بازتاب تابش (آلبیدو) ۰/۲۳، تعریف نمودند.

روش‌های بسیاری مبنی بر داده‌های هواشناسی برای شرایط مختلف اقلیمی جهت محاسبه ET_o تدوین شده است. این روش‌ها از معادلات پیچیده مانند روش‌های ترکیبی پنمن- مونتیث، ارائه شده در نشریه فائو شماره ۵۶ (۱۱) تا معادلات ساده‌تر مانند روش‌های بلانی- کریدل (۱۵) و هارگریوز- سامانی (۱۸) که به داده‌های هواشناسی کمتری نیاز دارند، گسترده است. معادله پنمن- مونتیث نسبت به روش‌های تجربی این مزیت را دارد که هر دو مکانیسم انرژی و آئرودینامیک در پدیده تبخیر در نظر گرفته شده و برای چندین منطقه در سطح دنیا نتایج دقیقی به دست داده است (۱۱، ۲۰، ۲۳ و ۲۴). مقالات بسیاری در این زمینه منتشر شده که نمایانگر تطبیق مناسب روش پنمن- مونتیث فائو-۵۶ با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری بوده است (۱۴، ۲۱ و۲۲). در چند سال اخیر نیز مطالعاتی جهت ارزیابی روش‌های محاسباتی ET_o در بازه کوتاه مدت ساعتی با استفاده از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری به انجام رسیده است (۱۴ و ۲۵). در ایران نیز تحقیقات زیادی در زمینه برآورد تبخیر- تعرق مرجع در بازه‌های زمانی ماهانه و روزانه به انجام رسیده است. مالک (۹) با مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع یونجه با مقادیر محاسبه شده در باجگاه استان فارس نشان داد که نتایج حاصل از روش پنمن اصلاح شده فائو از روش‌های دیگر به مقدار اندازه‌گیری شده نزدیک‌تر است. رحیم زادگان (۲)، با استفاده از اندازه‌گیری‌های لایسیمتری سال‌های ۱۳۶۷ و۱۳۶۸ تحقیقاتی را در زمینه تبخیر- تعرق روزانه در منطقه اصفهان انجام داد و روش جنسن- هیز را مناسب‌ترین روش برای آن ناحیه پیشنهاد نمود. شریعتی (۵) با استفاده از لایسیمتر مونولیت طی دوره زمانی ۴ ساله، تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن در ایستگاه تحقیقات خاک و آب کرج را مورد مطالعه قرار داد که در نهایت برای یک دوره ۷ ماهه، مقدار ۱۳۹۰ میلی‌متر و متوسط روزانه ۷/۲ میلی‌متر را گزارش نمود. هم‌چنین طی مقایسه‌ای که با فرمول‌های چند متغیره به عمل آورد، مناسب‌ترین معادله برای منطقه را پنمن اصلاح شده با ضریب هم‌بستگی ۹۷ درصد و پس از آن روش تشعشع با ضریب هم‌بستگی ۹۵ درصد پیشنهاد نمود. قهرمان زاده (۷) جهت تعیین مناسب‌ترین مدل برآورد تبخیر- تعرق مرجع روزانه در منطقه ارومیه، نتایج مدل‌های مختلف را با مقادیر حاصل از لایسیمتر مقایسه نموده و به ترتیب مدل تشت تبخیر با ضریب کوئنکا، مدل کریستین‌سن و هارگریوز را پیشنهاد نمود. ماکنالی (۸) بر اساس آمار روزانه تبخیر، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و ابرناکی در یک دوره اقلیمی ۲۰ ساله و در سه مقیاس زمانی ۱۰ روزه، ۲۰ روزه و یک ماهه، هم‌بستگی بین تبخیر- تعرق حاصل از ۱۰ روش و داده‌های تشت تبخیر را مورد بررسی قرار داد و اولویت هر یک از روش‌ها را به ترتیب همخوان بودن با تبخیر از تشت ارائه نمود. سپاسخواه و

www.SID.ir

محمدآبادی (۳) در منطقه باجگاه فارس، برای دو گیاه یونجه و کنجد، تبخیر- تعرق محاسبه شده با روش پنمن- مونتیث و اندازه‌گیری شده با لایسیمتر را مقایسه نموده و نتیجه گرفتند که در ابتدای دوره رشد، مقادیر تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده کمتر از مقادیر محاسبه شده بوده ولی در انتهای دوره رشد روند معکوس دیده شده است. فرشی و همکاران (۶) نیاز آبی گیاهان عمده زراعی و باغی کشور را در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه و بر اساس معادلات ترکیبی پنمن- مونتیث منتشر نمودند. پناهی (۱) جهت بررسی تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه در منطقه اصفهان، چهار روش بلانی- کریدل اصلاح شده، پنمن اصلاح شده، پنمن- مونتیث و تشت تبخیر با ضریب ارائه شده توسط کوئنکا را با استفاده از داده‌های هواشناسی مورد مقایسه قرار داد و سپس نتایج حاصله را با استفاده از داده‌های لایسیمتری تطبیق داد. بر این اساس روش تشت تبخیر با ضریب کوئنکا در اولویت اول و روش‌های بلانی- کریدل اصلاح شده، پنمن اصلاح شده و پنمن - مونتیث در اولویت‌های بعدی قرار گرفتند. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان گفت در اکثر مناطق ایران، تحقیقات تبخیر- تعرق بر بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه معطوف گشته و روش پنمن- مونتیث کمترین مقدار را نسبت به روش‌های دیگر برآورد به دست داده است. هم‌چنین در مطالعات مربوط به نیاز آبی گیاهان در کشور، از روش‌های ارائه شده توسط فائو ۵۶ استفاده زیادی شده که در این حالت تبخیر- تعرق گیاهان کمتر از واقعیت تخمین زده می‌شود (۴ و ۱۰). بنابراین اگر این روش ملاک طراحی سیستم‌های آبیاری قرار گیرد نیاز آبی به شدت کاهش یافته و در نتیجه ظرفیت سیستم انتقال و توزیع نقصان می‌یابد.

با توجه به مطالعات ذکر شده می‌توان گفت در یک منطقه یک روش و در منطقه دیگر روش دیگری بیشترین برآورد را از خود نشان داده است، در حالی‌که روش ترکیبی پنمن- مونتیث اکثراً کمترین مقدار را به خود اختصاص داده است. از طرفی باید توجه نمود که برای استفاده از این روش لازم است اصلاحات مورد نیاز در مورد برخی از پارامترها مانند تابع باد متناسب با شرایط محلی انجام پذیرد. از آنجایی‌که این روش پایه تئوریک داشته و از پارامترهای فیزیکی بیشتری در آن استفاده شده است، لذا انتظار می‌رود با تحقیق روی این روش و مقایسه آن با مقادیر حاصل از اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت هواشناسی و لایسیمتری بتوان به صورت مطمئن‌تری از آن استفاده نمود. در این مطالعه، مدل‌های پنمن- مونتیث فائو-۵۶ و پنمن- مونتیث ASCE، در بازه زمانی ساعتی برای یک دوره زمانی شش ماهه (از فروردین تا شهریور) توسط اندازه‌گیری‌های کوتاه مدت متغیرهای هواشناسی و لایسیمتری در اقلیم نیمه خشک کرمان مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

مواد و روش‌ها

ایستگاه مورد بررسی در سایت لایسیمتری مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان با عرض جغرافیایی ۳۰°۱۵′N، طول جغرافیایی ۵۶°۵۸′E و متوسط ارتفاع ۱۷۵۳/۸ متر از سطح دریا واقع شده است. دوره داده برداری منطبق بر ماه‌های فروردین لغایت شهریور سال ۱۳۸۴ بوده و اطراف سایت را زمین‌های کشاورزی و تحت آبیاری در بر گرفته است. در تقسیم‌بندی اقلیمی دومارتن، نوع اقلیم نیمه خشک و میانگین بارندگی سالانه منطقه بر اساس آمار ۳۵ ساله ایستگاه سینوپتیک، ۱۵۴/۱ میلی‌متر به دست آمده است. بر این اساس، میانگین دمای هوا در منطقه ۱۷/۱، متوسط دما در سردترین ماه برابر ۴/۶ و متوسط دما در گرم‌ترین ماه سال ۳۴/۷ درجه سانتی‌گراد بوده است. میانگین سالانه رطوبت نسبی ۳۲ درصد محاسبه گردیده است. نوع بافت خاک مورد استفاده در مزرعه لوم رسی شنی متشکل از ۵۵٪ شن، ۲۳٪ رس و ۲۴٪ سیلت بوده و از لحاظ مواد آلی و نیتروژن، خاک فقیری محسوب می‌شود. جهت ایجاد شرایط مرجع در سایت مطالعاتی، در سطح ایستگاه به مساحت ۲۰×۲۰ متر گیاه چمن از گونه *Lullium perenne* کشت گردید. آبیاری چمن محوطه سایت به صورت پاششی و آبیاری چمن سطح

Archive of SID

www.SID.ir

لایسیمتر به میزان مشخص توسط آبپاش انجام گرفته است. مساحت ساختمان ایزوله شده زیرزمینی حدود ۵۰ متر مربع بوده که شامل محل سیلندرهای لایسیمتر و اتاق کنترل به عمق ۳ متر است. سقف ساختمان زیرزمینی در حدود ۱۱۰ سانتی‌متر زیر خاک زراعی قرار دارد، در حالی‌که سطح لبه بالایی سیلندرهای لایسیمتر مماس بر سطح خاک مزرعه است. قطر سیلندر لایسیمتر ۳ متر، ارتفاع ۱/۷۵ متر، حجم ۱۲/۴ متر مکعب و وزن تقریبی آن با خاک در حدود ۱۹/۵ تن است. لایسیمتر وزنی دارای لودسل‌هایی (مدل C_3H_2) بوده که جهت دقت توزین دستگاه به کار برده شده‌اند. هم‌چنین یک ایستگاه هواشناسی خودکار در مجاورت دستگاه لایسیمتر نصب شده که متغیرهای هواشناسی دخیل در معادلات برآورد ET_o را در فواصل زمانی کوتاه مدت، اندازه‌گیری و در دیسک سخت رایانه ذخیره می‌نماید. مشخصات سنسورهای مورد استفاده در این ایستگاه خودکار به شرح زیر است.

سنسور دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از نوع عنصر حساس pt ۱۰۰ به وزن ۰/۸ کیلوگرم با دقت سنجش ۰/۱ ± و دامنه اندازه‌گیری ۳۰- تا ۸۰+ درجه سانتی‌گراد، سنسور رطوبت نسبی در ارتفاع ۲ متری با دقت سنجش ۰/۵ ± درصد و دامنه اندازه گیری صفر تا ۱۰۰ درصد و سنسور اندازه‌گیری سمت و سرعت باد در ارتفاع ۲ متری. جهت اندازه‌گیری سرعت باد از یک بادسنج فنجانی بسیار حساس به وزن ۲/۲ کیلوگرم استفاده گردید که سرعت‌های بسیار آرام تا ۰/۲ متر بر ثانیه را نیز اندازه‌گیری می‌نماید. دامنه اندازه‌گیری شامل سرعت‌های ۰/۲ تا ۴۰ متر بر ثانیه و دقت سنجش آن ۰/۲ ± متر بر ثانیه است. دامنه اندازه‌گیری جهت باد بین صفر تا ۳۶۰ درجه بوده و حساسیت پاسخ آن تا سرعت‌های ۰/۵ متر بر ثانیه، به ۳۰ درجه می‌رسد.

تمامی سنسورهای فوق‌الذکر به یک دستگاه دیتالاگر با ۳۶ کانال ورودی اتصال یافته‌اند. لذا امکان ثبت داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی و سمت و سرعت باد در بازه زمانی کوتاه مدت فراهم شده است. سیستم نرم‌افزاری به گونه‌ای برنامه‌ریزی شده که داده‌های هواشناسی و تغییر وزن لایسیمتر در هر ثانیه اندازه‌گیری (۶۰ قرائت در دقیقه) و در بازه زمانی یک ساعته، داخل دیسک سخت رایانه موجود در اتاق کنترل نگه‌داری می‌شوند. جهت پردازش داده‌های ساعتی موجود در دیتالاگر، برنامه‌ای در محیط اکسل تهیه و اطلاعات مربوط به هر ماه در فایل‌های جداگانه‌ای ذخیره می‌شوند. شمایی از محل استقرار لایسیمتر و ایستگاه هواشناسی خودکار در شکل ۱ نشان داده شده است. در این مطالعه، دو مدل پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ و پنمن- مونتیث ASCE جهت برآورد ET_o در مقیاس زمانی ساعتی ارزیابی شده و مقادیر حاصله از این مدل‌ها با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی مقایسه گردیده‌اند. این معادلات عبارت‌اند از:

الف) پنمن- مونتیث فائو- ۵۶

شکل کلی معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ در بازه زمانی ساعتی به صورت زیر است (۱۱و۲۱):

$$ET_o = \frac{۰/۴۰۸\Delta(R_n - G) + \gamma(۳۷/(T_{hr}+۲۷۳))U_۲(e^o(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(۱ + ۰/۳۴U_۲)} \quad [۱]$$

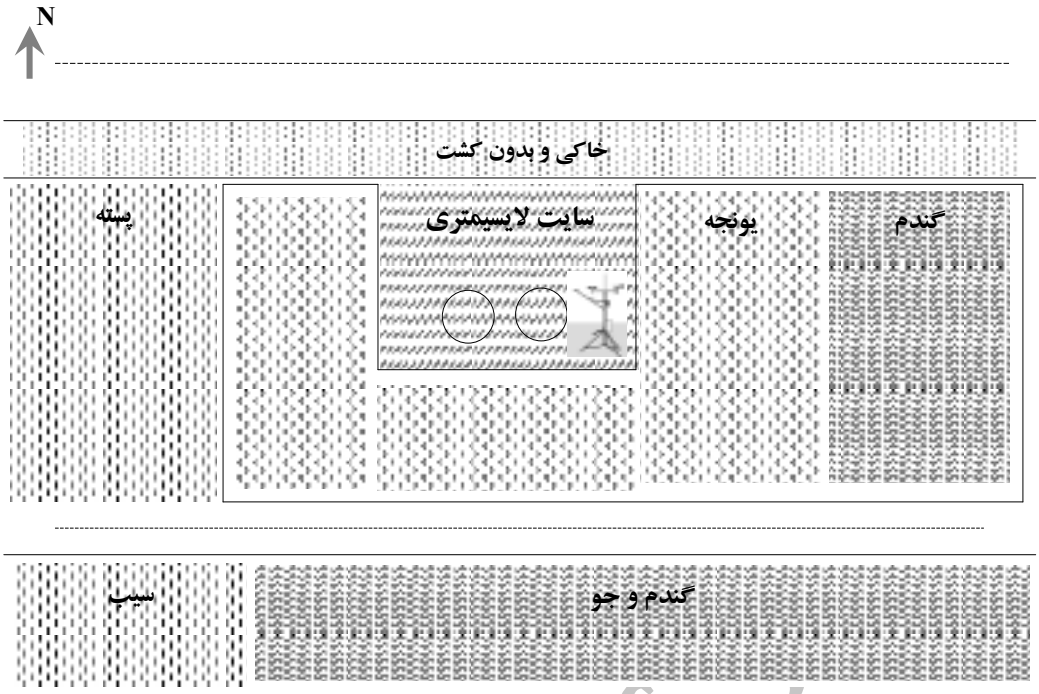
که در آن ET_o تبخیر- تعرق مرجع ($mmhr^{-۱}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در دمای ساعتی هوا ($kPa^{\circ}C^{-۱}$)، R_n میزان تابش خالص در سطح چمن ($MJm^{-۲}hr^{-۱}$)، G چگالی شار گرمای خاک ($MJm^{-۲}hr^{-۱}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa^{\circ}C^{-۱}$)، T_{hr} میانگین ساعتی دمای هوا ($^{\circ}C$)، $U_۲$ متوسط ساعتی سرعت باد ($ms^{-۱}$)، $e^{\circ}(T_{hr})$ فشار بخار اشباع در دمای T_{hr} (kPa) و e_a متوسط ساعتی فشار بخار واقعی هوا (kPa) است.

فشار بخار واقعی هوا (e_a) به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$e_a = e^{\circ}(T_{hr})\frac{RH_{hr}}{۱۰۰} \quad [۲]$$

که در آن RH_{hr} متوسط ساعتی رطوبت نسبی حسب

www.SID.ir



شکل ۱. محل استقرار لایسیمتر و ایستگاه هواشناسی خودکار نسبت به شمال جغرافیایی مزرعه دانشگاه شهید باهنر کرمان

درصد بوده و فشار بخار اشباع در دمای T_{hr} عبارت است از:

$$e^{\circ}(T_{hr}) = ۰/۶۱۰۸\exp\left[\frac{۱۷/۲۷T_{hr}}{T_{hr}+۲۳۷/۳}\right] \qquad [۳]$$

ب) پنمن- مونتیث ASCE

معادله استاندارد ارائه شده توسط انجمن مهندسین عمران آمریکا (ASCE) به منظور محاسبه تبخیر- تعرق مرجع چمن در بازه زمانی ساعتی به صورت زیر است (۱۳ و۲۶):

$$ET_o = \frac{۰.۴۰۸\Delta(R_n - G) + \gamma(۳۷/(T_{hr}+۲۷۳))U_۲(e^{\circ}(T_{hr}) - e_a)}{\Delta + \gamma(۱ + C_d U_۲)} \qquad [۴]$$

که در آن ثابت C_d تابعی از گام زمانی مقاومت گیاهی (r_s) و مقاومت آئرودینامیک (r_a) بوده و با تغییر نوع گیاه مرجع و بازه زمانی روز و شب تغییر می‌نماید. برای بازه زمانی ساعتی، مقدار C_d طی بازه زمانی روز ($R_n > ۰$) برابر ۰/۲۴ و طی بازه شب ($R_n \leq ۰$) برابر ۰/۹۶ است (۱۳). مقدار r_s در بازه زمانی روز $۵۰\ sm^{-۱}$ و در بازه شب $۲۰۰\ sm^{-۱}$ در نظر گرفته شده است (۱۲). سایر اجزای معادله (Δ ، R_n ، G ، γ ، T_{hr} ، $U_۲$ ، $e^{\circ}(T_{hr})$ و e_a) و واحدهای آنها مشابه معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ است.

به منظور مقایسه مقادیر محاسبه و اندازه‌گیری شده، از روش تحلیل هم‌بستگی خطی ساده (۱۶) استفاده شده است. هم‌چنین آماره‌های پیشنهادی توسط ویلموت (۲۷) شامل جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص توافق (d) جهت تحلیل مقادیر، استفاده شده است. چگونگی محاسبه RMSE به صورت معادله زیر است.

$$RMSE = \left[N^{-۱}\sum_{i=۱}^{N}(P_i - O_i)^{۲}\right]^{۰.۵} \qquad [۵]$$

که در آن N تعداد مشاهدات، P_i مقادیر ET_o محاسبه شده و O_i مقادیر ET_o اندازه‌گیری شده است. شاخص توافق به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود.

Archive of SID

www.SID.ir

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} \left((P_i - O_{avg}) + (O_i - O_{avg}) \right)^2} \right], \quad 0 \le d \le 1 \quad [6]$$

که در آن O_{avg} میانگین مقادیر ET_o اندازه‌گیری شده است. کامل‌ترین توافق هنگامی بین مقادیر محاسباتی و مشاهداتی وجود دارد که مقدار d برابر یک شود.

نتایج و بحث

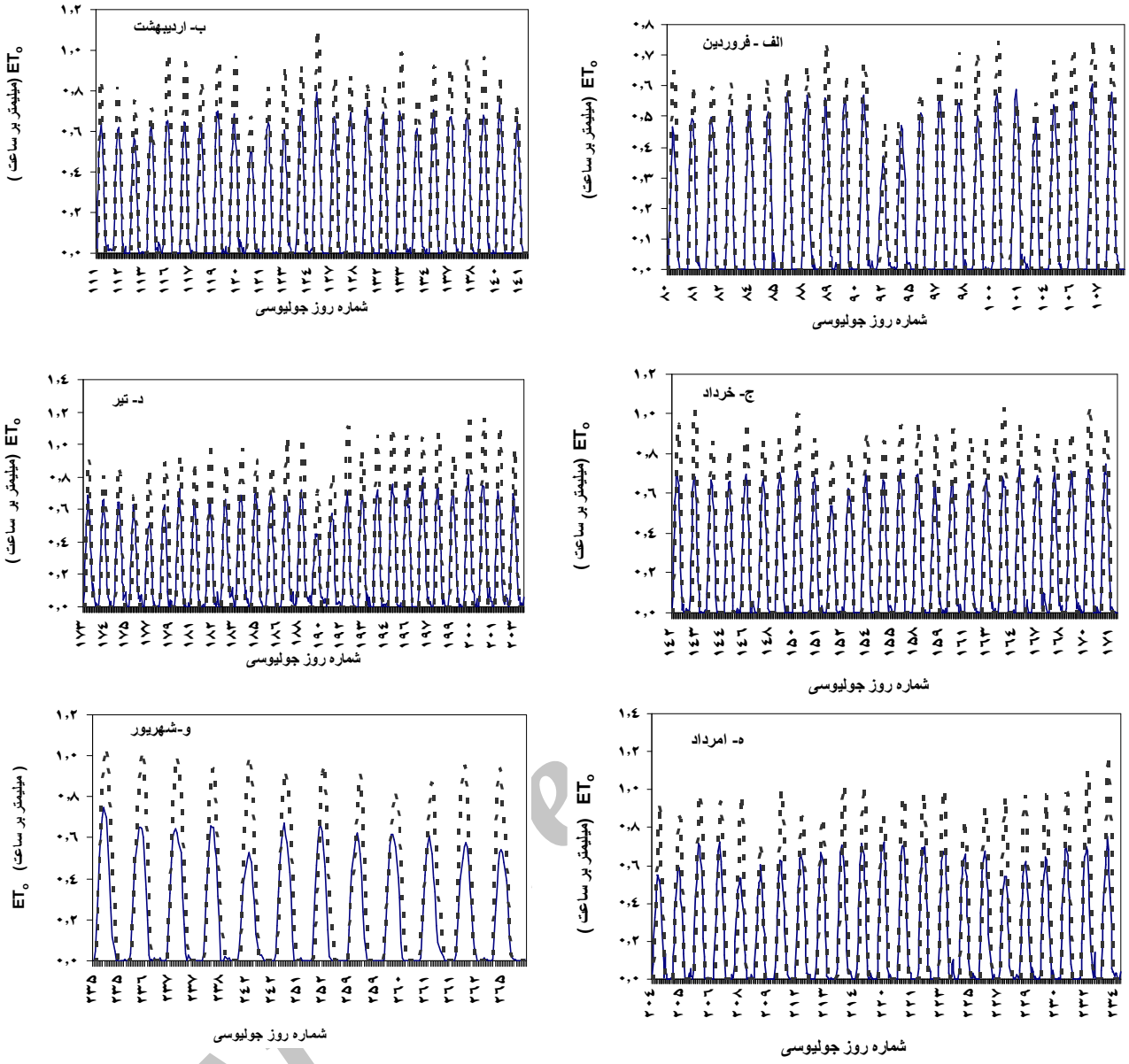
در شکل‌های ۲- الف لغایت ۲- و، مقادیر ETo اندازه‌گیری توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط روش پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ در بازه زمانی ساعتی طی دوره مطالعاتی مقایسه گردیده‌اند. تعداد روزهای دارای آمار قابل اطمینان پس از حذف نقاط پرت در هر یک از ماه‌های مورد مطالعه از فروردین تا شهریور به ترتیب عبارت‌اند از ۲۴، ۲۶، ۲۶، ۲۹، ۲۳ و ۱۲ روز که جمعاً تعداد ۳۳۵۲ داده ET_o ساعتی را به تفکیک شب و روز تولید نموده‌اند. علاوه بر نقاط پرت، حذف برخی از داده‌ها به علت قطع جریان برق مزرعه و یا وجود جانور روی لایسیمتر صورت گرفته است. با توجه به نمودارهای شکل ۲، روند تغییرات همسو بوده ولی مقادیر برآورد شده در تمامی ماه‌های مورد مطالعه کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بوده است، به طوری که مقدار کم برآورد از ۱۸/۴٪ در ماه فروردین تا ۲۶/۳٪ در ماه خرداد متغیر است.

در شکل ۳ هم‌بستگی بین نتایج حاصل از این دو روش به تفکیک ماه‌های مختلف ارائه شده است. همان‌گونه که از نمودارها مشخص می‌شود، شیب خطوط رگرسیون بین ۰/۹۵ تا ۱/۳۶ در این ماه‌ها تغییر نموده و مقدار آن در ماه اردیبهشت برابر ۰/۹۵ بوده که بسیار به یک نزدیک است. با توجه به خطوط برازش داده شده، مقادیر ET_o محاسبه شده در تمامی ماه‌ها به جز اردیبهشت، کمتر برآورد شده است. این موضوع هنگامی که کلیه ماه‌ها به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده‌اند نیز در شکل ۴ نشان داده شده است. نتیجه فوق با نتایج به دست آمده توسط هاول و همکاران (۱۹) تا اندازه‌ای همخوانی دارد. این محققان در بوشلند تگزاس، مقادیر لایسیمتری را با مقادیر محاسبه شده توسط معادله پنمن- مونتیث فائو-۵۶ مقایسه و مشاهده نمودند که در مقادیر پایین ET_o معادله نسبت به مقادیر مشاهداتی تمایل به بیش برآورد و در مقادیر بالای ET_o تمایل به کم برآورد دارد.

شکل ۵ مقایسه بین تبخیر- تعرق ساعتی محاسبه شده توسط مدل پنمن - مونتیث ASCE و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی را نشان می‌دهد. مانند حالت قبل، در تبخیر- تعرق حداکثر، ET_o محاسباتی نسبت به مقادیر اندازه‌گیری کم برآورد بوده است. شکل ۶، تحلیل رگرسیون بین این دو مقدار را به تفکیک ماه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد. شیب خطوط رگرسیون بین ۱/۰۶ تا ۱/۳۳ در این ماه‌ها تغییر نموده و مقدار آن در ماه فروردین حدود یک بوده و با توجه به خطوط برازش داده شده، مقادیر ET_o برآورد شده در تمامی ماه‌ها حالت کم برآورد را نسبت به روش لایسیمتری نشان می‌دهد. در عین حال خط رگرسیون تا مقدار ۰/۴ میلی‌متر بر ساعت بسیار نزدیک به خط نیمساز بوده که نمایانگر تطابق مناسب این روش در دامنه صفر تا ۰/۴ میلی‌متر بر ساعت است. در مقادیر بیش از ۰/۴ میلی‌متر بر ساعت، ET_o محاسبه شده نسبت به اندازه‌گیری شده حالت کم برآورد را نشان داده است. مطابق جدول ۱، کم برآوردی روش پنمن - مونتیث ASCE نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده از ۱۷ درصد برای فروردین ماه تا ۲۰/۹ درصد برای شهریور ماه متغیر است.

جهت مقایسه آماری نتایج حاصله، با استفاده از تعداد ۳۳۵۲ داده ساعتی ET_o اندازه‌گیری و محاسبه شده، آماره‌های RMSE و شاخص توافق (d) به تفکیک برای هر یک از ماه‌های مطالعاتی محاسبه و در جداول ۱ و ۲ ارائه گردیده‌اند. در تحلیل‌های رگرسیون، ET_o ساعتی حاصل از هر یک از روش‌های محاسباتی به عنوان متغیر مستقل و ETo اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر به عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شده

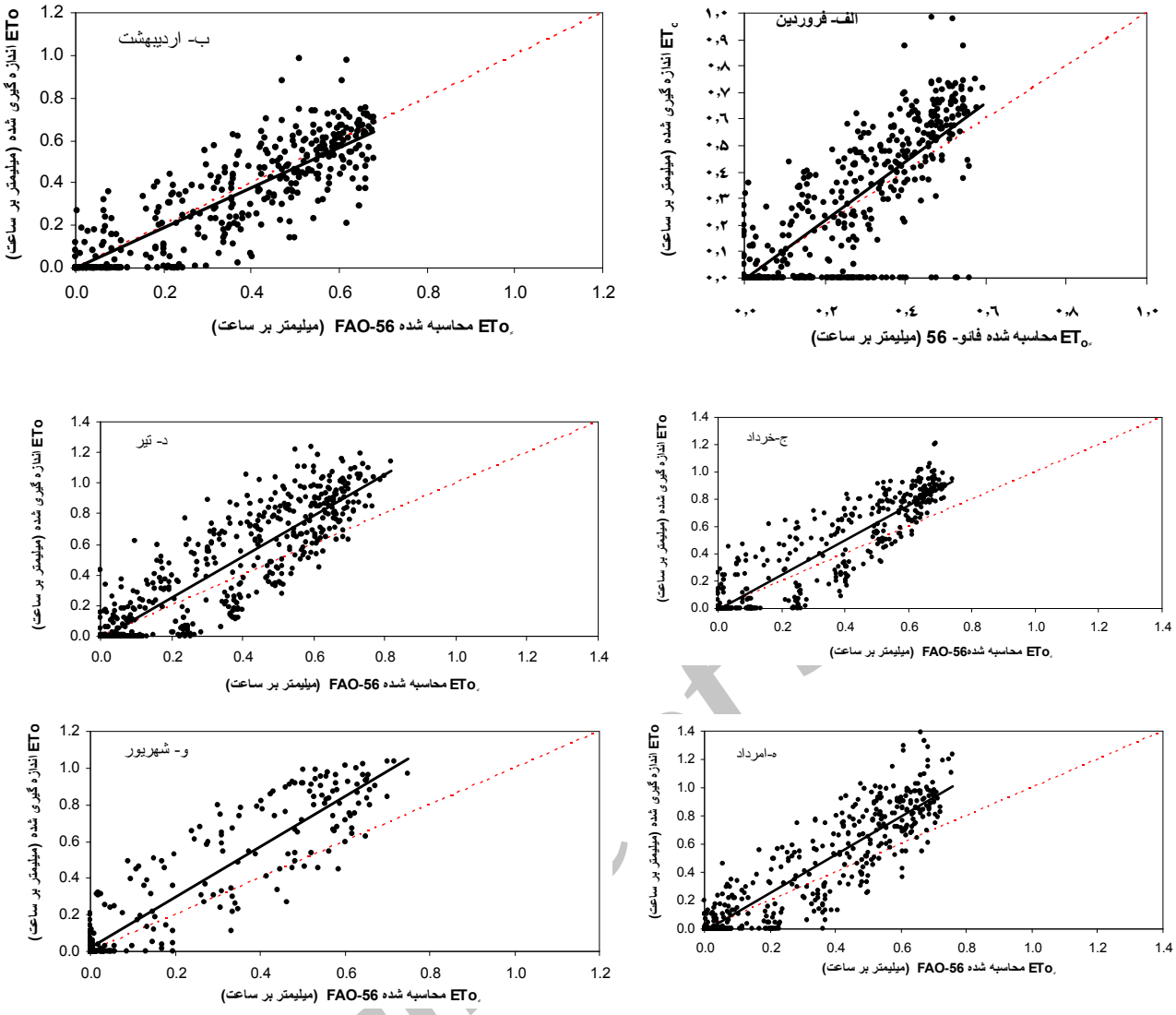
Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۲. مقایسه تبخیر- تعرق مرجع ساعتی محاسبه شده توسط روش پنمن - مونتیث فائو- ۵۶ و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر طی ماه‌های فروردین لغایت شهریور سال ۱۳۸۴

است. همان‌گونه که در جدول ۱ نشان داده شده، روش پنمن- مونتیث فائو-۵۶ در ماه اردیبهشت در مقایسه با مقادیر لایسیمتری دارای شاخص توافق ۰/۹۵۲ و RMSE برابر ۰/۱۰۷ میلی‌متر بر ساعت بوده که به ترتیب در بین ماه‌های مورد مطالعه دارای بیشترین d و کمترین RMSE می‌باشد. با توجه به تعداد کل داده‌ها، مقادیر ضریب تعیین (R^2) حاصل از خط رگرسیون در سطح ۰/۰۱ برای هر یک از ماه‌ها معنی‌دار است. هم‌چنین با مقایسه ET_o ساعتی حاصل از معادله پنمن- مونتیث ASCE و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر (جدول ۲) مشخص گردید که مجدداً ماه اردیبهشت دارای بیشترین شاخص توافق (۰/۹۴۳) و کمترین RMSE (۰/۱۴۲ میلی‌متر بر ساعت) بوده است. در این حالت مقدار R^2 برابر ۰/۹۰۶ محاسبه گردیده و تفسیر آن این است که حدود ۹۱٪ از تغییرات مقادیر لایسیمتری ناشی از تغییرات مقادیر محاسباتی بوده و حدود ۹٪ از تغییرات مقادیر

www.SID.ir

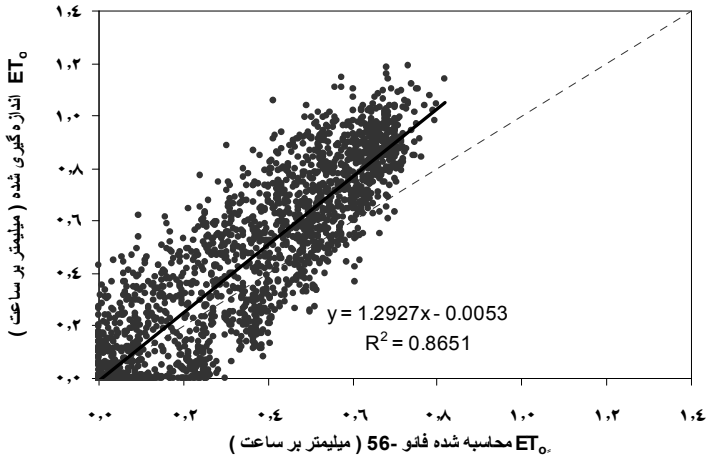


شکل ۳. هم‌بستگی بین ET_o ساعتی اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ به تفکیک ماه‌های مورد مطالعه

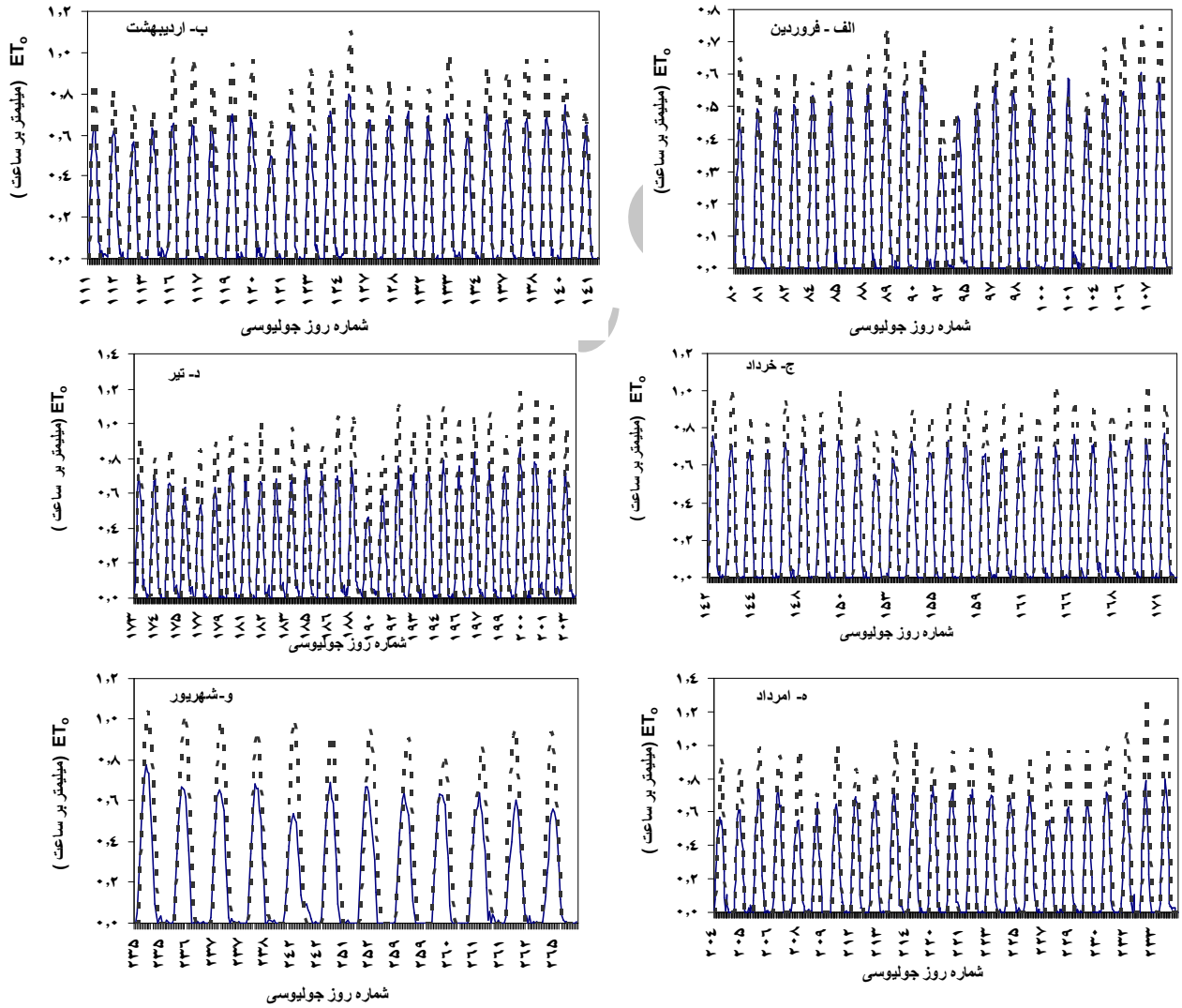
لایسیمتری مربوط به متغیر مستقل نبوده و به سایر عوامل بستگی دارد.

جهت مقایسه تمامی ۳۳۵۲ داده ET_o ساعتی، کلیه ماه‌های مورد مطالعه، به صورت یکپارچه در نظر گرفته شده و تحلیل‌های رگرسیون بر این مبنا انجام گرفته است (جدول۳). مطابق اعداد مندرج در این جدول، روش پنمن- مونتیث ASCE تطابق مناسب‌تری با روش لایسیمتری داشته به گونه‌ای‌که مقدار RMSE و d در این حالت به ترتیب برابر ۰/۱۵۴ میلی‌متر بر ساعت و ۰/۹۳۲ محاسبه گردیده‌اند. ولی با توجه به خط رگرسیون رسم شده (شکل ۷)، ET_o برآورد شده توسط معادله نسبت به مقدار اندازه‌گیری دارای وضعیت کم برآورد است. علت کم برآورد مقادیر محاسباتی نسبت به مقادیر لایسیمتری با تحلیل جهت باد غالب در منطقه توجیه گردیده است. تحلیل فراوانی جهت وزش باد در طی دوره مطالعاتی نشان داده است که در هر یک از ماه‌های فروردین الی شهریور جهت باد غالب به ترتیب

www.SID.ir

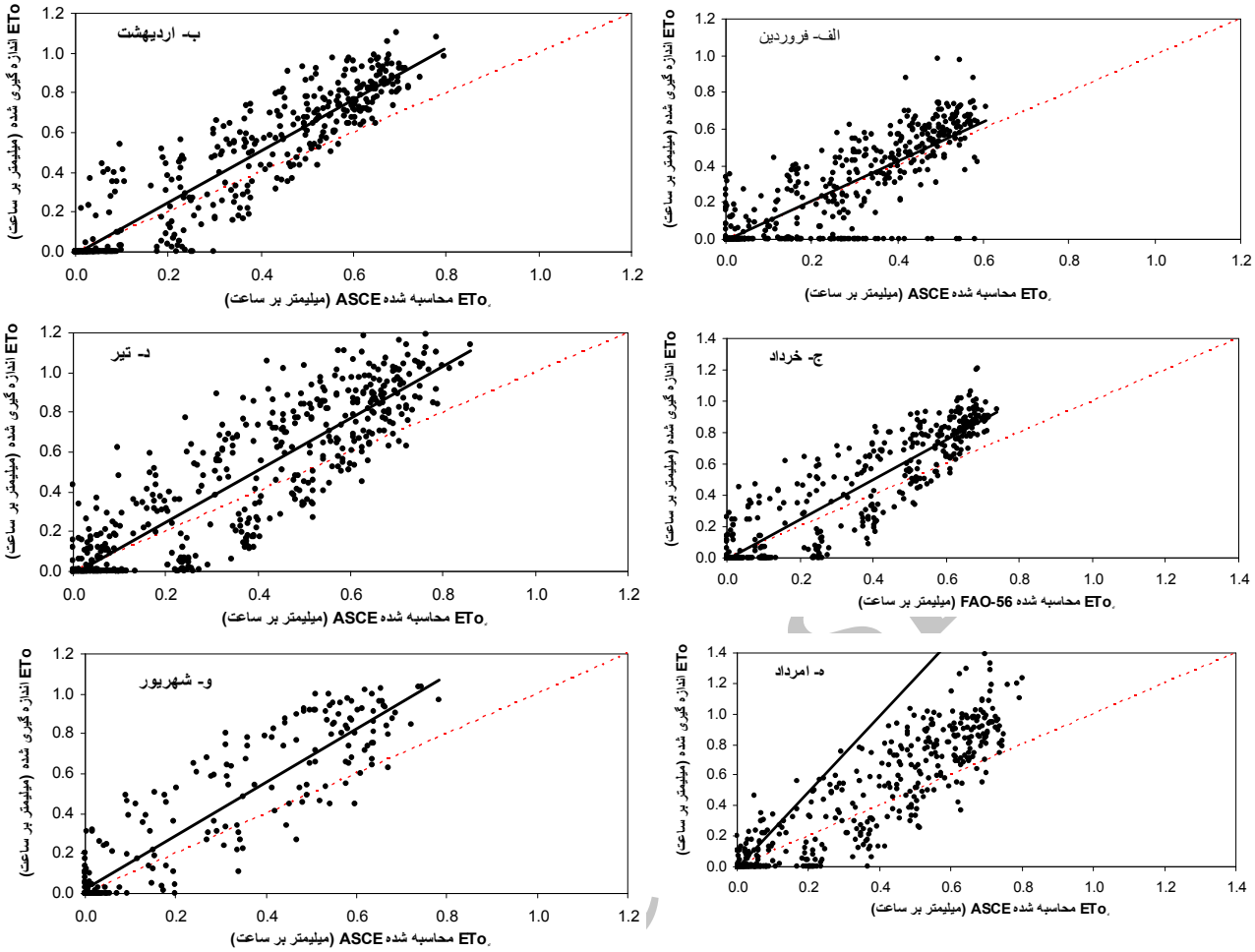


شکل ۴. هم‌بستگی بین ET_0 ساعتی اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط معادله پنمن- مونتیث فائو-۵۶ در کلیه ماه‌های مورد مطالعه



شکل ۵. مقایسه تبخیر- تعرق مرجع ساعتی محاسبه شده توسط روش پنمن - مونتیث ASCE و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر طی ماه‌های فروردین لغایت شهریور سال ۱۳۸۴

www.SID.ir



شکل ۶. هم‌بستگی بین ET_o ساعتی اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط معادله پنمن- مونتیث ASCE به تفکیک ماه‌های مورد مطالعه

جدول ۱. پارامترهای آماری مربوط به تحلیل رگرسیون تبخیر تعرق مرجع ساعتی برآورد شده توسط معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در ماه‌های مورد مطالعه

ماه	N	O_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg}/O_{avg} (%)	$ET_{o(Lysimeter)} = A + B \times ET_{o(PM-FAO-56)}$			RMSE mm.hr^{-1}	d
					A	B	R^2		
فروردین	۵۶۸	۰/۲۰۶	۰/۱۶۸	۸۱/۵۵	-۰/۰۰۷۳	۱/۱۱۵	۰/۷۴۶۵	۰/۱۲۵	۰/۹۱۰
اردیبهشت	۶۲۴	۰/۲۸۶	۰/۲۲۹	۸۰/۰۷	-۰/۰۰۳۷	۰/۹۵۳	۰/۸۳۰۴	۰/۱۰۷	۰/۹۵۲
خرداد	۶۲۴	۰/۳۰۴	۰/۲۲۴	۷۳/۶۸	-۰/۰۰۶۴	۱/۲۶۶	۰/۸۶۴۵	۰/۱۶۰	۰/۹۳۲
تیر	۶۹۶	۰/۳۱۸	۰/۲۵۳	۷۹/۵۶	-۰/۰۲۰۲	۱/۳۴۳	۰/۸۳۱۲	۰/۱۸۹	۰/۹۰۷
مرداد	۵۵۲	۰/۲۹۵	۰/۲۳۲	۷۸/۶۴	-۰/۰۱۵۵	۱/۳۵۳	۰/۸۵۴۲	۰/۱۸۲	۰/۹۱۵
شهریور	۲۸۸	۰/۲۶۳	۰/۲۰۵	۷۷/۹۵	۰/۰۲۴	۱/۳۶۸	۰/۸۵۲۴	۰/۱۹۱	۰/۸۹۷

N: تعداد مشاهدات، O_{avg}: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر، P_{avg}: میانگین مقادیر برآورد شده توسط معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ (در بازه زمانی ساعتی)، A: عرض از مبدا خط رگرسیون، B: شیب خط رگرسیون، R^2: ضریب تعیین، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، d: شاخص توافق

www.SID.ir

جدول ۲. پارامترهای آماری مربوط به تحلیل رگرسیون تبخیر- تعرق مرجع ساعتی برآورد شده توسط معادله پنمن- مونتیث ASCE و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در ماه‌های مورد مطالعه

ماه	N	O_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg}/O_{avg} (%)	$ET_{o(Lysimeter)} = A + B \times ET_{o(PM-ASCE)}$			RMSE mm.hr^{-1}	d
					A	B	R^2		
فروردین	۵۶۸	۰/۲۰۶	۰/۱۷۱	۸۳/۰	-۰/۰۰۵۵	۱/۰۶۶	۰/۷۵۱۷	۰/۱۲۲	۰/۹۱۸
اردیبهشت	۶۲۴	۰/۲۸۶	۰/۲۳۰	۸۰/۴	-۰/۰۰۸۳	۱/۲۹۴	۰/۹۰۶	۰/۱۴۲	۰/۹۴۳
خرداد	۶۲۴	۰/۳۰۴	۰/۲۴۸	۸۱/۶	-۰/۰۰۴۷	۱/۲۳۷	۰/۸۶۷۴	۰/۱۵۵	۰/۹۳۷
تیر	۶۹۶	۰/۳۱۸	۰/۲۶۰	۸۱/۸	-۰/۰۱۴۶	۱/۳۰۳	۰/۸۳۵۱	۰/۱۸۳	۰/۹۱۵
مرداد	۵۵۲	۰/۲۹۵	۰/۲۳۷	۸۰/۳	-۰/۰۱۲۸	۱/۳۱۳	۰/۸۵۷۴	۰/۱۷۵	۰/۹۲۳
شهریور	۲۸۸	۰/۲۶۳	۰/۲۰۸	۶۸/۴	۰/۰۲۵۳	۱/۳۳۸	۰/۸۵۵۹	۰/۱۸۶	۰/۹۰۴

N: تعداد مشاهدات، O_{avg}: میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر، P_{avg}: میانگین مقادیر برآورد شده توسط معادله پنمن- مونتیث ASCE(در بازه زمانی ساعتی)، A: عرض از مبدا خط رگرسیون، B: شیب خط رگرسیون، R^2: ضریب تعیین، RMSE: ریشه میانگین مربعات خطا، d: شاخص توافق

جدول ۳. پارامترهای آماری مربوط به تحلیل رگرسیون تبخیر- تعرق مرجع ساعتی برآورد شده توسط دو معادله پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ و پنمن- مونتیث ASCE و اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر در کلیه ماه‌های مطالعاتی

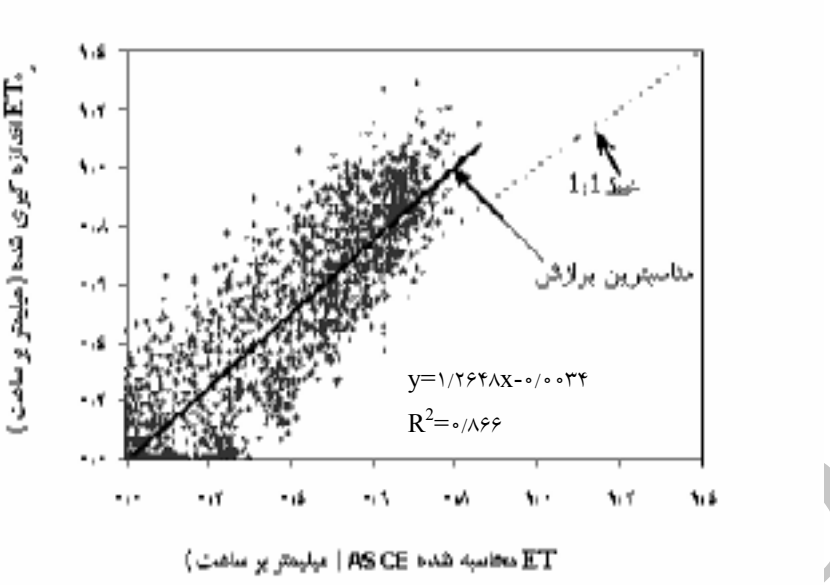
روش محاسبه	N	O_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg} mm.hr^{-1}	P_{avg}/O_{avg} (%)	$ET_{o(Lysimeter)} = A + B \times ET_{o(estimated)}$			RMSE mm.hr^{-1}	d
					A	B	R^2		
پنمن- مونتیث فائو- ۵۶	۳۳۵۲	۰/۲۸۵	۰/۲۲۵	۷۸/۹	-۰/۰۰۵۳	۱/۲۹۲۷	۰/۸۶۵۱	۰/۱۵۸	۰/۹۲۷
پنمن- مونتیث ASCE	۳۳۵۲	۰/۲۸۵	۰/۲۲۸	۸۰/۰	-۰/۰۰۳۴	۱/۲۶۴۸	۰/۸۶۶	۰/۱۵۴	۰/۹۳۲

شمال شرق، شمال غرب، شمال شرق، شمال، شمال و شمال شرق بوده است. با توجه به شکل ۱، از آنجایی‌که هیچ‌گونه عملیات زراعی در ضلع شمالی مزرعه مطالعاتی انجام نپذیرفته است و نظر به جهت باد غالب در منطقه، شاید بتوان گفت که پدیده فرارفت گرما (ادوکسیون) مهم‌ترین عامل در کم برآورد مقادیر محاسباتی در این منطقه محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ناحیه مورد مطالعه در کرمان، معادلات ساعتی پنمن- مونتیث فائو- ۵۶ و پنمن- مونتیث ASCE قابل مقایسه با اندازه‌گیری‌های لایسیمتری می‌باشند. با توجه به این‌که در معادله ساعتی پنمن- مونتیث فائو- ۵۶، مقدار مقاومت گیاهی برای طول دوره روز

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷. هم‌بستگی بین ET_o ساعتی اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر و محاسبه شده توسط معادله پنمن- مونتیث ASCE در کلیه ماه‌های مورد مطالعه

($R_n > ۰$) و طول دوره شب ($R_n \leq ۰$) ثابت در نظر گرفته شده است، لذا ET_o ساعتی محاسباتی توسط هر یک از روش‌های فائو-۵۶ و ASCE نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده برای کلیه ماه‌های مورد مطالعه به طور متوسط در حدود ۲۱ درصد کمتر برآورد شده است. مقایسه روش پنمن- مونتیث ASCE با مقادیر مشاهداتی نیز گرچه نمایانگر ضریب تعیین معنی‌داری است، ولی به طور متوسط دارای RMSE برابر ۰/۱۵۴ بوده که گویای اختلاف دو روش می‌باشد. در این حالت مقدار خطا نسبت به روش پنمن- مونتیث فائو- ۵۶، اندکی کمتر گشته که به دلیل در نظر گرفتن مقدار C_d برابر۰/۲۴ در طول روز و ۰/۹۶ در طول شب بوده است. هم‌چنین جهت همخوان نمودن مقادیر محاسباتی با اطلاعات لایسیمتری با توجه به وجود پدیده ادوکسیون در منطقه، لازم است تابع باد در این معادلات بر اساس مقادیر واقعی ET_o ، تحلیل و مورد تصحیح قرارگیرد.

سپاسگزاری

این پژوهش بخشی از طرح تحقیقاتی نوع ششم به شماره ۲۲۰۰۷ مورخ ۱۳۸۶/۴/۶ بوده و با حمایت مالی معاونت پژوهشی پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران انجام گرفته که بدین وسیله تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع مورد استفاده

۱. پناهی، م. ۱۳۷۸. ارزیابی چند روش محاسباتی تبخیر تعرق پتانسیل. هفتمین سمینار آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۰- ۱۲ اسفند، صفحات ۲۱-۳۴.

۲. رحیم زادگان، ر. ۱۳۷۱. جستجوی روش مناسب برآورد تبخیر- تعرق درمنطقه اصفهان. مجله علوم کشاورزی ایران ۲۳:۱-۹.

۳. سپاسخواه، ع. ر. و م. ا. محمدی. ۱۳۷۵. تعیین تبخیر تعرق یونجه و کنجد به روش پنمن- مونتیث در منطقه باجگاه. مجموعه

www.SID.ir

مقالات ششمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، ۱۰ و ۱۱ شهریور، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

۴. سپاسخواه، ع. ر. ۱۳۷۸. نگرشی دوباره بر روش‌های محاسبه تبخیر تعرق گیاهان زراعی. مجموعه مقالات هفتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۰-۱۲ اسفند، صفحات ۱-۱۰۱.

۵. شریعتی، م. ر. ۱۳۷۲. تبخیر تعرق گیاه مرجع با استفاده از لایسیمتر. گزارش نهایی، نشریه فنی مؤسسه تحقیقات کشاورزی، شماره ۸۸۲.

۶. فرشی، ع. ا.، م. ر. شریعتی، ا. جارالله‌ی، م. ر.قائمی، م. شهابی فر و م. تولایی. ۱۳۷۶. *برآورد آب مورد نیاز گیاهان عمده زراعی و باغی کشور*. جلد اول، نشر و آموزش کشاورزی، کرج.

۷. قهرمان زاده، ب. ۱۳۷۴. تعیین ضرایب اصلاحی و مناسب‌ترین رابطه برآورد تبخیر تعرق پتانسیل سطوح گیاهی مرجع برای منطقه ارومیه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز.

۸. ماکنالی، ن. ۱۳۷۵. بررسی روابط متقابل تبخیر از تشت، تبخیر تعرق پتانسیل و عوامل هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ۱۰ تا ۳۰ روزه در کرج. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۹. مالک، ا. ۱۳۶۰. روش‌های بررسی بیلان آب و تعیین اقلیم با مثالی در مورد باجگاه. مجله علوم کشاورزی ایران ۱۲:۵۲-۵۷.

۱۰.مالک، ا. و ع. ر. سپاسخواه. ۱۳۶۰. بررسی ادوکسیون در منطقه باجگاه. مجله علوم کشاورزی ایران ۱۲: ۲۹-۴۱.

11. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, FAO, Rome, Italy, 301 p.
12. Allen, R. G., W. O. Pruitt, J. L. Wright, T. A. Howell, F. Ventura, R. Snyder, D. Itenfisu, P. Steduto, J. Berengena, J. B. Yrisarry, M. Smith, L. S. Pereira, D. Raes, A. Perrier, I. Alves, I. Walter and R. Elliott. 2006. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO 56 Penman-Monteith method. Agric. Water Manag. 81: 1–22.
13. ASCE-EWRI. 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee Report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. ASCE-EWRI, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, 173 p.
14. Berengena, J. and P. Gavilan. 2005. Reference evapotranspiration estimation in a highly advective semiarid environment. J. Irrig. and Drain. Eng. 131 (2): 147-163.
15. Blaney, H. F. and W. D. Criddle. 1950. Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil Conserv. Service Technical Paper 96. 44 p.
16. Box, G. E. P., W. G. Hunter and J. S. Hunter. 1989. Statistic Para Investigators. Reverte Pub., Barcelona.
17. Doorenbos, J. and W. O. Pruitt. 1977. Guidelines for Predicting Crop Water Requirement. Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, Italy.
18. Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl. Eng. in Agric. 1(2): 96-99.
19. Howell, T. A., S. R. Evett, A. D. Schneider and D. A. Dusek and K. S. Copeland. 2000. Irrigated fescue grass ET compared with calculated reference grass ET. In: Proceedings of 4th National Irrigation Symposium, ASAE, Phoenix, PP. 228–242.
20. Jensen, M. E., R. D. Burman and R. G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manual and Report on Eng. Prac., No. 70, New York.
21. Lopez-Urrea, R., F. Martin de Santa Olalla, C. Fabeiro and A. Moratalla. 2006 a. An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. Agric. Water Manag. 86: 277-282.
22. Lopez-Urrea, R., F. Martin de Santa Olalla, C. Fabeiro and A. Moratalla. 2006 b. Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. Agric. Water Manag. 85: 15-26.
23. Smith, M. 1991. Report on the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. FAO, Rome.
24. Temesgen, B., S. Eching, B. Davidoff and K. Frame. 2005. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. J. Irrig. and Drain. Eng. 131(1): 73-84.

Archive of SID

www.SID.ir

25. Ventura, F., D. Spano, P. Duce and R. L. Snyder.1999. An evaluation of common evapotranspiration equations. Irrig. Sci. 18: 163–170.
26. Walter, I. A., R. G. Allen, R. Elliott, M. E. Jensen, D. Itenfisu, B. Mecham, T. A. Howell, R. Snyder, P. Brown, S. Echings, T. Spofford, M. Hattendorf, R. H. Cuenca, J. L. Wright and D. Martin. 2000. *In*: ASCE's Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium, ASAE, Phoenix, AZ.
27. Willmott, C. J. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc. 63 (11): 1309–1313.

Archive of SID

www.SID.ir