

ارزیابی روش‌های برآورد تابش خورشیدی برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع (مطالعه موردی: خرم آباد)

زینب میخک بیرانوند^۱، امیر سلطانی محمدی^{۲*}، مریم صارمی^۳

- ۱- دانشجوی دکترای آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۲- دانشیار گروه آبیاری و زهکشی، دانشکده مهندسی علوم آب، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه رازی کرمانشاه
 (تاریخ دریافت: ۹۶/۰۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۷/۰۱/۰۷)

چکیده

تابش خورشیدی عاملی بسیار مهم در معادله‌های برآورد تبخیر و تعرق گیاه است و تخمین مناسب آن در توسعه مدل‌های شبیه سازی رشد گیاهان اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش ۱۰ مدل برآورد تابش خورشیدی و تأثیر آنها روی هفت مدل برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شهرستان خرم‌آباد ارزیابی شد. تابش خورشیدی مورد نیاز از معادله‌های پنمن مونتیث^۱، هارگریوزسامانی^۲، ایرماک^۳، آلن^۴، آناندل^۵، خودکالیبره^۶، باهل^۷، گلور و مک کلوج^۸، بریستو و کمبل^۹ و آنگستروم پروسکات^{۱۰} محاسبه و در معادله‌های تبخیر و تعرق فائو پنمن مونتیث^{۱۱}، پرستلی تیلور^{۱۲}، ایرماک، تورک^{۱۳}، دورنبوس پرویت^{۱۴}، مک گینز بوردن^{۱۵} و آبتیو^{۱۶} به کار گرفته شد. تبخیر و تعرق محاسبه شده با مقادیر اندازه‌گیری شده با چهار لایسی متر در دوره رشد (مارس، آوریل، مه و ژوئن) مقایسه و برای ارزیابی نتایج به دست آمده، از معیارهای آماری $RMSE$ ، MBE ، t و R^2/t استفاده شد. نتایج نشان داد تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با تمام مدل‌های تابش خورشیدی توسط معادله‌های ایرماک و مک گینز بوردن کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود و مدل تابش پنمن مونتیث به کار گرفته شده در معادله‌های فائو پنمن مونتیث، پرستلی تیلور و دورنبوس پرویت موجب شد که مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده، جواب نزدیک‌تری نسبت به لایسی متر نشان دهد. همچنین مدل تابشی خودکالیبره در معادله تبخیر و تعرق تورک با R^2/t برابر با ۰٫۳۸، دارای بهترین نتیجه و مدل تابش پنمن مونتیث در معادله دورنبوس و پرویت با R^2/t برابر با ۰٫۲۷ در مرتبه دوم نسبت به دیگر مدل‌ها قرار گرفت.

واژگان کلیدی: تابش، تبخیر و تعرق مرجع، خرم‌آباد.

مقدمه

معدودی از ایستگاه‌های همدید (سینوپتیک) کشور اندازه‌گیری می‌شود و حتی در همین تعداد معدود نیز اندازه‌گیری صحیح تابش به علت وجود پاره‌ای از مشکلات با خطای زیادی همراه است. به همین دلیل معمولاً از روابط و مدل‌های مختلفی برای برآورد آن استفاده می‌شود (عرفانیان و بابایی حصار، ۱۳۹۲).

زارعی و همکاران (۱۳۹۴) اثر چند مدل تابش خورشیدی بر نتیجه معادله هارگریوز سامانی در برآورد تبخیر و تعرق مرجع چمن را در دشت شهرکرد مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور با در نظر گرفتن میزان تابش محاسبه شده از مدل‌های هارگریوز سامانی، دورنبوس پرویت، آناندل و همکاران، آلن،

مقدار انرژی خورشیدی که وارد جو زمین می‌شود، تابش ورودی نام دارد. تابش ورودی مجموعه‌ای از طول‌موج‌های فرابنفش، قابل‌رؤیت و فروسرخ است. تابش خورشیدی رسیده به زمین یکی از پارامترهای موردنیاز برای مطالعات منابع آب، محیط زیست و کشاورزی است (پیری و همکاران، ۱۳۹۲). آگاهی از مقدار تابش خورشیدی در هر منطقه برای تخمین تبخیر و تعرق اهمیت فراوان دارد (سبزی پرور و شادمانی، ۱۳۹۱). متأسفانه برخلاف سایر پارامترهای اقلیمی، داده‌های تابش خورشیدی به راحتی قابل دسترس نیست و تنها در تعداد

مرطوب می‌باشند و استفاده از این مدل‌ها برای تخمین تابش خورشیدی روزانه در مناطق خشک ایران توصیه شد.

آلادنولا و مادراماتو^۶ (۲۰۱۴) دقت نه مدل برآورد تابش خورشیدی و اثر آن‌ها بر تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از داده‌های هشت ایستگاه هواشناسی در کانادا مورد بررسی قرار دادند. برای تعیین مدل مناسب برای مکان مورد مطالعه مقادیر تابش خورشیدی برآورد شده با اندازه‌گیری شده مقایسه شد. بر اساس ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین خطای انحراف و راندمان رتبه بندی مدل‌سازی، مدل کالیبراسیون آنگستروم پرسکات، بهتر از سایر مدل‌های برآورد تابش خورشیدی معرفی شد و در صورت عدم داده‌های تابش خورشیدی و ساعات آفتابی مدل‌های سامانی و هارگریوز سامانی را در کانادا توصیه کردند.

اوکامدیا و همکاران^۷ (۲۰۱۶) به بررسی عملکرد شش مدل تابش خورشیدی برای تعیین بهترین مدل تابش در یک سطح افقی در نیجریه پرداختند. ارزیابی دقت و عملکرد مدل‌های مختلف برای سه منطقه با استفاده از هفت شاخص آماری صورت گرفت. نتایج مطالعه نشان داد که برآورد مدل‌های در نظر گرفته شده در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار اما دقت آن‌ها در مکان‌ها متفاوت بود. با این حال تحلیل رگرسیون چند متغیره از نظر نسبت ساعات آفتابی، دمای هوا، بیشینه دمای هوا و ابری بهتر از روابط دیگر عمل کرده بود.

روبا^۸ (۲۰۰۹) به ارزیابی برخی از مدل‌های برآورد تابش خورشیدی در کشور مصر پرداخته است. ایشان با مقایسه نتایج حاصل از کاربرد ده مدل تخمین تابش و مقادیر مشاهده‌ای در نه ایستگاه هواشناسی واقع در نقاط مختلف مصر نتیجه گرفت در بین مدل‌ها، مدل روبا اصلاح‌شده برای همه نه ایستگاه بهترین برآورد تابش را داشته است.

ارتکین یالدیز^۱، سامانی، گودین و همکاران^۲ و محمود هابارد^۳، تبخیر و تعرق مرجع از معادله هارگریوز سامانی را محاسبه و نتیجه را با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی متر مقایسه کردند. نتایج نشان داد تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده بر اساس تمام مدل‌های تابش به استثنای مدل سامانی، کمتر از تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده است. با مقایسه شاخص‌های آماری و نسبت‌های مقادیر برآورد شده به اندازه‌گیری شده، مشخص شد که دقیق‌ترین مدل تابش از نظر تأثیر بر محاسبه تبخیر و تعرق مرجع با معادله هارگریوز سامانی در منطقه مورد مطالعه، مدل محمود هابارد است.

سبزی پرور و همکاران (۱۳۸۷) با استفاده از چهار مدل مختلف تابش خورشیدی، تبخیر و تعرق گیاه را با چهار معادله مختلف جنسن هیز^۴ اصلاح شده، جنسن هیز، فائونپنمن مونتیث^{۵۶} و فائونپنمن مانتیث به دست آوردند و نتایج حاصل از آن‌ها را با داده‌های حاصل از نتایج لایسی متر در اقلیم سرد نیمه‌خشک همدان ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مدل جنسن هیز در مقایسه با سایر مدل‌ها، مقدار تبخیر و تعرق را در سطح پنج درصد و با دقتی بهتر از مدل فائونپنمن مونتیث^{۵۶} در اقلیم سرد نیمه‌خشک همدان برآورد می‌کند.

فرجی مهبیاری و همکاران (۱۳۹۴) عملکرد پنج مدل تجربی تخمین میزان تابش خورشیدی روزانه مبتنی بر تفاوت بین حداکثر و حداقل دمای روزانه (مدل‌های بریستوکمپل، هارگریوز سامانی، لی و چن^۵) را مورد ارزیابی قرار دادند. با استفاده از آزمون آماری خطا، عملکرد مدل‌ها با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده در دوازده ایستگاه هواشناسی ایران واقع در چهار منطقه آب و هوایی مرطوب، نیمه‌مرطوب، نیمه‌خشک و خشک با یکدیگر مقایسه شد. نتایج نشان داد که این مدل‌ها دارای دقت بیشتری در مناطق خشک نسبت به مناطق

1- Ertekin and Yaldiz

2- Goodin

3- Mahmood and Hubbard

4- Jensen Haise

5- Li and Chen

6- Aladenola and Madramootoo

7- Okundamiya, Emagbetere and Ogujor

8- Robaa

محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع با لایسی متر

برای تعیین تبخیر و تعرق گیاه مرجع با لایسی متر، تحقیقی در مزرعه تحقیقات دانشکده کشاورزی دانشگاه لرستان انجام شد. برای به دست آوردن تبخیر و تعرق مرجع چمن، هشت دستگاه میکرو لایسی متر زهکش دار در منطقه مورد مطالعه قرار داده شد. تاریخ شروع آماربرداری هفدهم مارس و پایان آن بیستم ژوئن سال ۲۰۱۳ بود. بذر چمن در چهار میکرو لایسی متر (به عنوان چهار تکرار) کشت شد. میکرو لایسی مترها به شکل استوانه و از جنس پلی اتیلن ضخیم بودند که طول و قطر آنها به ترتیب برابر ۸۰ و ۴۸ سانتی متر بود. برای سهولت در زهکشی، از کف لایسی مترها تا ارتفاع ۱۵ سانتی متر شن ریخته شد و بقیه حجم آنها با خاک مزرعه مجاور همراه با کود حیوانی پوسیده پر شد. در طی انجام آزمایش، آب اضافی موجود در لایسی مترها از طریق لوله زهکش به مخزن جمع آوری زه آب تخلیه و با استفاده از ظروف مدرج اندازه گیری شد. میکرو لایسی مترها در دو ردیف، به فاصله یک متر از یکدیگر قرار داده شدند. قبل از کاشت به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی از خاک درون میکرو لایسی متر نمونه برداری شد. به منظور اندازه گیری تبخیر و تعرق گیاه مرجع بذر چمن رقم اسپرت هلندی نیز با کود حیوانی مخلوط در سطح چهار دستگاه میکرو لایسی متر پاشیده شد. اولین آبیاری در هنگام کاشت بذرهای چمن صورت گرفت. آبیاری های بعدی زمانی اعمال می شدند که گیاهان دچار تنش رطوبتی نشوند. به همین منظور حداکثر کمبود رطوبتی مجاز خاک ۳۰ درصد در نظر گرفته شد. بدین منظور رطوبت قبل از آبیاری تعیین و با محاسبه اختلاف این میزان و حد ظرفیت زراعی، نیاز آبیاری تعیین می شد. البته از آنجا که میکرو لایسی متر یک محیط کنترل شده و به سادگی قابل زهکشی بود همواره سعی می شد حجمی بیش از این میزان برای آبیاری در نظر گرفته شود به طوری که حداکثر ۱۰ درصد زه آب ایجاد شود. عمق آب آبیاری (I) با استفاده از رابطه (۱) محاسبه شد:

یانگ و همکاران^۱ (۲۰۰۶) برای تخمین تابش از مدل های فانو، آنگستروم و هیبرید استفاده کردند. منطقه مورد آزمون برای ارزیابی این سه مدل، شامل کشورهای ژاپن، عربستان سعودی و ایالات متحده بود. مقایسه نتایج مدل ها و مقادیر مشاهده ای در ۲۳ ایستگاه انتخابی، نشان داد که مدل هیبرید در تخمین میزان تابش نسبت به دو مدل دیگر از کار آیی و دقت بالاتری برخوردار است. آن ها نتایج بهتر مدل هیبرید را مربوط به نحوه دخالت جو و نحوه انتقال تابش در داخل جو تا رسیدن به سطح زمین دانستند.

به این ترتیب با توجه به اهمیت تابش رسیده به سطح زمین و کاربرد گسترده آن در پروژه ها و مطالعات مختلف هواشناسی، اقلیم شناسی، هیدرولوژی و کشاورزی، در این مقاله انواع مدل های تابش برای استفاده در ورودی مدل های تبخیر و تعرق مرجع و معرفی مناسب ترین مدل تابش و تبخیر و تعرق مرجع با استناد به داده های لایسی متر مورد بررسی قرار گرفت. به کارگیری مدل مناسب تابش می تواند خلاء ناشی از کمبود داده های هواشناسی در برخی مناطق فاقد ایستگاه را که نیاز به برآورد تبخیر و تعرق دارند، جبران کند.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شهرستان خرم آباد است. خرم آباد مرکز استان لرستان و با مساحتی در حدود ۶۲۳۳ کیلومتر مربع بزرگ ترین شهرستان استان به حساب می آید که بین مدارهای ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۷ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. محدوده مطالعاتی دارای میانگین دمای سالانه ۱۷٫۲ درجه سلسیوس است. همچنین میانگین بارندگی و تبخیر سالانه در کل حوضه به ترتیب ۵۰۱٫۷ و ۱۸۹۱٫۳ میلی متر و میانگین سرعت باد روزانه ۶٫۲ متر بر ثانیه است.

داده‌های هواشناسی

داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه که از هفدهم مارس تا بیست ژوئن سال ۲۰۱۳ برداشت شدند، شامل ساعات آفتابی، سرعت باد، بارندگی، میانگین رطوبت نسبی، بیشینه رطوبت نسبی، کمینه رطوبت نسبی، دمای کمینه، دمای بیشینه و دمای میانگین، که از داده‌های ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد می‌باشد.

محاسبه تابش خورشیدی در سطح زمین

برای محاسبه تابش خورشیدی (R_s) و استفاده از آن در معادله محاسبه تبخیر و تعرق مرجع، از معادله‌های خلاصه شده در جدول (۱) استفاده شد. در این پژوهش کلیه محاسبات تابش و تبخیر و تعرق با نرم‌افزار اکسل انجام شد.

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (ET_0)

در این پژوهش، هدف محاسبه تبخیر و تعرق مرجع چمن با معادله‌های هارگریوز سامانی، پنمن مونتیث، پرستلی تیلور، ایرماک، تورک، دورنبوس و پرویت، مک‌گینز بردن و آبتیو با کاربرد معادله‌های مختلف تابش (معادله‌های ۳ تا ۱۳) و مقایسه آن‌ها با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده حاصل از لایسی‌متر است. معادله‌های تبخیر و تعرق به کار گرفته شده در جدول (۱) ارائه شده‌اند (بابامیری و همکاران، ۱۳۹۲؛ علیزاده، ۱۳۸۶؛ هژبر و همکاران، ۱۳۹۳).

مدل‌های برآورد تابش خورشیدی

در این تحقیق از ده مدل برای برآورد تابش خورشیدی به شرح زیر استفاده شد:

مدل آنگستروم-پرسکات^۲ پیشنهادی توسط فائو: این مدل به دلیل سادگی، کاربرد گسترده‌ای در محاسبه تابش رسیده به سطح زمین دارد؛ چنانچه، تابش خورشیدی اندازه‌گیری نشود می‌توان آن را با معادله آنگستروم-پرسکات محاسبه کرد. این معادله، رابطه تابش خورشیدی، تابش فرازمینی و ساعات آفتابی نسبی را به صورت زیر ارائه می‌دهد:

$$I = (\theta_{fc} - \theta_m) \times D \quad (1)$$

که در آن θ_{fc} رطوبت حجمی ظرفیت زراعی خاک (درصد)، θ_m رطوبت حجمی اندازه‌گیری شده خاک قبل از آبیاری (درصد)، I عمق آب آبیاری (میلی‌متر)، D عمق توسعه ریشه (میلی‌متر) است.

برای اندازه‌گیری رطوبت خاک از حسگرهای اندازه‌گیری رطوبت خاک که توسط گروه پژوهشی آبیاری و زهکشی پردیس ابوریحان دانشگاه تهران تحت عنوان تجاری^۱ IDR_G ساخته شده است، استفاده شد. بدین منظور در ابتدا دستگاه برای خاک مزرع واسنجی شد، سپس سنسورهای رطوبت‌سنج داخل میکروولایسی‌متر قرار داده شد و اطراف سنسورها به طور کامل از خاک پوشیده شد. کابل سنسورها از میکروولایسی‌متر بیرون قرار داده شده و با وصل کردن سنسور به دستگاه، رطوبت خاک قرائت و یادداشت می‌شد. قرائت دستگاه قبل از آبیاری انجام می‌گرفت. برای هر یک از میکروولایسی‌متر میزان تبخیر و تعرق چمن بین هر دو نوبت آبیاری متوالی در طول فصل زراعی با استفاده از رابطه بیلان آب خاک محاسبه شد:

$$ET = I + R - d \pm \Delta w \quad (2)$$

که در آن، ET تبخیر و تعرق چمن در فاصله اندازه‌گیری رطوبت خاک در میکروولایسی‌متر (میلی‌متر)، I مقدار آب آبیاری (میلی‌متر)، R ارتفاع بارندگی (میلی‌متر)، d مقدار آب زهکشی (میلی‌متر) و Δw تغییرات رطوبت خاک در فاصله اندازه‌گیری رطوبت خاک (میلی‌متر) است.

مقدار آب آبیاری و زهکشی با تقسیم حجم آب آبیاری و زهکشی بر مساحت میکروولایسی‌متر به دست آمد. مقدار بارندگی روزانه در طول فصل رشد از ایستگاه هواشناسی واقع در مجاورت دانشکده کشاورزی اخذ گردید و تغییرات رطوبت خاک در فواصل بین دو آبیاری با دستگاه رطوبت‌سنج IDR_G اندازه‌گیری شد. در نهایت مقادیر تبخیر تعرق به دست آمده بر فاصله‌ی بین دو آبیاری متوالی تقسیم و به این ترتیب مقدار تبخیر و تعرق روزانه‌ی گیاه چمن محاسبه شد.

بر اساس تابش خارج از جو (R_a) و اختلاف کمینه و بیشینه دمای هوا مقادیر تابش خورشیدی را با استفاده از رابطه زیر برآورد می‌کند:

$$R_s = K_{RS} (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (7)$$

که در آن K_{RS} ضریب تجربی معادله (۰,۱۶۲) برای ناحیه‌های داخلی و ۰,۱۹ در ناحیه ساحلی) است.

آناندل و همکاران: آناندل و همکاران (۲۰۰۲) با اصلاح مدل هارگریوز سامانی به وسیله پارامتر ارتفاع از سطح دریا (Z) رابطه زیر را ارائه کردند:

$$R_s = K_{RS} (1 + 2.7 \times 10^{-5} Z) \quad (8)$$

ضریب K_{RS} همان ضریب مدل هارگریوز و سامانی می‌باشد. مدل ایرماک و همکاران: برای محاسبه تابش خالص روزانه ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) رابطه زیر را ارائه نمودند:

$$R_s = (-0.09 T_{max}) + (0.203 T_{min}) \quad (9)$$

که در آن RH_{mean} رطوبت نسبی متوسط (بر حسب درصد) می‌باشد.

آلن: آلن (۱۹۹۵) برای تخمین تابش خورشیدی روش ساده‌ای را پیشنهاد کرده است. در این روش چنین تصور می‌شود که دمای حداکثر و حداقل، ارتباط نزدیکی را با تابش خورشیدی روزانه داشته و برای هر منطقه بر اساس معادله زیر برآورد می‌گردد. علاوه بر این، آلن با تاکید بر فاکتور ارتفاع، معادله زیر را برای محاسبه K_s ارائه کرده است:

$$K_s = K_{Ra} \times (p/p_0)^{0.5} \quad (10)$$

$$K_s = K_{Ra} \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (11)$$

که در آن K_{Ra} ضریب تجربی معادله (۰,۱۶۲) برای ناحیه‌های داخلی و ۰,۱۹ در ناحیه ساحلی)، P متوسط فشار جو در محل (کیلوپاسکال) و P_0 میانگین فشار هوا در سطح دریا (کیلوپاسکال) می‌باشد.

خودکالیبره: آلن (۱۹۹۷) گزارش کرد ضریب ثابت کالیبراسیون نادرست است و یک روش خود کالیبراسیون ارائه

$$R_s = (a + b (n/N)) \times R_a \quad (3)$$

که در آن R_s تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (مگاژول بر متر مربع بر روز)، R_a تابش فرازمینی (مگاژول بر متر مربع بر روز)، n ساعات واقعی آفتابی، N حداکثر ساعات آفتابی و a و b ضرایب ثابتی هستند که برای هر منطقه قابل محاسبه است. چنانچه، داده‌های تابش خورشیدی واقعی در دسترس نباشد یا ضرایب آنگستروم واسنجی نشده باشند، فائو ضرایب a و b را به ترتیب برابر ۰,۲۵ و ۰,۵ پیشنهاد کرده است (موسوی‌بایگی و همکاران، ۱۳۸۹ و وزیری و همکاران ۱۳۸۷).

مدل گلورمک کلویت: گلور و مک کلوچ ضریب a در رابطه آنگستروم پرسکات را به عرض جغرافیایی (ϕ) ارتباط دادند و رابطه زیر را ارائه کردند:

$$R_s = (0.29 \cos \phi + 0.52 (n/N)) \times R_a \quad (4)$$

این رابطه تا عرض جغرافیایی کمتر از ۶۰ درجه معتبر است (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹).

برستو و کمبل (B-C): برستو و کمبل (۱۹۸۴) یک رابطه غیرخطی را با استفاده از دماهای کمینه و بیشینه برای تخمین تابش خورشیدی ارائه کردند:

$$R_s = 0.7 \times [1 - \exp((0.36 \times \exp(-0.154 (T_{max} - T_{min}))) \times (T_{max} - T_{min})^{2.4})] \times R_a \quad (5)$$

که در آن T_{min} و T_{max} به ترتیب بیشینه و کمینه دمای روزانه (درجه سلسیوس) و ضرایب تجربی به ترتیب a ، b و c برابر ۰,۷۹، ۰,۰۳ و ۲,۴ می‌باشند.

باهل و همکاران: باهل و همکاران (۱۹۸۶) با استفاده از داده‌های ساعات آفتابی ۴۸ ایستگاه از نقاط مختلف کشور عربستان رابطه غیرخطی زیر را ارائه دادند:

$$R_s = [(a + b (n/N) + c (n/N)^2 + d (n/N)^3) \times R_a \quad (6)$$

که در آن ضرایب تجربی a ، b ، c و d به ترتیب برابر با ۰,۱۶، ۰,۸۷، ۰,۱۶ و ۰,۳۴ می‌باشند.

هارگریوز و سامانی: هارگریوز و سامانی (۱۹۸۲) مدلی را ارائه دادند که در مواقع در دسترس نبودن ساعات آفتابی واقعی،

در این روابط، P_i مقدار برآورد شده تبخیر و تعرق، O_i مقدار تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی متر، n تعداد مشاهدات و t معیار جاکوویدز (۱۹۹۷) است. مقدارهای t کمتر بیانگر دقت بهتر مدل می‌باشد. با توجه به اینکه در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب تبیین بالا باشد، خطای زیادی را نشان دهند و برای مدل دیگری، برعکس ضریب تبیین کمتر ولی نمایه‌های میانگین خطای اریب یا انحراف و جذر میانگین مربع خطا و یا معیار جاکوویدز قابل قبول باشند، چنین مواردی تصمیم‌گیری در انتخاب مدل بهینه را دشوار می‌سازد. بدین منظور، در تحقیق حاضر، معیار ترکیبی جدید که حاصل نسبت ضریب تبیین به معیار جاکوویدز می‌باشد معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. با به کارگیری معیار خطای جدید نسبت ضریب تبیین به معیار جاکوویدز مشکل انتخاب مدل (مدل‌های) بهینه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده شد. مقادیر نسبت ضریب تبیین به معیار جاکوویدز بالاتر، بیانگر سازگاری بهتر مدل با واقعیت است.

بحث و نتایج

بررسی تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع روزانه

ابتدا با توجه به مدل‌های تابش ذکر شده (روابط ۳ تا ۱۳)، مقادیر تابش روزانه در دوره مورد مطالعه برای ایستگاه هواشناسی خرم‌آباد محاسبه شد. سپس تبخیر و تعرق روزانه گیاه مرجع چمن از معادله‌های ارایه شده در جدول (۲)، برای طول دوره رشد در سال ۲۰۱۳ محاسبه و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. سپس مقادیر تبخیر و تعرق‌های مرجع تخمینی با تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده از طریق لایسی متر مقایسه شد.

شکل‌های (۱) تا (۷) تغییرات زمانی تبخیر و تعرق مرجع معادله‌های مختلف محاسبه‌ای را نسبت به تبخیر و تعرق مرجع اندازه‌گیری شده لایسی متر نشان می‌دهد. همچنین جدول (۲) ویژگی‌های خط رگرسیون و مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه را نشان می‌دهد.

داد. برتری این روش، سادگی و همچنین استفاده از تنها یک پارامتر ارتفاع ایستگاه از سطح دریا می‌باشد:

$$R_s = (a + b + 2 \times 10^{-5} Z) \times R_a \quad (12)$$

که در آن R_{so} تابش کل رسیده به سطح افقی در یک روز صاف (مگاژول بر مترمربع در روز)، Z ارتفاع از سطح دریا (متر)، و a و b ضرایب آنگستروم به ترتیب ۰٫۲۵ و ۰٫۵ هستند، هنگامی که به صورت محلی کالیبره نشده باشند.

پنمن مونتیت^۱: معادله‌ای که برای محاسبه تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ارایه شده به صورت زیر است:

$$R_s = [0.77 (0.25 + 0.5 (n/N)) \times R_a] \times [2.45 \times 10^{-9} (0.9 (n/N)) \times (0.34 - 0.14 (e_a)^{0.5}) \times (T_{kx}^4 + T_{kn}^4)] \quad (13)$$

که در آن R_a تابش برون زمینی (مگاژول بر مترمربع بر روز)، T_{kn} بیشینه دمای روزانه (کلوین)، T_{kx} کمینه دمای روزانه (کلوین) هستند (علیزاده، ۱۳۸۶).

معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های تکویی برازش)

در این تحقیق برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج مدل‌های تخمینی با مقادیر محاسبه شده با لایسی متر، از آزمون‌هایی که توسط جاکوویدز (۱۹۹۷) پیشنهاد شده است، استفاده شد. این محقق نشان داد که استفاده از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربع خطا^۲ ($RMSE$) و میانگین خطای اریبی^۳ (MBE) به تنهایی سبب ایجاد خطا در انتخاب بهترین مدل می‌شود. لذا توصیه کرد که در کنار این دو شاخص، از معیار t که ترکیبی از آنهاست نیز استفاده شود. شاخص‌های ذکر شده به صورت زیر است:

$$RMSE = \sqrt{(\sum (P_i - O_i)^2) / n} \quad (14)$$

$$MBE = \sum (P_i - O_i) / n \quad (15)$$

$$t = \sqrt{(n-1) MBE^2 / (RMSE^2 - MBE^2)} \quad (16)$$

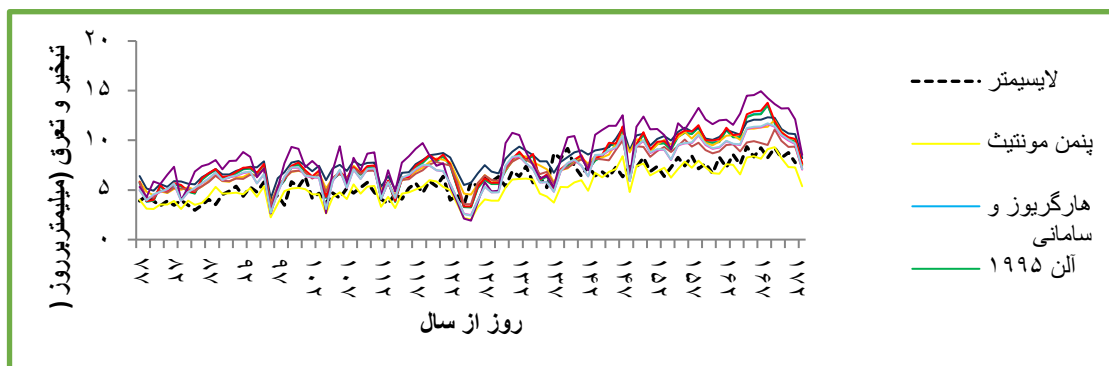
1- Penman Monteith
2- Root Mean Square Error
3- Mean Bias Error

جدول ۱- معادله‌های تبخیر و تعرق به کار گرفته شده

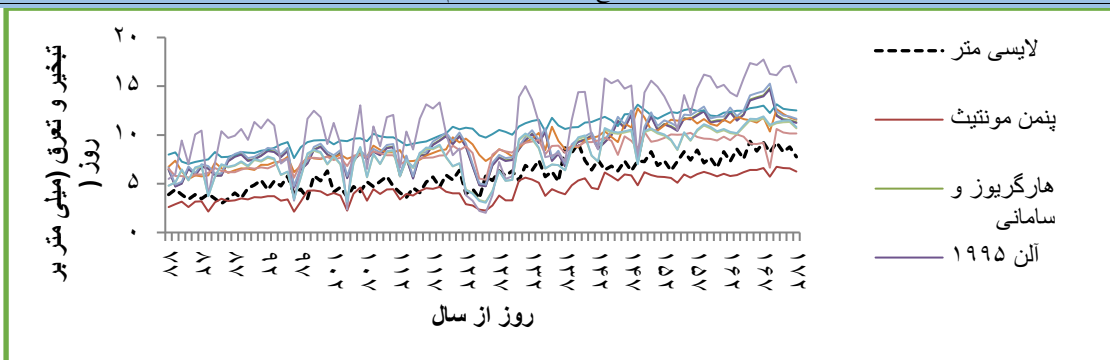
معادله	نام
$ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \quad RH < 50$ $ET_0 = 0.013 \frac{T}{T+15} (R_s + 50) \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) \quad RH > 50$	Turc (1961)
$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)}$	FAO Penman Monteith (1998)
$ET_0 = 0.53 \frac{R_s}{\lambda}$	Abtew (1996)
$ET_0 = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \frac{R_s}{\lambda}$	Priestley and Taylor ()
$ET_0 = [(0.0082T - 0.19) \times (R_s/1500)] \times 2.54$	Makkink (1972)
$ET_0 = (1.066 - 0.0013RH + 0.045U_2 - 0.0002RH \cdot U_2 - 0.0000315RH^2 - 0.0011U_d^2) \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) R_s - 0.3$	Doorenbos and Pruitt (1977)
$ET_0 = -0.611 + 0.149R_s + 0.079T$	Irmak (2003)

ثانیه)، γ ضریب سایکرومتری رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال بر درجه سلسیوس)، λ گرمای نهان تبخیر (مگاژول بر کیلوگرم)، e_s فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال) و e_a فشار بخار واقعی (کیلوپاسکال).

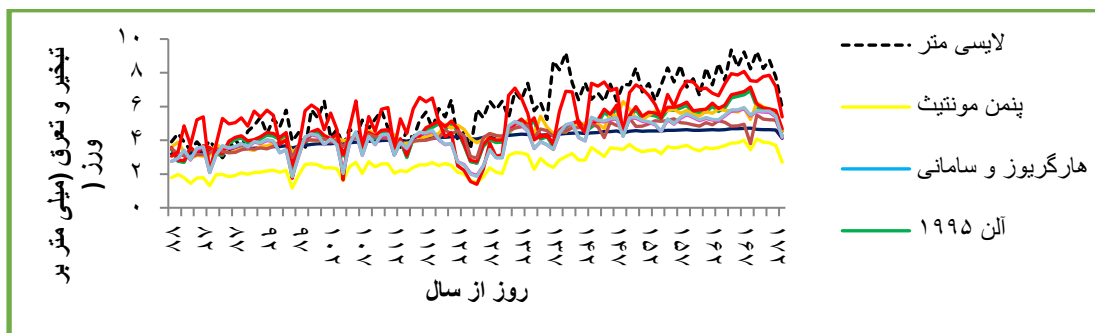
پارامترهای به کار رفته در جدول (۱) به شرح زیر است: T میانگین دمای روزانه (درجه سلسیوس)، RH میانگین رطوبت نسبی روزانه (درصد)، R_s تابش خورشیدی روزانه (مگاژول بر مترمربع بر روز)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر مترمربع در روز)، G شار گرمای خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر



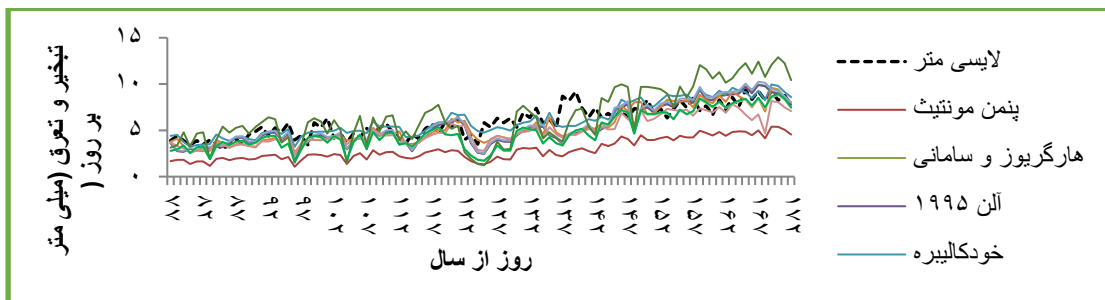
شکل ۱- مقایسه تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با روش فانوپنمن مونتیت بر اساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



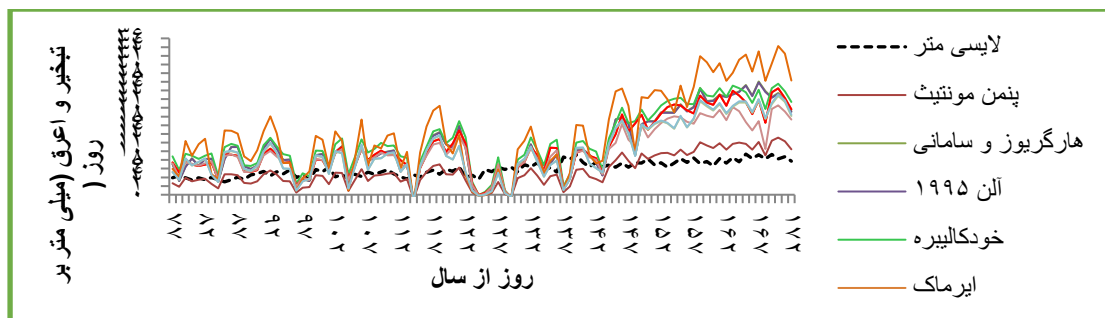
شکل ۲- مقایسه تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با روش پریستلی تیلور براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



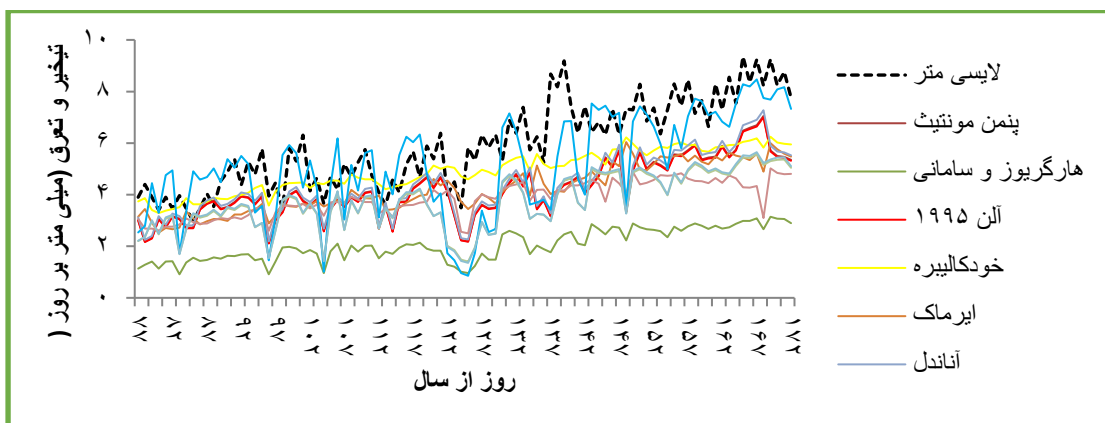
شکل ۳- تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با روش ایرماک براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



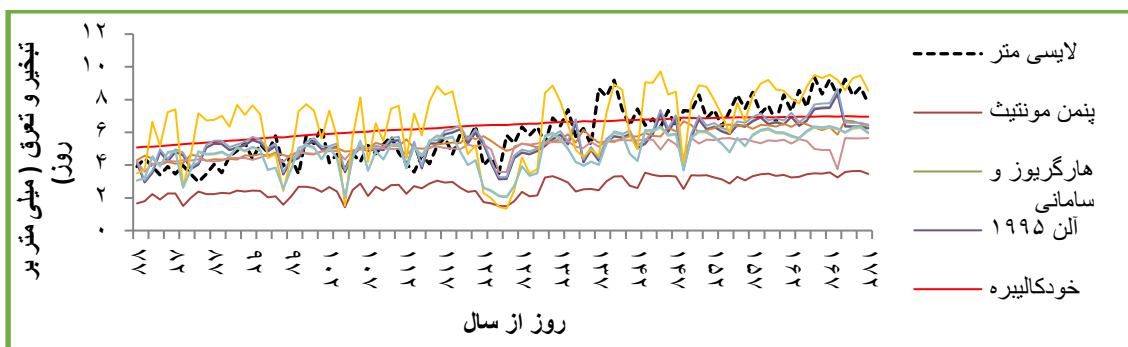
شکل ۴- تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده از روش تورک براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



شکل ۵- تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده از روش دورنبوس و پرویت براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



شکل ۶- تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده از روش مک گینز بودن براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر



شکل ۷- تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده از روش آبتیو براساس مدل‌های مختلف تابش و تبخیر تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با لایسی متر

رسید. با مشاهده جدول (۲) مشخص می‌شود روش پنمن مونتیث از برخی معادله‌ها به دلیل کمتر بودن میانگین خطای ارب یا انحراف و جذر میانگین مربع خطا و t و بیشتر بودن R^2/t و در نهایت با بیشترین رتبه دارای بالاترین دقت و روش خودکالیبره با کمترین رتبه دارای پایین‌ترین دقت در بین مدل‌ها در تبخیر و تعرق مرجع محاسبه‌ای نسبت به اندازه‌گیری شده، می‌باشد. آلدنولا و مادراماتو (۲۰۱۴) در ارزیابی نتایج چند مدل تابش و اثر آن‌ها بر معادله فائوپنمن مونتیث در کانادا، مدل خودکالیبره را ضعیف‌ترین مدل معرفی کردند. همچنین طبق نتایج بابایی و همکاران (۱۳۹۲) مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده از معادله فائوپنمن مونتیث با مدل تابش آنگستروم پرسکات بیشتر و هارگریوز سامانی را کمتر از مقدار مشاهده‌ای نشان داد، در صورتی که در این مطالعه هر دو مدل تابش آنگستروم پرسکات

مقایسه آماری تبخیر و تعرق محاسبه و اندازه‌گیری شده

شکل‌های (۱) تا (۷) تبخیر و تعرق مرجع محاسبه‌شده از معادله‌های تبخیر و تعرق به کار گرفته شده براساس معادله‌های مختلف تابش را در برابر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی متر نشان می‌دهد. جدول (۲) ویژگی‌های خط رگرسیون و مقادیر شاخص‌های آماری مورد استفاده برای مقایسه تبخیر و تعرق مرجع فائوپنمن مونتیث با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر و تعرق روزانه و جدول (۳) رتبه برآورد شده مدل‌های تابش خورشیدی در انواع مدل‌های تبخیر و تعرق را نشان می‌دهد. اکثر مدل‌های تابش، مقدار تبخیر و تعرق را بیش از مقدار لایسی متر تخمین زده‌اند. براساس جدول (۲) با بررسی پارامترها می‌توان به قضاوت جامع و صحیح راجع به کارایی معادله‌های تابش در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع با معادله فائوپنمن مونتیث

مدل تبخیر و تعرق در استان مرکزی پرداخته بودند، مدل مک‌گینز بوردن را ضعیف‌ترین مدل در بین مدل‌های مورد استفاده معرفی کردند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر ده معادله تابش بر تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با هفت معادله تبخیر و تعرق از طریق مقایسه تبخیر و تعرق اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در معادله‌های فائوپنمن مونتیت، پرستلی تیلور و دورنبوس پرویت به کارگیری مدل تابش پنمن مونتیت موجب شد که مقادیر تبخیر و تعرق محاسبه شده جواب نزدیک‌تری نسبت به لایسی‌متر نشان دهند. نتایج نشان دادند تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با مدل تورک حاصل از مدل تابش خودکالیبره دارای بهترین نتیجه نسبت به سایر مدل‌های تبخیر و تعرق می‌باشد و مدل تابش پنمن مونتیت در معادله دورنبوس و پرویت در مرتبه دوم قرار دارد. همچنین مدل تابش خودکالیبره در مدل تبخیر و تعرق پرستلی تیلور و مدل تابشی هارگریوز سامانی در مدل مک‌گینز بوردن دارای ضعیف‌ترین نتیجه‌ها بودند. با مقایسه نتایج معادله‌های تبخیر و تعرق با در نظر گرفتن انواع معادله‌های تابش خورشیدی در این مطالعه، معادله تورک بالاترین دقت را در محاسبه تبخیر و تعرق در منطقه مطالعاتی دارد. تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده با تمام مدل‌های تابش خورشیدی توسط معادله‌های ایرماک و مک‌گینز بوردن کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده بود.

و هارگریوز سامانی مقدار تبخیر و تعرق را بیش از مقدار برآورد شده با لایسی‌متر تخمین زدند.

در معادله تبخیر و تعرق پرستلی تیلور تنها مدل تابش پنمن مونتیت مقدار تبخیر و تعرق را کمتر از مقدار تبخیر و تعرق لایسی‌متر برآورد کرده است. طبق جدول (۳) مدل تابشی پنمن مونتیت تبخیر و تعرق روزانه را با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌های تابش نشان می‌دهد.

در معادله تبخیر و تعرق ایرماک، مدل باهل به دلیل بیشتر بودن رتبه در تبخیر و تعرق مرجع محاسبه‌ای نسبت به اندازه‌گیری شده، دارای بالاترین دقت می‌باشد. در این معادله تبخیر و تعرق‌های محاسبه شده کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده با لایسی‌متر است.

در معادله تبخیر و تعرق تورک اکثر مدل‌های تابشی تبخیر و تعرق را کمتر از تبخیر و تعرق لایسی‌متر تخمین زده‌اند. با توجه به جدول (۳) در صورتی که از معادله خودکالیبره جهت تخمین تابش کل استفاده شود، معادله تورک نتایج تبخیر و تعرق بهتری را ارائه می‌دهد. ترج کویک و کولاکویچ^۱ (۲۰۰۹) نشان دادند که روش هارگریوز در تخمین تبخیر و تعرق مرجع نواحی مرطوب صربستان و کرواسی مناسب نبوده و روش تورک (مبتنی بر تابش) برای این ناحیه مناسب است. آنها پس از روش تورک روش پرستلی تیلور را برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع ایستگاه‌های منطقه پیشنهاد کردند.

همه مدل‌های تابش در معادله تبخیر و تعرق دورنبوس و پرویت به جز پنمن مونتیت مقدار تبخیر و تعرق را بیش از تبخیر و تعرق لایسی‌متر برآورد کرده‌اند. مدل تابشی پنمن مونتیت دارای بهترین نتیجه در محاسبه تبخیر تعرق مرجع بوده و مدل خودکالیبره دارای ضعیف‌ترین نتیجه است.

مدل تابشی خودکالیبره در معادله‌های تبخیر و تعرق مک‌گینز بوردن و آبتیو تبخیر و تعرق مرجع را نسبت به سایر مدل‌های تابش با دقت بالاتری تخمین می‌زند. گنجی خرم دل و همکاران (۱۳۹۴) در تحقیقی که به ارزیابی و واسنجی چند

جدول ۲- مقادیر خطای ET0 برآورد شده با مدل فائونمن مونیتث در مقایسه با داده‌های لایسی متری

رتبه	R ² /t	t	ریشه میانگین مربع خطا (میلی متر بر روز)	میانگین خطای اریبی مطلق (میلی متر بر روز)	
۱	۰,۱۲۸	۴,۵۵۶	۱,۲۶۹	۰,۵۳۷	پنمن مونیتث
۶	۰,۰۵۶	۱۰,۵۱۵	۲,۲۰۷	-۱,۶۱۹	هارگریوز و سامانی
۵	۰,۰۵۶	۱۰,۳۵۶	۲,۱۸۱	-۱,۵۸۸	آلن (۱۹۹۵)
۱۰	۰,۰۳۴	۲۰,۵۰۹	۲,۵۲۷	-۲,۲۸۳	خود کالیبره
۸	۰,۰۵۰	۱۳,۴۴۷	۱,۹۸۱	-۱,۶۰۴	ایرماک
۷	۰,۰۵۲	۱۱,۱۸۲	۲,۳۲۵	-۱,۷۵۳	آناندل
۴	۰,۰۵۹	۱۰,۹۶۳	۱,۶۳۵	-۱,۲۲۲	برستو و کمپل
۲	۰,۰۷۳	۷,۹۰۴	۱,۸۲۱	-۱,۱۴۷	آنگستروم پرسکات
۹	۰,۰۴۴	۱۱,۶۲۹	۳,۳۹۶	-۲,۶۰۳	باهل
۳	۰,۰۷۱	۸,۰۳۶	۱,۸۶۲	-۱,۱۸۵	گلور و مک کلوچ

جدول ۳- رتبه برآورد شده مدل‌های تابش خورشیدی در انواع مدل‌های تبخیر و تعرق

رتبه	رتبه					
	آبتیو	مک‌گینز بوردن	دورنوس و پرویت	تورک	ایرماک	
۱۰	۵	۱	۱۰	۱۰	۱	پنمن مونیتث
۴	۱۰	۷	۴	۵	۵	هارگریوز و سامانی
۵	۶	۴	۵	۶	۴	آلن (۱۹۹۵)
۱	۲	۱۰	۱	۴	۱۰	خود کالیبره
۳	۳	۵	۶	۲	۹	ایرماک
۲	۴	۵	۲	۳	۷	آناندل
۷	۷	۸	۹	۷	۶	برستو و کمپل
۹	۹	۲	۸	۹	۲	آنگستروم پرسکات
۶	۱	۹	۳	۱	۸	باهل
۸	۸	۳	۷	۸	۳	گلور و مک کلوچ

ANFIS مدل‌های تجربی (مطالعه موردی: ایستگاه‌های

زاهدان و بجنورد). نشریه انرژی ایران، ۱۶ (۳): ۳۷-۵۸.

۴- زارعی، م. ا.، طباطبایی، س. ح.، بابازاده، ح. و صدقی، ح.، ۱۳۹۴. تعیین مناسب‌ترین مدل تابش در معادله هارگریوز سامانی در دشت شهرکرد با استفاده از داده‌های لایسی متر. مجله پژوهش آب ایران، ۹ (۳): ۴۷-۵۶.

۵- سبزی پرور، ع. ا.، تفضلی، ف.، زارع ایبانه، ح.، بانزاد، ح.، موسوی بایگی، م.، غفوری، م.، محسنی موحد، م. و مریانچی، ز.، ۱۳۸۷. مقایسه چند مدل برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک، به منظور

منابع

۱- بابایی، س.، عرفانیان، م. و خانی، ذ.، ۱۳۹۲. ارزیابی تاثیر مدل‌های مختلف تابش بر نرخ تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: ایستگاه تبریز). دومین کنفرانس بین المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا.

۲- بابامیری، ا.، دین‌پژوه، ی. و اسدی، ا.، ۱۳۹۲. واسنجی و ارزیابی هفت روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع مبتنی بر تابش خورشیدی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. نشریه دانش آب و خاک، ۲۳ (۴): ۱۴۳-۱۵۸.

۳- پیری، ج.، انصاری، ح. و فرید حسینی، ع.، ۱۳۹۲. مدل‌سازی تابش خورشید رسیده به زمین با استفاده از

- for reference evapotranspiration estimation in Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, 118: 377-385.
- 15- Allen, R. G. 1997. Self-Calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2 (2): 56-67.
- 16- Allen, R. G. 1995. Evaluation of procedures for estimating mean monthly solar radiation from air temperature. Report submitted to the United Nations Food and Agricultural Organization (FAO), Rome Italy.
- 17- Annandale, J. G., Jovanic, N. Z., Benade, N. and R. G. Allen. 2002. Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation Science*, 21: 67-57.
- 18- Bahel, V., Srinivasan, R. and H. Bakhsh. 1986. Solar radiation for Dhahran. *Saudi Arabia Solar Energy*, 11: 985-989.
- 19- Bristow, K. and G. Campbell. 1984. on the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 31 (2): 159-166.
- 20- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 108 (3): 223-230.
- 21- Irmak, S., Irmak, A., Allen, R. G. and J. W. Jones. 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (5): 336-347.
- 22- Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models. *Journal of Agricultural water management*, 95-97.
- 23- Okundamiya, M. K., Emagbetere, J. O. and E. A. Ogujor. 2016. Evaluation of various global solar radiation models for Nigeria. *International Journal of Green Energy*, 13 (5): 505-512.
- 24- Robaa, S. J. 2009. Validation of the existing models for estimating global solar radiation over Egypt. *Journal of Energy Conversion and Management*, 50: 184-193.
- 25- Trajkovic, S. and S. Kolakovic. 2009. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Journal of Water Resources Management*, 23: 3057-3067.
- 26- Yang, K., Koike, T. and B. Ye. 2006. Improving estimation of hourly, daily, and monthly solar radiation by importing global data sets. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 43-55.
- استفاده بهینه از مدل‌های تابش. نشریه آب و خاک، ۲۲ (۲): ۳۲۷-۳۴۰.
- ۶- سبزی پرور، ع. ا. و شادمانی، م. ۱۳۹۱. تحلیل روند تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از آزمون من‌کندال و اسپیرمن در مناطق خشک ایران. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵ (۴): ۸۲۳-۸۳۴.
- ۷- عرفانیان، م. بابایی حصار، س. ۱۳۹۲. ارزیابی مدل هیبرید در تخمین تابش خورشیدی روزانه در تعدادی از ایستگاه‌های تابش سنجی ایران. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۷ (۱): ۱۵۸-۱۶۸.
- ۸- عزیززاده، ا. ۱۳۸۶. طراحی سیستم‌های آبیاری (جلد اول). انتشارات دانشگاه امام رضا (ع). ۱: ۲۲۴-۲۲۵.
- ۹- فرجی مهبیاری، خ.، خانعلی، م. و فرجی مهبیاری، ز. ۱۳۹۴. ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد تابش خورشیدی روزانه بر پایه دمای هوا در چهار منطقه آب و هوایی ایران. نشریه انرژی ایران، ۱۸ (۴): ۱۷-۲۶.
- ۱۰- گنجی خرم‌دل، ن.، حسینی، م. س.، امانی، ج. و فامیل محترمی، ا. ۱۳۹۴. ارزیابی و واسنجی روش‌های تجربی مبتنی بر دما و تابش خورشیدی در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع (مطالعه موردی: منطقه ی دلجان در استان مرکزی). اولین کنگره علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران.
- ۱۱- موسوی بایگی، س. م.، اشرف، ب. و میان آبادی، ا. ۱۳۸۹. بررسی مدل‌های مختلف برآورد تابش خورشیدی به منظور معرفی مناسب‌ترین مدل در یک اقلیم نیمه خشک. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع غذایی کشاورزی)، ۲۴ (۴): ۸۳۶-۸۴۴.
- ۱۲- وزیر، ژ.، سلامت، ع.، انتصاری، م. ر.، مسچی، م.، حیدری، ن. و دهقانی سانج، ح. ۱۳۸۷. تبخیر و تعرق گیاهان (دستورالعمل محاسبه آب مورد نیاز گیاهان). انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران، ۵۹-۵۸.
- ۱۳- هژبر، ح.، معاضد، ه. و شکری کوچک، س. ۱۳۹۳. برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های تجربی، مدل‌سازی آن با شبکه عصبی مصنوعی و مقایسه آن‌ها با داده‌های لایسی‌متری در ایستگاه کهریز ارومیه. مجله مهندسی آبیاری و آب. ۴ (۱۵): ۱۳-۲۵.
- 14- Aladenola, O. O. and C. A. Madramootoo. 2014. Evaluation of solar radiation estimation methods