انتخاب بهترین مدل تابش واسنجی شده جهت ارزیابی چهار مدل تبخیر- تعرق گیاه مرجع در اقلیم نیمه خشک (مطالعه موردی کرمان)

مریم سلاجقه تذرجی[۱]، زهرا نجفی نیک[۲]، محسن عراقی زاده[۳]، مهدیه عربپور[۴]
۱کارشناس هواشناسی کشاورزی ، اداره کل هواشناسی استان کرمان،
۲ کارشناس اقلیم شناسی ، اداره کل هواشناسی استان کرمان
۳ کارشناس هواشناسی، اداره کل هواشناسی استان کرمان
۴ کارشناس آمار، اداره کل هواشناسی استان کرمان

چکیده
تبخیر- تعرق یکی از مهمترین مؤلفه‌های چرخه آب در طبیعت است اما اندازه‌گیری میزان واقعی آن (توسط لایسیمتر به عنوان دقیق‌ترین ابزار اندازه‌گیری) بسیار مشکل و عملاً غیرقابل اجراست، بنابراین بکارگیری روابطی که تنها با استفاده از داده‌های هواشناسی موجود، تخمین قابل قبولی از آن ارائه دهند، واجب به نظر می رسد. در این پژوهش، پنمن- مانتیث- فائو با (*PMF* 56) مطالعه ۴ روش مختلف برآورد تبخیر- تعرق شامل: پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ (*PMF* 56)، جنسن- هیز شماره ۲ (*JH* 2) و جنسن- هیز شماره ۱ (*JH* 1) برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع روزانه چمن (*ET*₀) تابش ایرماک (*PMFI*) در شهر کرمان، مورد ارزیابی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد که در ازای افزایش و کاهش ۵ و ۱۰ درصد در مقدار پارامترهای تابش، درجه حرارت و باد، حساسیت مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق به عامل تابش بیشتر می‌باشد، نتایج به دست آمده نشان داد که مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ با مدل تابش خلیلی۲، مناسب ترین مدل برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع می باشد و مدل های جنسن- هیز شماره ۱ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک، دقت پایینی دارند.

واژه های کلیدی: مدل‌های تبخیر- تعرق گیاه مرجع، مدل‌های تابش، اقلیم خشک

با توجه به ضرورت برآورد تبخیر- تعرق در مدیریت منابع آب، برنامه ریزی آبیاری و ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر روی بازده و تامین نیاز آبی گیاهان، تعیین دقیق تبخیر-تعرق مرجع بسیار مهم و حیاتی می باشد. بر اساس استاندارد فائو، تبخیر- تعرق گیاه مرجع عبارتست از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (چمن) در یک دوره زمانی مشخص مصرف می‌کند به طوری که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). در روش های تجربی که تا کنون جهت برآورد تبخیر-تعرق که ارائه شده است تابع متغیرهای اقلیمی خاصی مانند دمای هوا، سرعت باد و تابش خورشیدی می‌باشد (آلن و پرویت ۱۹۸۸). و اکثر این روش‌ها با واسنجی‌های محلی به دست آمده‌اند و اعتبار جهانی آن‌ها محدود است. لذا در هر منطقه با توجه به اقلیم آن، پارامترهای در دسترس، و کیفیت متغیرها باید اقدام به انتخاب مدل مناسب *ETo* نمود. از طرفی با توجه به مشکلات متعددی که در بکارگیری لایسیمترها وجود دارد، استفاده از مدل هایی که بتوانند این فرایند را با دقت نسبتا مطلوبی شبیه سازی و برآورد نمایند امری ضروری بنظر می رسد. در این راستا، مدل های تبخیر-تعرقی که به مولفه های تابش نیاز دارند، بدلیل عدم دسترسی به داده های واقعی تابش، کمتر مورد استقبال کاربران قرار گرفته است. تابش خورشیدی یکی از متغیرهای هواشناسی است، که بر بسیاری از فرایندهای آب و خاک مانند

Archive of SID
www.SID.ir

تبخیر،تعرق، ذوب برف و رشد گیاهان اثر می گذارد. علیرغم اهمیت این متغیر، اندازه گیری مستقیم آن بطور محدود انجام می شود (سلطانی و مرید، ۱۳۸۴). فرمولهای متفاوتی برای محاسبه انرژی خورشیدی از جمله صباغ، هارگریوز سامانی[۱]، تورنتون-رانینگ[۲]، ویس[۳]، دانشیار[۴]،پاتریج[۵] و آنگستروم[۶] پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای درجه دقت متفاوتی هستند. فرمولهای محاسباتی تبخیر- تعرق در هر منطقه نسبت به داده های تابش یا نوسانات انرژی خورشیدی دارای حساسیت های متفاوتی میباشند. امامتاسفانه تاکنون مطالعه جامعی در زمینه سنجش حساسیت مدل های ETo به تابش ورودی انجام نگرفته است، ولی معدود بررسیهای انجام شده (تفضلی،۱۳۸۵) بیانگر این واقعیت است که بکارگیری مدل دقیق تابش میتواند نقش مهمی در بهبود نتایج تخمین ETo ایفا نماید.

سلیح و سندیل(۱۹۸۴) در مطالعه‌ای در عربستان نشان دادندکه در مناطق خشک و نیمه خشک، دو پارامتر دما و تابش خورشیدی نقش اساسی در برآورد تبخیر- تعرق مرجع دارند و سایر عوامل در درجه دوم اهمیت قرار دارند. آنگستروم در سال ۱۹۲۴ با استفاده از داده های جوی نظیر ساعات آفتابی، مدل ساده ای را برای تخمین مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_S) در یک سطح افقی، ارائه کرد. بعد از وی محققین زیادی اقدام به اصلاح مدل آنگستروم نمودند که ضرایب تبدیل و داده‌های ورودی مدل‌های ارائه شده توسط آن‌ها وابسته به شرایط اقلیمی است. برخی از محققین برای افزایش دقت مدل خود، مؤلفه‌های مستقیم تابش و نیز مؤلفه‌های تابش ناشی از پخش نور خورشید که به صورت پراکنده در محیط وجود دارند را به طور مجزا با استفاده از نسبت $\frac{n}{N}$ و زاویه سمت الرأس خورشید (θ) محاسبه نمودند (پاتریج و پروکتور، ۱۹۷۶). مدل صباغ۷(۱۹۷۷) برای شرایط اقلیمی ایران آزمایش گردید. نتایج بررسی نشان داد که این مدل دو مولفه ای برای شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران مناسب می باشد (سبزی پرور، ۲۰۰۷). سبزی پرور و شتائی (۲۰۰۶) همچنین نشان دادند، مدل های تابش پایه گذاری شده بر مبنای ابرناکی (CF)، تخمین های خوبی از تابش خورشیدی (R_s) در اقلیم های خشک و نیمه خشک می دهند.

به طور کلی با توجه به کیفیت پایین برخی پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایران از جمله تابش خورشیدی، استفاده از مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق با ورودی‌های کم‌تر ضروری به نظر می رسد (سبزی‌پرور و شتائی، ۲۰۰۷). بنابراین هدف از انجام این تحقیق، مطالعه انواع مدل‌های تابش، جهت استفاده در مدل‌های تخمین تبخیر- تعرقی است که به داده‌های هواشناسی کم‌تری نیازمندند تا بهترین و مناسب‌ترین‌آن‌ها در یک اقلیم نیمه-خشک معرفی شود.

مطالعات سپاسخواه (۱۳۷۶) در سه منطقه باجگاه، جهرم و کوشکک نشان داد که در شرایط کشت واحه ای در ایران، به علت وجود جریان افقی گرما محاسبه تبخیر- تعرق به روش پنمن- مانتیث کارائی لازم را ندارد و تخمین کمتری

---

[1] -Hargreaves-Samani
[2] -Thornton-Running
[3] -Weiss
[4] -Daneshyar
[5] -Paltridge
[6] -Angstrom
[7] -Sabbagh

Archive of SID

را از واقعیت ارائه می کند. در عوض، به نظر می رسد که روش جنسن- هیز۸(در بعضی شرایط) کارائی بهتری داشته باشد. معادله جنسن- هیز (۱۹۶۳) نیز برای محاسبه ETo در نواحی نیمه خشک غرب آمریکا که شباهت اقلیمی با ایران دارد، ارزیابی گردید. ایرماک۹ و همکاران (۲۰۰۳) نشان دادند که بکارگیری برخی مدل های تابش برای اقلیم های خشک و نیمه خشک جوابهای معتبری را در تخمین ETo ارائه می نماید.

مواد و روش ها

داده های مورد استفاده برای این تحقیق شامل، دمای حداکثر و حداقل روزانه، دمای میانگین روزانه، رطوبت ماکزیمم و مینیمم و متوسط، سرعت باد، بارش، ساعات آفتابی، تابش، حداکثر، طول مدت روز (N) قبل از تجزیه و تحلیل داده ها، کیفیت آنها توسط آزمون همگنی یا ران تست مورد آزمون کیفی قرار گرفت. روش ساده عددی که برای این منظور انتخاب شد،در بررسی داده های خام گاها مشاهده گردید که داده های بعضی روزها نسبت به میانگین اقلیمی انحراف معیار بزرگی را نشان می دهند. جهت جلوگیری از انتشار خطا، اینگونه داده ها از سری آماری حذف گردیدند. منطقه مورد مطالعه شهر کرمان می باشد ایستگاه سینوپتیک کرمان با طول جغرافیایی ۵۸ و۵۶ وعرض جغرافیایی ۱۵ و۳۰وارتفاع 1753.8 متر در سال 1350 تاسیس وشروع به کار نموده است. تنوع آب و هوایی استان کرمان به دلیل شرایط خاص اقلیمی در خور توجه است به طور کلی آب و هوای استان کرمان خشک تا فراخشک ارزیابی شده و از مشخصات بارز آن، رطوبت و بارندگی کم، تبخیر و تعرق فوق العاده زیاد و اختلاف شدید دمادر فصول تابستان و زمستان و طول شبانه روز است. وضعیت اقلیمی نواحی مختلف استان کرمان، تحت تاثیر عوامل منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای متعددی قرار دارد. از جمله این عوامل می‌تواند به امتداد رشته کوههای زاگرس و کوههای مرکزی، واقع شدن کویر لوت در شرق، عرض جغرافیایی پایین، وسعت منطقه، زاویه تابش خورشید، فیزیوگرافی منطقه، تأثیرتوده‌های هوایی مختلف و... اشاره نمود. و از نظر اقلیمی (با توجه به مدل تعیین اقلیم دومارتن) جزو مناطق نیمه خشک ایران محسوب می شود. در جدول ۱، خصوصیات اقلیمی شهر کرمان نشان داده شده است. هدف از این تحقیق، مقایسه چند روش محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع به منظور انتخاب بهترین مدل تابش می باشد. برای تأمین این هدف از داده‌های به دست آمده از لایسیمتر وزنی موجود در ایستگاه دانشکده کشاورزی باهنر کرمان استفاده شد.

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی شهر کرمان

نوع اقلیم	ضریب اقلیمی دومارتن	حداقل بارندگی (میلی متر)	حداکثر بارندگی (میلی متر)	بارندگی سالیانه (میلی متر)	حداکثر دمای مطلق (سانتیگراد)	حداقل دمای مطلق (سانتیگراد)	میانگین دمای سالیانه (سانتیگراد)
بیابانی	۵/۶	۲۷/۴	۱۷۷/۵	۸۴/۹	۴۲/۰	-۳۰	۱۵/۷

[8] -Jensen-Haise
[9] -Irmak

Archive of SID
www.SID.ir

حدود ۸۰٪ مساحت استان که در شرایط آب و هوایی خشک و فرا خشک قرار گرفته است.

مدل های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع:

۴ مدل انتخاب شده برای تخمین $ET_\circ$ عبارتند از:

مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ $(PMF56)$:

این مدل ترکیبی توسط آلن و همکاران در سال ۱۹۹۸ به شکل زیر ارائه شد:

$$ET_\circ = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{\overline{T} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (۱)$$

دقیق ترین فرمول محاسبه تبخیر – تعرق گیاه مرجع از نظر کارشناسان سازمان فائو این مدل است و حتی در بسیاری از مطالعات به جای اندازه‌گیری با لایسیمتر می‌توان از آن استفاده کرد. پارامترهای مورد استفاده در این معادله در منبع مورد استفاده آمده است و به دلیل طولانی بودن از نوشتن آن ها خودداری گردیده است.

مدل پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک $(PMFI)$:

این مدل مشابه $PMF56$ می‌باشد با این تفاوت که در آن مقدار تابش خالص (به جای روش رایج فائو ۵۶) از روش ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) که به صورت رابطه زیر است، محاسبه می شود :

$$R_n = (-0.09T_{\max}) + (0.203T_{\min}) - (0.101RH_{mean}) + (0.687R_s) + 3.97 \quad (۲)$$

که در این معادله، RH_{mean} رطوبت متوسط(درصد) می باشد.

مدل جنسن- هیز شماره ۱ $(JH1)$

مانند مدلهای قبلی در این مدل نیز از عامل تابش استفاده می شود با این تفاوت که به جای تابش خالص از تابش خورشیدی (R_s) استفاده می شود این مدل برای اقلیم های خشک و نیمه خشک معرفی شده است. میزان تبخیر- نعرق مرجع در این مدل برابر است با:

$$ET_\circ = C_T(\overline{T} - T_x)R_s \quad (۳)$$

که در آن C_T ثابتی سالانه و برابر است با:

$$C_T = \frac{1}{45 - (\frac{h}{137}) + (\frac{365}{e_{s\max} - e_{s\min}})} \quad (۴)$$

در این معادله h: ارتفاع از سطح دریا (m) است. همچنین $e_{s\max}$: فشار بخار اشباع به ازای ماکزیمم روزانه دمای هوا در گرمترین ماه سال (mb) و $e_{s\min}$: فشار بخار اشباع به ازای مینیمم روزانه دمای هوا در گرم ترین ماه سال (mb) می باشند و از روابط زیر به دست می آیند:

$$e_{s\max} = \exp(\frac{19.08T_{\max} + 429.41}{T_{\max} + 237.3}) \quad (۵)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$e_{s\min} = \exp(\frac{19.08T_{\min} + 429.41}{T_{\min} + 237.3}) \quad (۶)$$

در این روابط نیز $T_{\max}$: حداکثر درجه حرارت هوا در گرمترین ماه سال (C) و $T_{\min}$: حداقل درجه حرارت هوا در گرمترین ماه سال (C) است.

همچنین در رابطه ۳، T_x ثابتی سالانه بوده و برابر است با :

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_{s\max} - e_{s\min}) - \frac{h}{500} \quad (۷)$$

بنابراین با داشتن دمای متوسط روزانه و مقدار تابش خورشیدی در هر روز می توان با استفاده از معادله ۲۱ تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه گیاه چمن را به دست آورد (جیمز، ۱۹۸۸).

مدل جنسن- هیز شماره ۲ $(JH\,2)$:

این مدل نسبت به مدل قبلی از پارامترهای کمتری برخوردار بوده و به صورت رابطه زیر است:

$$ET_r = (0.025\overline{T} + 0.08)R_s \quad (۸)$$

که در آن ET_r: تبخیر- تعرق گیاه مرجع یونجه (mm/d) است (جنسن و هیز، ۱۹۶۳). برای این که این مدل با سایر مدل ها قابل مقایسه باشد، تبخیر- تعرق گیاه یونجه با توجه به ضرایب ارائه شده به صورت زیر به تبخیر- تعرق گیاه چمن تبدیل شد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰).

$ET_r = 1.15ET_o$ به طور کلی (۹)

در هر روش محاسباتی برای تخمین تبخیر- تعرق ضمن در دسترس بودن داده ها باید دقت تخمین نیز بالا باشد. معادله پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ به پارامترهای بسیاری نیاز دارد که امکان اندازه گیری همه آن ها در بسیاری مناطق یا وجود ندارد و یا این که دقت اندازه گیری ها به دلایل مختلف کافی نمی باشد. بنابراین بهتر است بسته به شرایط منطقه از معادله مناسب استفاده نمود.

حساسیت سنجی

برای مشخص کردن درجه اهمیت پارامترهای ورودی در معادلات تبخیر- تعرق آنالیز حساسیت روی آن ها صورت گرفت. به این منظور پارامترهای دما، تابش و سرعت باد هر کدام ۵ و ۱۰ درصد افزایش و کاهش یافتند و سپس میزان تغییرات مدل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بیشترین حساسیت همه مدل های تبخیر- تعرق به پارامتر تابش می باشد و این حساسیت در روزهای گرم سال، محسوس تر است. در میان مدل های ذکر شده، مدل پنمن- مانتیث- فائو (محاسبه شده با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک) به طور متوسط به افزایش مقدار پارامتر تابش، حساسیت بیشتری نشان می دهد. به طور کلی مشاهده شد که به ازای ۵ درصد افزایش مقدار تابش، مقادیر افزایش تبخیر- تعرق برای مدل جنسن- هیز شماره ۱ و ۲ در همه روزها ثابت می باشد (به ترتیب ۵ و ۴/۹۷ درصد) در حالی که این میزان در هر دو مدل پنمن- مانتیث- فائو بین ۳/۴۸ تا ۶/۶۴ درصد و به طور متوسط ۵/۲۱ درصد، متغیر است. جدول ۲ و ۳ مقدار افزایش تبخیر- تعرق به ازای افزایش و کاهش سایر پارامترها به میزان ۵ و ۱۰ درصد را نشان می دهند.

مدل های مورد استفاده برای تخمین تابش خورشیدی:

Archive of SID

www.SID.ir

داده های روزانه تابش خورشید از نیازهای اصلی مدل های شبیه سازی رشد گیاهان برای پیش بینی سرعت فتوسنتز، دمای کانوپی و سرعت تبخیر و تعرق می باشند. این داده‌ها فقط در تعداد معدودی از ایستگاههای هواشناسی ثبت می شوند و در صورتی که موجود نباشند به روشهای مختلف می توان شبیه سازی و برآورد گردنداز جمله روشهای شبیه سازی می توان به به استفاده از سنجش از دور، روش های درون یابی مکانی و روابط همبستگی بین تابش ورودی و سایر متغیرهای هواشناسی را نام برد. مقدار تابش دریافتی در ایستگاه کرمان ۷۴۹۱/۱۵ مگاژول بر متر مربع در سال بیشترین مقدار تابش دریافتی را در بین ایستگاههای هواشناسی کشور دارد(کمالی، ۱۳۸۴). با توجه به این که نتایج، نشان دهنده حساسیت بیشتر معادلات تبخیر- تعرق به پارامتر تابش می باشند، بنابراین از مدل های مختلف تابش استفاده شد تا با انتخاب بهترین آن ها دقیق ترین معادله تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع برای منطقه کرمان انتخاب شود. مدل های تابش مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از:

مدل آنگستروم

مدل آنگستروم اولین بار در سال ۱۹۲۴ توسط آنگستروم ارائه گردید و تابش کل روزانه را با استفاده از ساعات آفتابی n برآورد می کند.:

$$R_s = R_a(a + b\frac{n}{N}) \qquad (۱۰)$$

که در آن R_s: تابش دریافتی در سطح افقی بر روی زمین (cal/cm^2d)، R_a: حداکثر تابش دریافتی ممکن در سطح افقی در خارج از جو (cal/cm^2d)، n: ساعات آفتابی روزانه، N: حداکثر طول روز $(hour)$ و a و b: ضرایب ثابت منطقه می باشند. کمالی و مرادی (۱۳۸۴) ضرایب b و a این معادله را برای کرمان وچند ایستگاه دیگردر کشور محاسبه نمودند. بهادری و میر حسینی (۱۳۸۲و ۱۳۸۱) با برقراری ارتباط بین تابش و پارامترهایهواشناسی برای برآورد تابش شهر کرمان فرمول زیر را رائه نمودند.

$$Kt = 0.344 + 0.353S + 0.0026T \qquad (۱۱)$$

که S: کسر ساعات آفتابی و T: دمای هوا می باشد.

مدل خلیلی-رضایی صدر ۱

این رابطه در واقع همان رابطه آنگستروم- پرسکات می‌باشد که در سال ۱۳۷۶ توسط خلیلی و رضایی صدر برای ایستگاه‌های مختلف ایران واسنجی شده و برای شهر کرمان به صورت رابطه زیر ارائه شده است (خلیلی و رضایی صدر،۱۳۷۶) :

$$R_s = R_a(0.3 + 0.28\frac{n}{N}) \qquad (۱۲)$$

مدل خلیلی-رضایی صدر ۲

خلیلی و رضایی صدر اعتقاد داشتند که رابطه آنگستروم- پرسکات تأثیر طیف جذبی بخارآب در اتمسفر را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین معادله دیگری برای مناطق مختلف ایران به دست آوردند که برای شهر مشهد به صورت زیراست (خلیلی و رضایی صدر،۱۳۷۶) :

$$R_s = R_a\left[0.54\exp\left(0.35(\frac{n}{N} - RH)\right)\right] \qquad (۱۳)$$

در این معادله RH میانگین رطوبت نسبی سه دیدبانی بر حسب صدم می‌باشد.

Archive of SID

www.SID.ir

مدل علیزاده-خلیلی

علیزاده و خلیلی (۱۳۸۸) معادله دیگری برای تابش به دست آوردند که به صورت زیر می باشد:

(۱۴)

$$R_s = (0.32 + 0.42\frac{n}{N} - 0.0006RH - 0.0028P - 0.0019(T_{\max} - T_{\min}) - 0.0048D - 0.0007D^2)R_a$$

در این رابطه RH رطوبت نسبی، P بارش (میلی متر)، T دمای بیشینه و کمینه (درجه سلسیوس) و D کمبود فشار بخار اشباع(میلی بار) می باشد (علیزاده و خلیلی، ۱۳۸۸).

شاخص‌های خطا سنجی

برای مقایس مدل ها از سنجه های آماری شامل جذر میانگین مربعات خطا($RMSE$)، درصد انحرافات جذر میانگین مربعات خطا از میانگین داده های اندازه گیری شده($\%RMSE$) ، میانگین خطای اریبی (MBE) که بر اساس رابطه (۱۵) و (۱۶) محاسبه می شوند استفاده گردیده است. اگر از شاخص‌های $RMSE$ و MBE به تنهایی استفاده شود، در انتخاب بهترین مدل تخمین تبخیر- تعرق خطا ایجاد می شود، لذا توصیه نمود که علاوه بر این دو شاخص، از معیار t (رابطه ۱۷)که ترکیبی از آن ها است، استفاده شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (۱۵)$$

$$MBE = \frac{\sum_1^n (P_i - O_i)}{n} \quad (۱۶)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (۱۷)$$

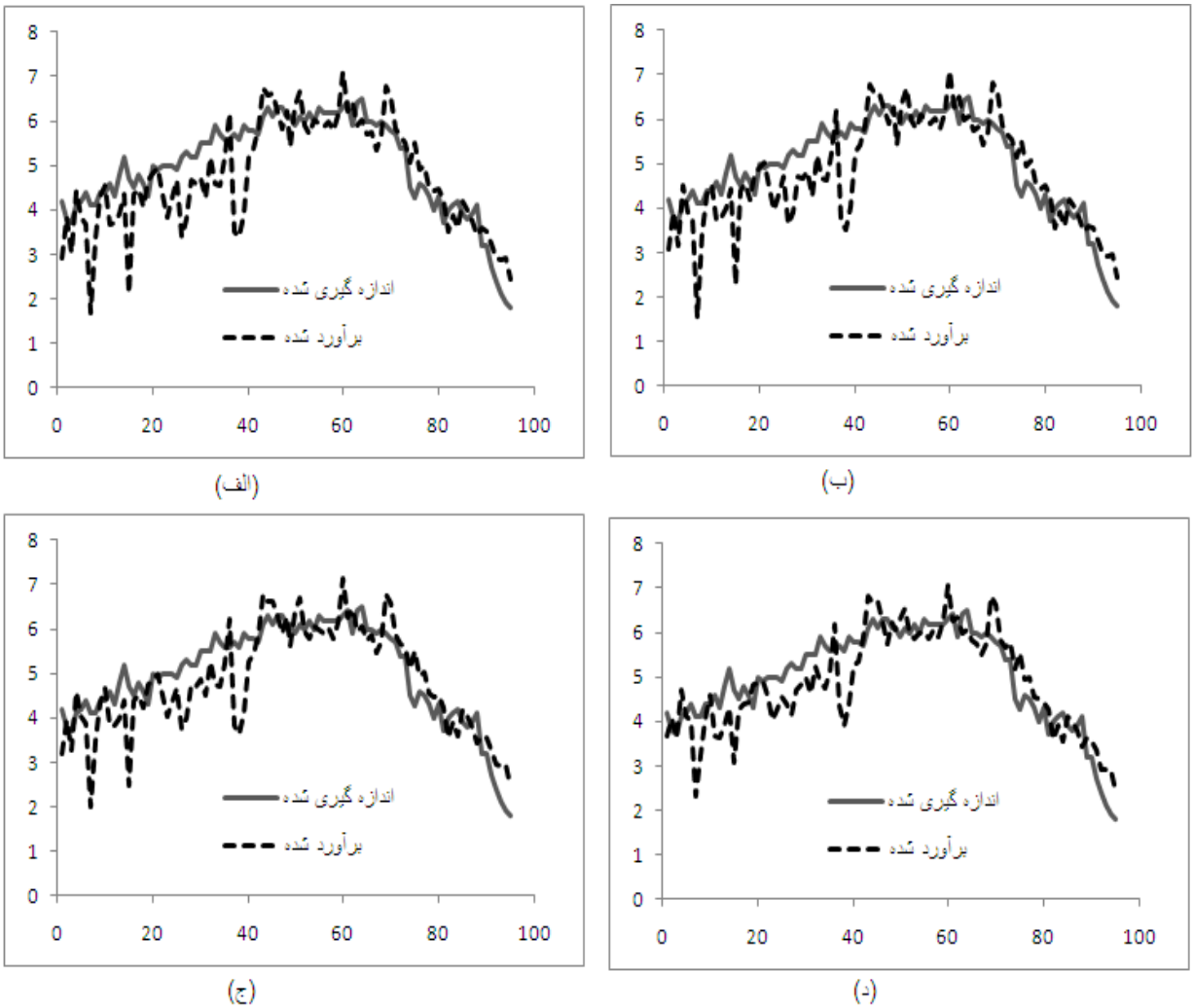
در روابط بالا P_i : مقدار برآورد شده تبخیر- تعرق، O_i : مقدار اندازه گیری شده تبخیر- تعرق و n: تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

مقادیر تابش به روش‌های گفته شده در بالا ، با توجه به پارامترهای مورد نیاز در هر روز، محاسبه شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق توسط لایسیمتر وزنی مقایسه گردید. نتایج حاصله در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده اند.

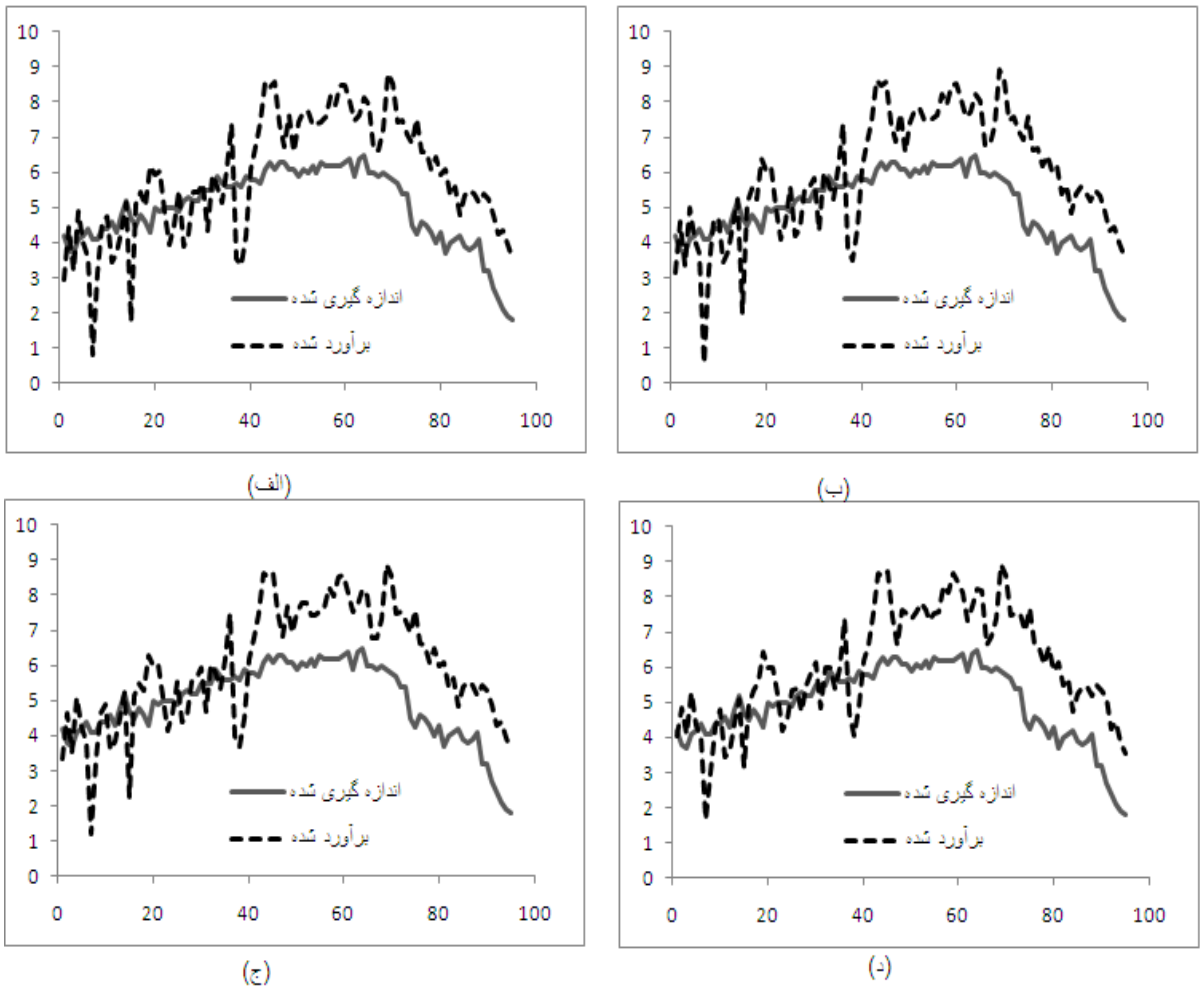
Archive of SID

www.SID.ir



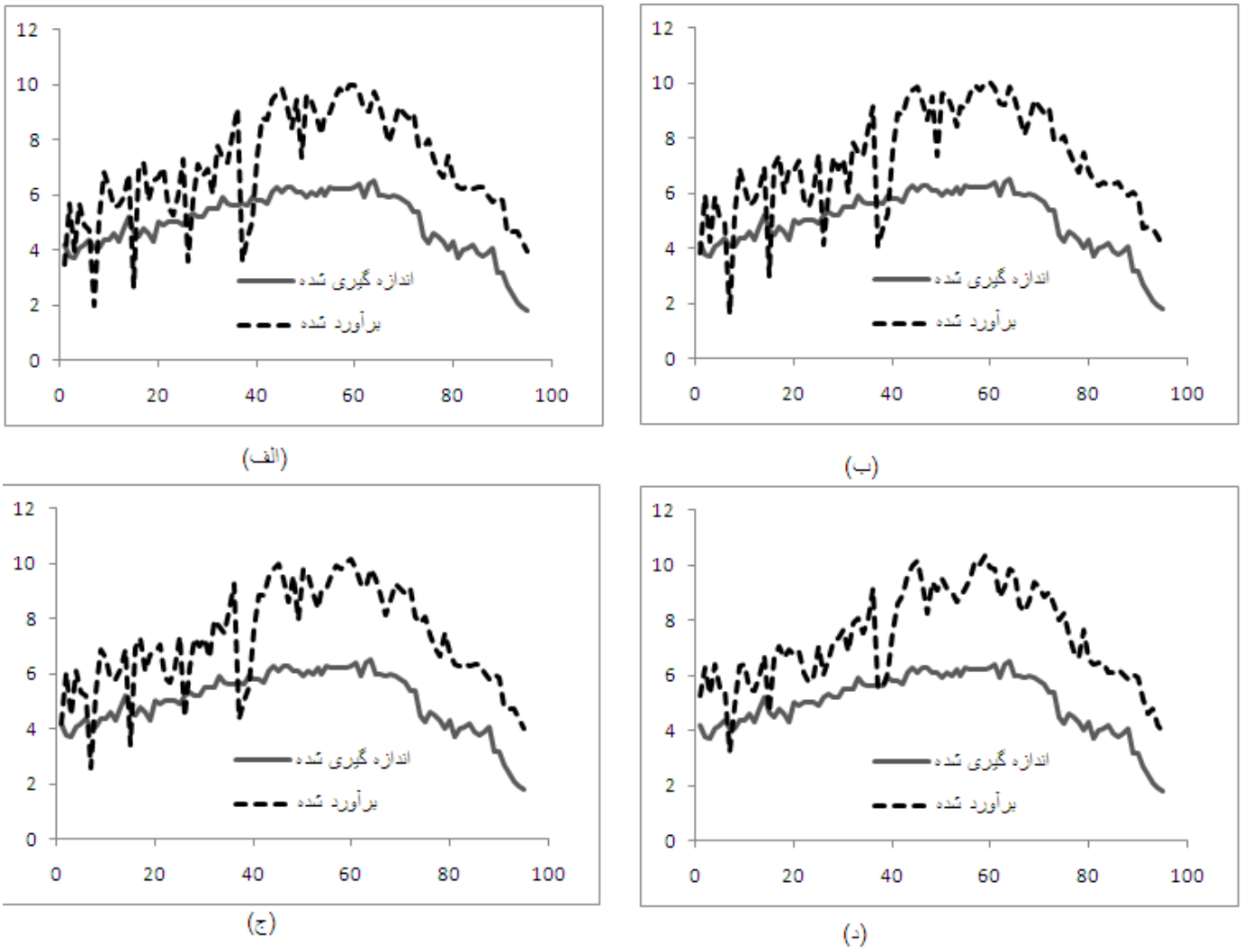
شکل۱- مقدار اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن- مانتیث- فائو۵۶ با استفاده از مدل های تابش آنگستروم (الف)، علیزاده- خلیلی (ب)،خلیلی-رضایی صدر۱ (ج) و خلیلی-رضایی صدر۲(د).

Archive
www.SID.ir



شکل۲- مقدار اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک با استفاده از مدل های تابش آنگستروم (الف)، علیزاده- خلیلی (ب)،خلیلی-رضایی صدر۱ (ج) و خلیلی-رضایی صدر۲(د).

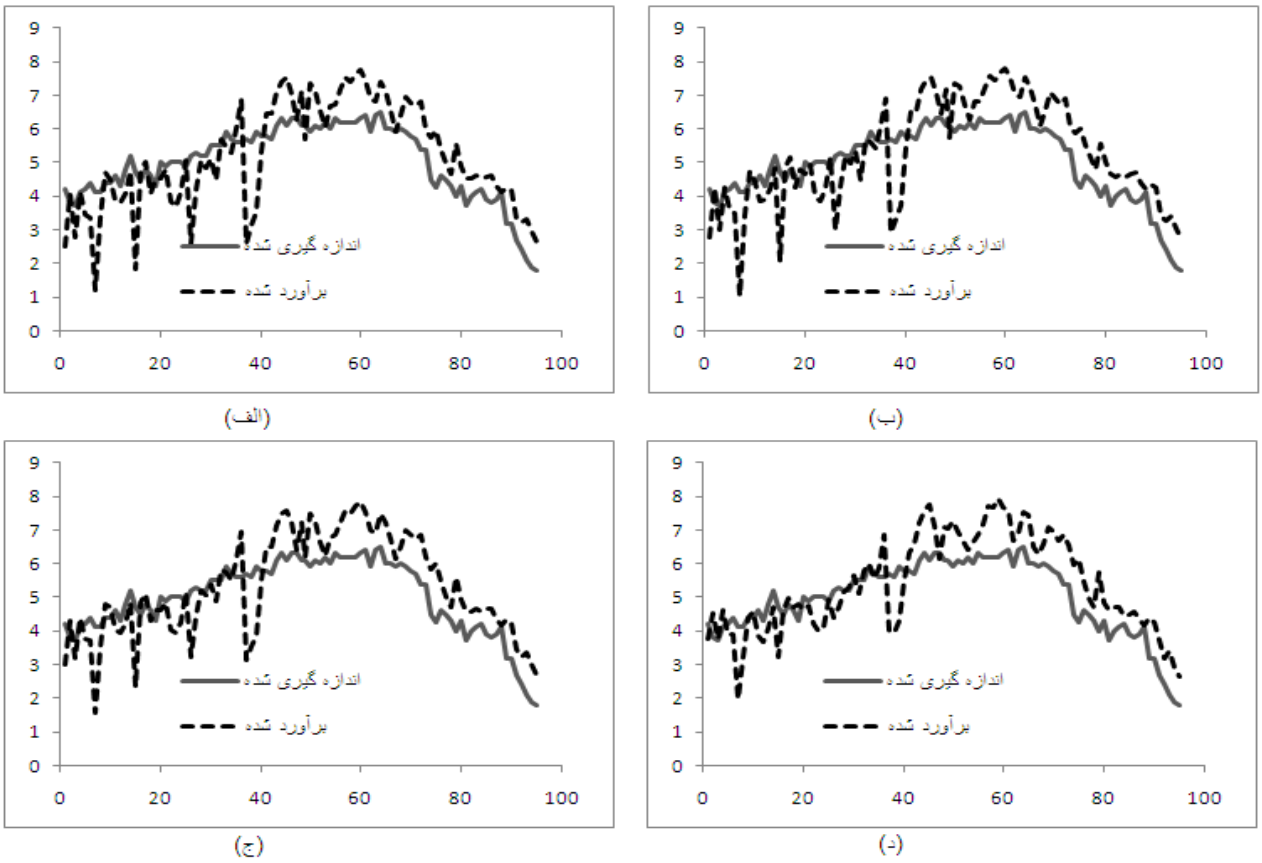
Archive
www.SID.ir



شکل۳- مقدار اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش جنسن- هیز ۱ با استفاده از مدل های تابش آنگستروم (الف)، علیزاده- خلیلی (ب)،خلیلی-رضایی صدر۱ (ج) و خلیلی-رضایی صدر۲(د).

Arc

www.SID.ir



شکل۴- مقدار اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش جنسن- هیز ۲ با استفاده از مدل های تابش آنگستروم (الف)، علیزاده- خلیلی (ب)،خلیلی-رضایی صدر۱ (ج) و خلیلی-رضایی صدر۲(د).

در همه مدل‌های بررسی شده(شکلهای ۱ تا ۴)، ملاحظه می شود بنا به دلایلی مانند بارش ناگهانی قابل توجه و گاه ابرناکی زیاد و کاهش تابش رسیده به سطح زمین مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده در چند روز خاص با مقادیر اندازه-گیری شده تفاوت فاحشی دارد. ملاحظه می شود که مدل جنسن- هیز شماره ۱ نسبت به سایر مدل ها از دقت کمتری برخوردار است و مقادیر تبخیر- تعرق را خیلی بیشتر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط لایسیمترها تخمین می زند. و طبق انتظار، مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ نسبت به سایر مدل ها دقت بیشتری دارد و این به دلیل وجود پارامترهای بسیار زیاد به کار رفته در آن می باشد. در دو مدل جنسن- هیز شماره ۲ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک، مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده در نیمه دوره تحت بررسی، تفاوت بیشتری با مقدار اندازه گیری شده دارد. مقایسه دو روش پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک، نشان می دهد که محاسبه تابش خالص به روش ایرماک در دوره گرم‌تر سال، مقادیر مناسبی برای این پارامتر ارائه نمی دهد. در جدول ۵ نتایج آنالیز آماری انجام گرفته نشان داده شده است.

Archive

www.SID.ir

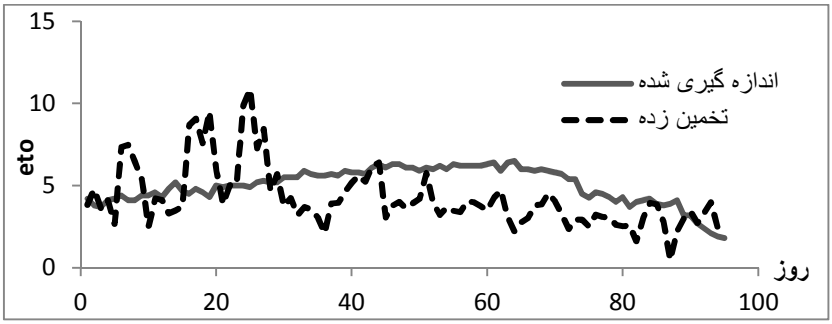
جدول ۴- نتایج آنالیز آماری انجام شده

مدل	پارامتر آماری	آنگستروم خلیلی- علیزاده	خلیلی- علیزاده	خلیلی-رضایی صدر۱	خلیلی-رضایی صدر۲
پنمن- مانتیث- فائو ٥٦	RMSE	0.814	0.803	0.765	0.614
	R^2	0.625	0.632	0.672	0.741
	MBE	-0.303	-0.282	-0.230	-0.150
	t	3.435	2.814	2.621	2.172
جنسن هیز۱	RMSE	2.475	2.568	2.555	2.582
	R^2	0.518	0.564	0.596	0.649
	MBE	2.013	2.198	2.258	2.313
	t	15.610	16.336	19.303	23.014
جنسن هیز۲	RMSE	1.072	1.043	1.008	0.838
	R^2	0.512	0.621	0.702	0.713
	MBE	0.168	0.259	0.319	0.401
	t	1.442	2.521	3.147	4.454
پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک	RMSE	1.601	1.742	1.635	1.588
	R^2	0.393	0.399	0.428	0.450
	MBE	0.888	0.964	0.993	1.112
	t	7.135	8.125	8.857	9.754

با توجه به جدول ۴، مدل تبخیر- تعرق پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ همبستگی بیشتری با داده‌های لایسیمتری دارد و مدل جنسن- هیز ۲ در رتبه دوم قرار دارد. مدل های جنسن- هیز شماره ۱ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک نیز به دلیل مقادیر بالای RMSE و t قابل اعتماد نمی باشند. همچنین ملاحظه می‌شود که با در نظر گرفتن مدل‌های تابش بررسی شده، مدل تابش آنگستروم با ضرایب پیشنهادی توسط خلیلی و رضایی صدر ۲، بهتر از سایر مدل‌های بررسی شده می-باشد و مدل خلیلی- رضایی صدر ۱، علیزاده- خلیلی و در رتبه‌های بعدی قرار دارند. برای تخمین دقیق‌ترین معادله تبخیر- تعرق گیاه مرجع، علاوه بر انتخاب مدل مناسب منطقه، پارامترهای هواشناسی مورد استفاده نیز باید دارای کیفیت بالایی باشند. این تحقیق نیز دقت بالای مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ که پیشنهاد سازمان فائو نیز می باشد نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده را نشان داد (جدول ۴). شکل ۵ و جدول ۵ نشان می‌دهند که مدل هارگریوز-سامانی نسبت به مدل های جنسن- هیز شماره ۱ و ۲ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک از دقت بالاتری برخوردار است و در صورت عدم امکان استفاده از مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ می توان از این مدل استفاده نمود.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۵. مقدار اندازه گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق با مدل هارگریوز- سامانی

جدول ۵- آنالیز آماری مدل هارگریوز – سامانی در مقایسه با داده های لایسیمتری

مدل	پارامتر آماری	
هارگریوز- سامانی	RMSE	۰/۹۳۲
	R^2	۰/۵۰۳
	MBE	۰/۴۲۱
	t	۵/۱۲۱

با توجه به اهمیت تابش در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع و عدم اندازه‌گیری آن در برخی ایستگاه‌ها، پیشنهاد می‌شود که از روش‌های ارائه شده در این تحقیق برای تخمین تابش خورشیدی استفاده شود.

جدول ۲- متوسط درصد افزایش مقدار تبخیر- تعرق در دوره مورد بررسی به ازای ۵ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دما، تابش و باد

مدل	افزایش ٪ ۵			کاهش ٪ ۵		
	دما	تابش	باد	دما	تابش	باد
پنمن- مانتیث- فائو (با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک)	۳/۶۸	۶/۲۰	۰/۹۹	۳/۱۸	۶/۲۳	۰/۹۹۶
جنسن- هیز شماره ۱	۴/۱۳	۶	۰/۲۱	۴/۳۹	۶	۰/۲۲
جنسن- هیز شماره ۲	۵/۱۸	۵/۹۹	۰/۳۲	۵/۶	۶/۰۹	۰/۳۵

جدول ۳- متوسط درصد افزایش مقدار تبخیر- تعرق در دوره مورد بررسی به ازای ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دما، تابش و باد

مدل	افزایش ٪ ۱۰			کاهش ٪ ۱۰		
	دما	تابش	باد	دما	تابش	باد
پنمن- مانتیث- فائو (با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک)	۶/۲۳	۱۱/۱۲	۱/۹۹	۶/۲۰	۱۰/۶۳	۲
جنسن- هیز شماره ۱	۶/۶۶	۱۱	***	۶/۸۹	۱۰	***

Archive of SID

www.SID.ir

جنسن- هیز شماره ۲	۹/۱۸	۱۰/۲۱	***	۹/۱۴	۱۰/۱۲	***

منابع

۱. بهادری نژاد، م.، میرحسینی، س.ع.، ۱۳۸۲، ضریب صافی هوا برای هرهای مختلف ایران. سومین کنفرانس بین المللی بهینه سازی مصر سوخت در ساختمان، تهران

۲. خلیلی، ع. و رضایی صدر، ح.، ۱۳۷۶، برآورد تابش کلی خورشید در گستره ایران بر مبنای داده های اقلیمی، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۶، ص ۱۵ تا ۳۵.

۳. علیزاده، ا. و خلیلی، ن.، ۱۳۸۸، تعیین ضرایب معادله آنگستروم و توسعه یک معادله رگرسیونی برآورد تابش خورشیدی (مطالعه موردی : منطقه مشهد)، مجله علوم و صنایع کشاورزی (آب و خاک)، جلد ۲۳، شماره ۱، ۲۳۸-۲۲۹.

۴. کمالی ، غلامعلی.، مرادی، اسحق.، ۱۳۸۴، تابش خورشید اصول واربردها در کشاورزی و انرژی نو، انتشارات دانشگاه فردوسی، ص ۱۰۳

5. Allen, R.G., and Pruit, W.O. 1988. Clusure to Rational use of the FAO Blany-Criddle formula, J. Irrig and Drain Eng, 114(2),375-380.

6. Allen, R.G., and Pruit, W.O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors, J. Irrig.and Drain., ASCE, 117(5),758-773.

7. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage, Paper No 56, Rome.

8. Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation, Quarterly Journal Meteorological Society, 50,121.

9. Hargreaves, G. H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration, J. Irrig and Drain, Eng, ASCE. 120(6).

10. Hargreaves, G. H., and Samani, Z. A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature, Appl, Engrg in Agric, 1(2), 96-99.

11. Irmrak, S., Irmak, A., Allen, R. G., and Jones, J. W. 2003. Solar and net radiation-basedequations to estimate reference evapotranspiration in humid climates, J. Irrig. Drain. ENG. 129(5), 336-347.

12. Jacovides, C. P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, Agricultural water management, 3 , 95-97.

13. James, L. G. 1988. Principles of farm irrigation system design, New York, John Wiley and Sons, Inc.

Archive of SID

www.SID.ir

14. Jensen, M. E., and Haise, H. R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation, J. Irrig, and Drain, ASCE, 89,15-41.

15. Jensen, M. E., Burman, R.D., and Allen, R. G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering, Practices NO 70, ASCE. New York, 360 P.

16. Paltridge, G. W., Proctor, D. 1976. Monthly mean solar radiation statistics for Australia, Sol Energy, 235-243.

17. Reddy, S. J. 1971. An empirical method for the estimation of total solar radiation. Solar Energy, 13, 289-291.

18. Sabbagh, J., Sayigh, A.A.M., and Al-Salam, E.M.A. 1977. Estimation of the total solar radiation from meteorological data, Sol Energy, 19,307-311.

19. Sabziparvar, A. A., and Shetaee, H. 2007. Estimation of global solar radiation in arid and semi-arid climates of East and West Iran, Energy The International Journal, 32,649-655.

20. 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, International Journal of Photo energy, Online://www.hindawi.com, Doi, 10.1155/2007/94786.

21. Salih, A.M.A., and Sendil, U. 1984. Evapotranspiration under extremely arid climates, J. Irig.Drain, Vol 110(3), 289-303.

Archive of SID

www.SID.ir