



ارزیابی چهار مدل تبخیر - تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم نیمه‌خشک ایران با هدف انتخاب بهترین مدل تابش

*محمد موسوی‌بایگی^۱، بتول اشرف^۲ و آمنه میان‌آبادی^۳

^۱دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد، ^۲دانشجوی کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب،

دانشگاه فردوسی مشهد، ^۳دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۸۸/۸/۱؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۱۴

چکیده

تبخیر- تعرق یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه آب در طبیعت است اما اندازه‌گیری میزان واقعی آن (توسط لایسیمتر به‌عنوان دقیق‌ترین ابزار اندازه‌گیری) بسیار مشکل و در عمل غیرقابل اجراست، بنابراین به‌کارگیری رابطه‌هایی که تنها با استفاده از داده‌های هواشناسی موجود، تخمین قابل‌قبولی از آن ارائه دهند، ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مطالعه ۴ روش مختلف برآورد تبخیر- تعرق شامل: پنمن-مانتیت- فائو ۵۶ (PMF۵۶)، پنمن-مانتیت- فائو با تابش ایرماک (PMFI)، جنسن- هیز شماره ۱ (JH۱) و جنسن- هیز شماره ۲ (JH۲) برای تخمین تبخیر- تعرق مرجع روزانه چمن (ET_o) در یک اقلیم نیمه‌خشک، 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، بنابراین برای برآورد میزان تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین از مدل‌های تابش آنگستروم، صباغ، گلور- مک‌کالور و بلک استفاده شد. واسنجی نتایج به‌دست آمده با داده‌های ۳ میکرو لایسیمتر وزنی در طول دوره رشد (می- اکتبر) در طی ۹۵ روز و توسط معیارهای آماری مختلف از جمله ضریب تعیین (R^۲)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای اریب (MBE) و آزمون t نشان داد که مدل پنمن-مانتیت- فائو ۵۶ با مدل تابش آنگستروم که مقادیر معیارهای آماری ذکرشده برای آن به‌ترتیب برابر ۰/۶۲۵، ۰/۷۸۱، ۰/۰۳۸ و ۰/۴۶۸ می‌باشند،

* مسئول مکاتبه: mousavi500@yahoo.com

مناسب‌ترین مدل برای برآورد تبخیر- تفرق گیاه مرجع در این اقلیم بوده و مدل‌های جنسن- هیز شماره ۱ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک، دقت پایینی دارند. به‌طورکلی در همه مدل‌های برآورد تبخیر- تفرق، مدل‌هایی که از تابش آنگستروم استفاده می‌کنند دقت بهتری دارند که تأییدی بر پیشنهاد فائو است. همچنین مدل‌های تابش گلور- مک‌کالور، صباغ و بلک در رده‌های بعدی قرار دارند.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های تبخیر- تفرق گیاه مرجع، مدل‌های تابش، میکرولاسیمتر وزنی، اقلیم نیمه‌خشک

مقدمه

تبخیر و تفرق در علوم کشاورزی از جهات مختلف دارای اهمیت است. به‌عنوان مثال، تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر و تفرق مصرف می‌شود از عوامل اساسی برنامه‌ریزی برای دست‌یابی به محصول بیش‌تر است. همچنین ابعاد و اندازه شبکه‌های آبیاری تابع میزان آبی می‌باشد که به‌صورت تبخیر- تفرق وارد جو می‌شود. براساس استاندارد فائو، تبخیر- تفرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (چمن) در یک دوره زمانی مشخص مصرف می‌کند به‌طوری‌که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند (آلن و همکاران، ۱۹۹۸). طی ۵۰ سال اخیر روش‌های تجربی زیادی توسط متخصصان علوم کشاورزی برای برآورد تبخیر- تفرق ارائه شده که هر یک از آن‌ها تابع متغیرهای اقلیمی خاصی می‌باشد. بیش‌تر این روش‌ها با واسنجی‌های محلی به‌دست آمده‌اند و اعتبار جهانی آن‌ها محدود است. در نشریه شماره ۲۴ آبیاری و زهکشی فائو، روش پنمن به‌عنوان روشی که بهترین نتایج را با کم‌ترین خطا نسبت به گیاه مرجع ارائه می‌کند در نظر گرفته شد (آلن و پرویت، ۱۹۹۱). همچنین کمیته نیاز آبیاری وابسته به انجمن مهندسان عمران آمریکا^۱، آب مورد نیاز آبیاری را با ۲۰ روش مرسوم برآورد ماهانه در مناطق مختلف، محاسبه و با نتایج لایسیمتر مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که روش پنمن- مانتیث دارای بهترین برآورد می‌باشد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰). در مطالعات دیگری که در اروپا انجام شد روش پنمن- مانتیث- فائو به‌عنوان روشی که دارای دقت نسبی بالا و عملکرد ثابت بوده و با درجه احتمال بالا در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از تبخیر- تفرق ارائه می‌کند، معرفی گردید (اسمیت، ۱۹۹۳؛ آلن و همکاران، ۱۹۹۸). کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی^۲ و سازمان خواروبار جهانی^۳ نیز

1- American Society of Civil Engineers (ASCE)

2- International Commission on Irrigation & Drainage (ICID)

3- Food and Agriculture Organization (FAO)

روش پنمن-مانتیت-فائو را به عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روی داده‌های اقلیمی و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد کرده‌اند (هارگریوز، ۱۹۹۴). به‌طور کلی نشان داده شده که انتخاب روش مناسب تخمین تبخیر-تعرق در هر منطقه به عواملی مانند شرایط اقلیمی، امکان دسترسی به داده‌های لازم از جمله دمای هوا، سرعت باد و تابش خورشیدی و نیز پیچیدگی روش مورد نظر، وابسته است (دهقانی سنج و همکاران، ۲۰۰۴).

آلن و پرویت (۱۹۸۸) بعد از ارزیابی معادله پنمن، گزارش کردند که بین تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده با لایسیمتر و برآوردهای روزانه از یک گیاه با ارتفاع ثابت و جزو مقاومت سطحی که با شاخص سطح برگ و تابش خالص روزانه تغییر می‌کند، توافق خوبی وجود دارد. در مطالعه‌ای که در عربستان انجام شد، مشخص گردید در مناطق خشک و نیمه‌خشک، دو پارامتر دما و تابش خورشیدی نقش اساسی در برآورد تبخیر-تعرق مرجع دارند و سایر عوامل در درجه دوم اهمیت قرار دارند (سلیح و سندیل، ۱۹۸۴). همچنین شیه (۱۹۸۴) اظهار می‌کند که در تخمین روزانه و ماهانه تبخیر-تعرق، دو پارامتر یاد شده به تنهایی تقریباً همان عددی را نتیجه می‌دهند که استفاده از سایر پارامترها نتیجه می‌دهد. روابط متفاوتی برای محاسبه تابش خورشیدی از جمله رابطه آنگستروم، هارگریوز-سامانی، صباغ، گلور-مک‌کالور، بلک، تورنتون-رایننگ، ویس و پاتریچ پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای درجه دقت متفاوتی می‌باشند (سبزی‌پرور و همکاران، ۲۰۰۸). آنگستروم (۱۹۲۴) با استفاده از داده‌های جوی نظیر ساعات آفتابی، مدل ساده‌ای را برای تخمین مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین (R_s) در یک سطح افقی، ارائه کرد. بعد از وی محققان 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 محققان برای افزایش دقت مدل خود، مؤلفه‌های مستقیم تابش و نیز مؤلفه‌های تابش ناشی از پخش نور خورشید که

به‌صورت پراکنده در محیط وجود دارند را به‌طور مجزا با استفاده از نسبت $\frac{n}{N}$ (n: ساعات آفتابی روزانه، N: حداکثر طول روز) و زاویه سمت‌الرأس خورشید (θ) محاسبه نمودند (پاتریچ و پروکتور، ۱۹۷۶). در مطالعه دیگری، مدل صباغ و همکاران (۱۹۷۷) برای شرایط اقلیمی ایران آزمایش گردید. نتایج این بررسی نشان داد که این مدل دو مؤلفه‌ای برای شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران مناسب می‌باشد (سبزی‌پرور، ۲۰۰۷). همچنین در بررسی دیگری در ایران، مشاهده شد که مدل‌های تابش

1- Solar Radiation Reached the Surface

پایه‌گذاری شده بر مبنای ابرناکی (CF)^۱ تخمین‌های خوبی از تابش خورشیدی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ارایه می‌دهند (سبزی‌پرور و شتائی، ۲۰۰۷).

به‌طور 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 می‌رسد (سبزی‌پرور و شتائی، ۲۰۰۷). متأسفانه به غیر از مطالعه‌ای که توسط سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۰۸) انجام شده است، تاکنون مطالعه جامع دیگری در زمینه سنجش حساسیت مدل‌های ET به تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین، صورت نگرفته است در حالی که معبود بررسی‌های انجام شده بیانگر این واقعیت می‌باشد که به‌کارگیری مدل دقیق تابش می‌تواند نقش مهمی در بهبود نتایج تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع داشته باشد. همچنین انتخاب مدل مناسب تابش، می‌تواند خلأ ناشی از کمبود داده‌های هواشناسی در برخی مناطق بدون ایستگاه را که نیاز به تخمین ET دارند، جبران نماید (ایرمارک و همکاران، ۲۰۰۳). بنابراین هدف از انجام این پژوهش، مطالعه انواع مدل‌های تابش، جهت استفاده در مدل‌های تخمین تبخیر-تعرقی است که به داده‌های هواشناسی کم‌تری نیازمندند تا بهترین و مناسب‌ترین آن‌ها در یک اقلیم نیمه‌خشک معرفی شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: منطقه مورد مطالعه شهر مشهد می‌باشد که از نظر اقلیمی (با توجه به مدل تعیین اقلیم دومارتن) جزو مناطق نیمه‌خشک ایران محسوب می‌شود. در جدول ۱، خصوصیات اقلیمی شهر مشهد نشان داده شده است. برای انجام این پژوهش از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک مشهد و اطلاعات به‌دست آمده از میکروولایسیمترهای نصب شده در ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد. ایستگاه سینوپتیک مشهد دارای عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۱۶ دقیقه شمالی، طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۸ دقیقه شرقی و ارتفاع ۹۹۹/۲ متر از سطح دریا می‌باشد. ایستگاه هواشناسی دانشکده کشاورزی نیز در منطقه‌ای با عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۵۹ درجه و ۳۹ دقیقه شرقی و ارتفاع ۱۰۳۰ متر از سطح دریا قرار گرفته است. بنابراین از نظر اقلیمی تفاوت محسوسی میان آن‌ها وجود نداشته و برای تخمین مقادیر تبخیر-تعرق نیاز به کاربرد ضرایب اصلاحی نمی‌باشد. داده‌های مورد استفاده برای این پژوهش شامل، دمای

1- Cloud Fraction

حداکثر و حداقل روزانه، دمای میانگین روزانه، رطوبت ماکزیمم و مینیمم و متوسط، سرعت باد، بارش، ساعات آفتابی، تابش، حداکثر، طول مدت روز (N) و مقدار تبخیر- تعرق پتانسیل اندازه‌گیری شده با میکرو لایسیمترها می‌باشد. با توجه به محدودیت داده‌های لایسیمتری فقط به بررسی داده‌های ۹۵ روز از سال ۲۰۰۵ در ماه‌های می، ژوئن، ژوئیه، آگوست، سپتامبر و اکتبر پرداخته شد.

جدول ۱- خصوصیات اقلیمی شهر مشهد.

میانگین دمای سالانه (سانتی‌گراد)	حداقل دمای مطلق (سانتی‌گراد)	حداکثر دمای مطلق (سانتی‌گراد)	بارندگی سالانه (میلی‌متر)	حداکثر بارندگی (میلی‌متر)	حداقل بارندگی (میلی‌متر)	ضریب اقلیمی دومارتز	رطوبت اقلیم نیمه‌خشک
۱۴	-۲۸	۴۳/۸	۲۵۷/۵	۴۲۷/۱	۱۳۰/۷	۱۰/۷۲	

میکرو لایسیمترها: چنان‌که گفته شد هدف از این پژوهش، مقایسه چند روش محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع به منظور انتخاب بهترین مدل تابش می‌باشد. برای تأمین این هدف از داده‌های به‌دست آمده از سه میکرو لایسیمتر وزنی موجود در ایستگاه دانشکده کشاورزی مشهد استفاده شد. دو عدد از این میکرو لایسیمترها در کناره‌های زمین و دیگری در وسط زمین محل آزمایش قرار داشتند. میکرو لایسیمترها شبانه آبیاری شده و روز بعد از آبیاری پس از جمع‌آوری میزان زه‌آب، توسط باسکول وزن می‌شدند. به این ترتیب با کم کردن زه‌آب از عمق آب آبیاری، مقدار رطوبت موجود در خاک به‌دست آمد. درصدی از این رطوبت در طی روز صرف عمل تبخیر- تعرق از گیاه می‌شود که مقدار آن با توجه به اختلاف وزنی نشان داده شده توسط میکرو لایسیمترها، تعیین گردید.

مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع: چهار مدل انتخاب شده برای تخمین ET_0 عبارتند از: مدل پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ ($PMF 56$): این مدل ترکیبی توسط آلن و همکاران (۱۹۹۸) به شکل زیر ارائه شد:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_r (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_r)} \quad (1)$$

از نظر کارشناسان سازمان فائو این مدل، دقیق‌ترین فرمول محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع است و حتی در بسیاری از مطالعات به‌جای اندازه‌گیری با لایسیمتر می‌توان از آن استفاده کرد.

در این معادله‌ها، ET_o : تبخیر-تعرق گیاه مرجع (میلی‌متر بر روز)، R_n : تابش خالص در سطح محصول (مگاژول بر مترمربع در روز)، G : شار حرارتی خاک (مگاژول بر مترمربع در روز)، γ : ثابت سایکرومتری (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، \bar{T} : متوسط درجه حرارت هوا (درجه سانتی‌گراد)، u_2 : سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (متر بر ثانیه)، e_s : فشار بخار اشباع هوا (کیلوپاسکال)، e_a : فشار بخار واقعی هوا (کیلوپاسکال)، Δ : شیب منحنی فشاربخار در برابر درجه حرارت (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد).

مدل پنمن-مانتیث-فائو با تابش ایرماک ($PMFI$): این مدل مشابه $PMF56$ می‌باشد با این تفاوت که در آن مقدار تابش خالص (به‌جای روش رایج فائو ۵۶) از روش ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) که به‌صورت رابطه زیر است، محاسبه می‌شود:

$$R_n = (-0.09T_{max}) + (0.203T_{min}) - (0.101RH_{mean}) + (0.687R_s) + 3/97 \quad (2)$$

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

مدل جنسن-هیز شماره ۱ ($JH1$): این مدل برای اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک معرفی شده و مانند دو مدل قبلی در آن از عامل تابش استفاده می‌شود. با این تفاوت که به‌جای تابش خالص از تابش خورشیدی (R_s) استفاده می‌گردد. میزان تبخیر-تعرق مرجع در این مدل برابر است با:

$$ET_o = C_T(\bar{T} - T_x)R_s \quad (3)$$

که در آن، C_T ثابتی سالانه و برابر است با:

$$C_T = \frac{1}{45 - \left(\frac{h}{137}\right) + \left(\frac{365}{e_{s_{max}} - e_{s_{min}}}\right)} \quad (4)$$

در این معادله، h : ارتفاع از سطح دریا (متر) است. همچنین $e_{s_{max}}$: فشار بخار اشباع به‌ازای ماکزیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال (مترمربع) و $e_{s_{min}}$: فشار بخار اشباع به‌ازای مینیمم روزانه دمای هوا در گرم‌ترین ماه سال (مترمربع) می‌باشند و از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آیند:

$$e_{s_{\max}} = \exp\left(\frac{19/0.8T_{\max} + 429/41}{T_{\max} + 237/3}\right) \quad (5)$$

$$e_{s_{\min}} = \exp\left(\frac{19/0.8T_{\min} + 429/41}{T_{\min} + 237/3}\right) \quad (6)$$

در این رابطه‌ها نیز T_{\max} : حداکثر درجه حرارت هوا در گرم‌ترین ماه سال (درجه سانتی‌گراد) و T_{\min} : حداقل درجه حرارت هوا در گرم‌ترین ماه سال (درجه سانتی‌گراد) است. همچنین در رابطه ۳، T_x ثابتی سالانه بوده و برابر است با:

$$T_x = -2/5 - 0/14(e_{s_{\max}} - e_{s_{\min}}) - \frac{h}{500} \quad (7)$$

بنابراین با داشتن دمای متوسط روزانه و مقدار تابش خورشیدی در هر روز می‌توان با استفاده از معادله ۳ تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه گیاه چمن را به دست آورد (جیمز، ۱۹۸۸). مدل جنسن - هیز شماره ۲ (JH۲): این مدل نسبت به مدل قبلی از پارامترهای کم‌تری برخوردار بوده و به صورت رابطه زیر است:

$$ET_r = (0/025\bar{T} + 0/08)R_s \quad (8)$$

که در آن، ET_r : تبخیر- تعرق گیاه مرجع یونجه (میلی‌متر بر روز) است (جنسن و هیز، ۱۹۶۳). برای این‌که این مدل با سایر مدل‌ها قابل مقایسه باشد، تبخیر- تعرق گیاه یونجه با توجه به ضرایب ارایه شده به صورت زیر به تبخیر- تعرق گیاه چمن تبدیل شد (جنسن و همکاران، ۱۹۹۰).

$$ET_r = 1/15ET \quad (9)$$

به‌طورکلی در هر روش محاسباتی برای تخمین تبخیر- تعرق باید دقت تخمین بالا باشد و همچنین داده‌های مورد نیاز آن در دسترس باشند. معادله پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ به پارامترهای بسیاری نیاز دارد که امکان اندازه‌گیری همه آن‌ها در بسیاری مناطق یا وجود ندارد و یا این‌که دقت اندازه‌گیری‌ها به دلایل مختلف کافی نمی‌باشد. بنابراین بهتر است بسته به شرایط منطقه از معادله مناسب استفاده نمود.

حساسیت سنجی: برای این‌که مشخص شود در معادلات تبخیر- تعرق مورد استفاده، کدام پارامتر ورودی اهمیت بیش‌تری دارد، آنالیز حساسیت روی آن‌ها 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 مدل‌های تبخیر- تعرق به پارامتر تابش می‌باشد و این حساسیت در روزهای گرم سال، محسوس‌تر است. در میان مدل‌های ذکر شده، مدل پنمن- مانتیث- فائو (محاسبه شده با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک) به‌طور متوسط به افزایش مقدار پارامتر تابش، حساسیت بیش‌تری نشان می‌دهد. به‌طور کلی مشاهده شد که به‌ازای ۵ درصد افزایش مقدار تابش، مقادیر افزایش تبخیر- تعرق برای مدل جنسن- هیز شماره ۱ و ۲ در همه روزها ثابت می‌باشد (به ترتیب ۵ و ۴/۹۷ درصد) در حالی‌که این میزان در هر دو مدل پنمن- مانتیث- فائو بین ۶/۶۴-۳/۴۸ درصد و به‌طور متوسط ۵/۲۱ درصد، متغیر است. جدول‌های ۲ و ۳ مقدار افزایش تبخیر- تعرق به‌ازای افزایش و کاهش سایر پارامترها به‌میزان ۵ و ۱۰ درصد را نشان می‌دهند.

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

مدل	افزایش ۵ درصد			کاهش ۵ درصد		
	دما	تابش	باد	دما	تابش	باد
پنمن- مانتیث- فائو (با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک)	۲/۶	۵/۲۱	۰/۹۹	۲/۵۸	۵/۲۱	۰/۹۹۶
جنسن- هیز شماره ۱	۳/۲۹	۵	***	۳/۲۹	۵	***
جنسن- هیز شماره ۲	۴/۳۶	۴/۹۷	***	۴/۴	۵/۰۲	***

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

مدل	افزایش ۱۰ درصد			کاهش ۱۰ درصد		
	دما	تابش	باد	دما	تابش	باد
پنمن- مانتیث- فائو (با هر دو مدل تابش آلن و ایرماک)	۵/۲۳	۱۰/۴۲	۱/۹۷	۵/۱۵	۱۰/۴۲	۲
جنسن- هیز شماره ۱	۶/۵۸	۱۰	***	۶/۵۸	۱۰	***
جنسن- هیز شماره ۲	۸/۷۴	۹/۹۷	***	۸/۷۹	۱۰/۰۲	***

مدل‌های مورد استفاده برای تخمین تابش خورشیدی: با توجه به این‌که نتایج، نشان‌دهنده حساسیت بیش‌تر معادلات تبخیر- تعرق به پارامتر تابش می‌باشند، بنابراین از مدل‌های مختلف تابش استفاده شد تا با انتخاب بهترین آن‌ها دقیق‌ترین معادله تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع برای منطقه نیمه‌خشک شهر مشهد انتخاب شود. مدل‌های تابش مورد استفاده در این پژوهش عبارتند از:

مدل آنگستروم: این مدل اولین بار توسط آنگستروم (۱۹۲۴) ارائه گردید:

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

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 (ساعت) و a و b : ضرایب ثابت منطقه می‌باشند.

مدل صباغ: این مدل توسط صباغ (۱۹۷۷) میلادی ارائه شد. از مزایای این مدل در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز آن است که در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران اندازه‌گیری می‌شود.

$$R_s = 1/53k \exp \left[L(D - RH)^{1/3} / 100 - \left(\frac{1}{T_{max}} \right) \right] \quad (11)$$

در این رابطه ضریب k برای هر محل مقداری است ثابت و برابر است با:

$$k = 100(\lambda N + W_{ij} \cos L) \quad (12)$$

که در آن، L : عرض جغرافیایی محل (رادیان)، W_{ij} : فاکتور فصلی ردی (۱۹۷۱) و متغیر بین ۱/۷ در دسامبر و ۲/۴۸ در ژوئیه، N : حداکثر طول روز (ساعت) و λ : عامل عرض جغرافیایی (نانومتر) است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\lambda = 0.2 / (1 + 0.1\phi) \quad (13)$$

که در آن ϕ : عرض جغرافیایی محل بر حسب درجه می‌باشد.

همچنین در معادله ۱۱، D : نسبت ساعات آفتابی به ۱۲ ساعت ($\frac{n}{12}$)، RH : میانگین روزانه رطوبت نسبی در ماه مربوطه (درصد) و T_{max} : میانگین حداکثر دمای روزانه (درجه سانتی‌گراد) می‌باشند.

مدل گلور- مک کالور: گلور و مک کالور (۱۹۵۷) ضریب a را به عرض جغرافیایی ارتباط دادند و بنابراین رابطه آنگستروم را به صورت زیر ارایه کردند:

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.29 \cos \phi + 0.52 \frac{n}{N} \quad (14)$$

مدل بلک: این مدل که توسط بلک (۱۹۵۶) ارایه شد، یک معادله یک متغیره غیرخطی است و تنها پارامتر مورد استفاده در آن ابرناکی آسمان است. مدل بلک برابر است با:

$$\frac{R_s}{R_a} = 0.803 - 0.341C - 0.458C^2 \quad (15)$$

که در آن C : ابرناکی آسمان بر حسب دهک می باشد.

معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطاسنجی): در این پژوهش برای مقایسه نسبی نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده میکرو لایسیمترها و ارزیابی دقت مدل‌ها، آزمون‌هایی که توسط جاکوویدز (۱۹۹۷) پیشنهاد شده است انجام شد. جاکوویدز نشان داد که اگر از شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی استفاده شود، در انتخاب بهترین مدل تخمین تبخیر- تعرق خطا ایجاد می‌شود، بنابراین توصیه نمود که علاوه بر این دو شاخص، از معیار t که ترکیبی از آنها است، استفاده شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_1^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (16)$$

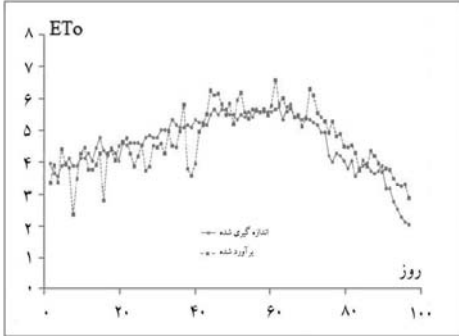
$$MBE = \frac{\sum_1^n (P_i - O_i)}{n} \quad (17)$$

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)MBE^2}{RMSE^2 - MBE^2}} \quad (18)$$

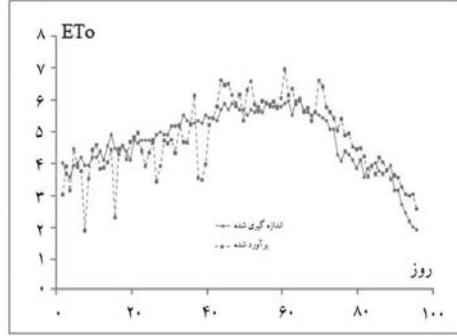
در رابطه‌های بالا، P_i : مقدار برآورد شده تبخیر- تعرق، O_i : مقدار اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق و n : تعداد مشاهدات است.

نتایج و بحث

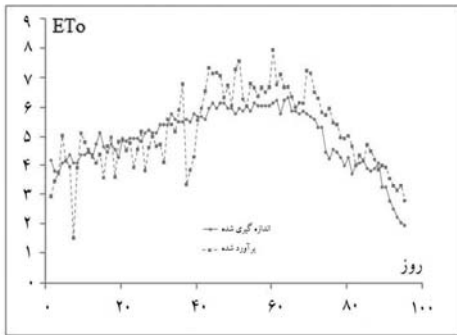
با توجه به پارامترهای مورد نیاز در هر روز، مقادیر تابش به روش‌های گفته شده در بالا محاسبه شد و با مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر- تعرق توسط میکرو لایسیمترها مقایسه گردید. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۱ تا ۴ نشان داده شده‌اند.



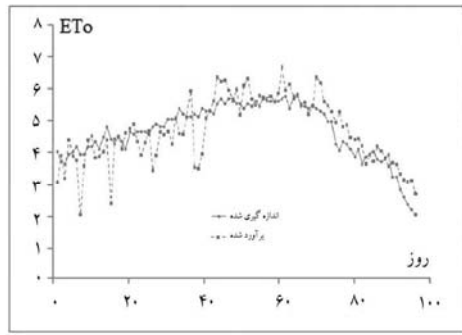
(ب)



(الف)

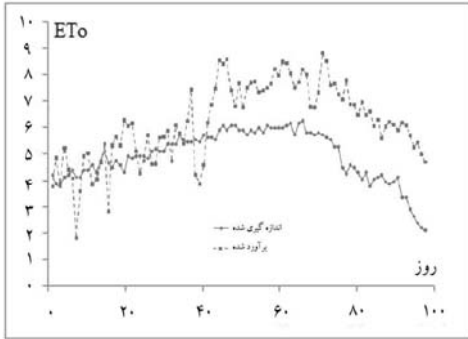


(د)

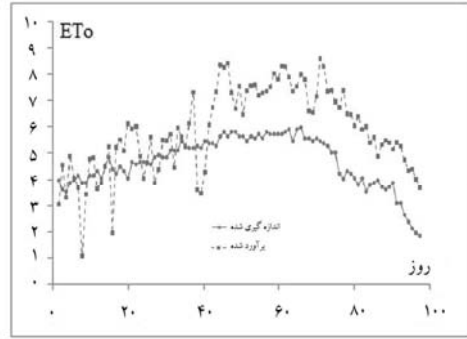


(ج)

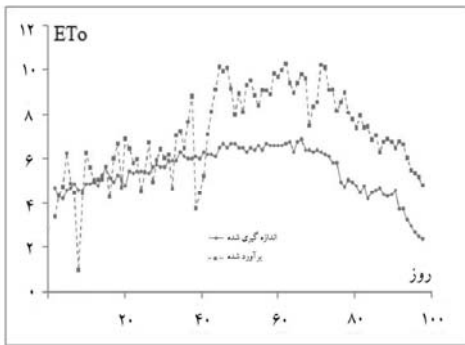
شکل ۱- مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ با استفاده از مدل‌های تابش آنگستروم (الف)، صباغ (ب)، گلور- مک کالور (ج) و بلک (د).



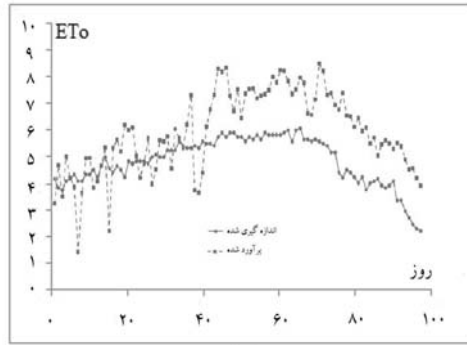
(ب)



(الف)

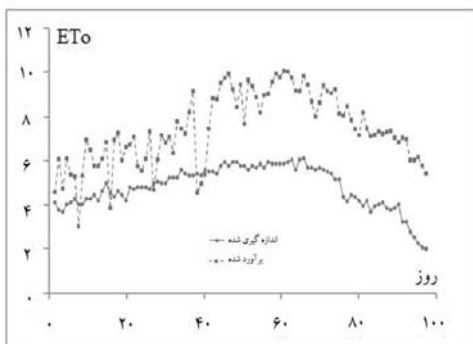


(د)

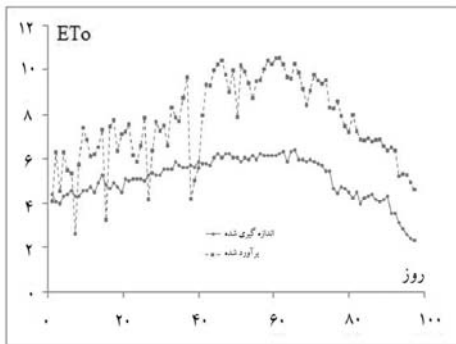


(ج)

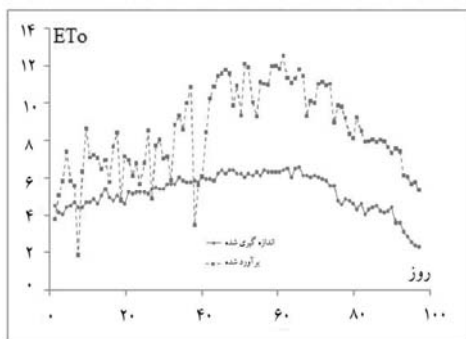
شکل ۲- مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش پنمن-مانتیث-فانو با تابش ایرماک با استفاده از مدل‌های تابش آنگستروم (الف)، صباغ (ب)، گلور-مک کالور (ج) و بلک (د).



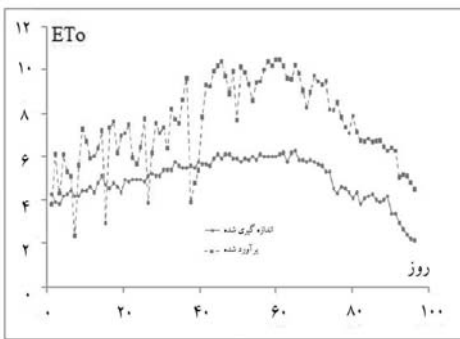
(ب)



(الف)

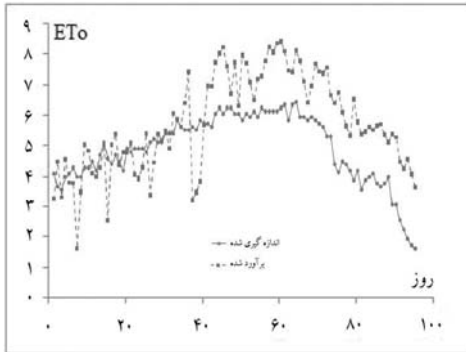


(د)

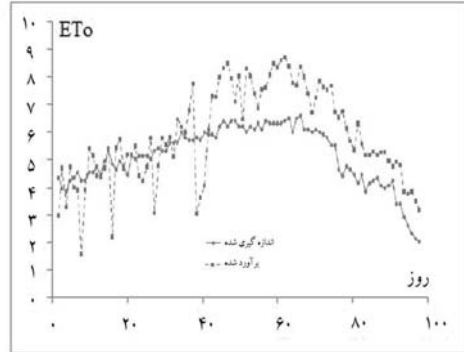


(ج)

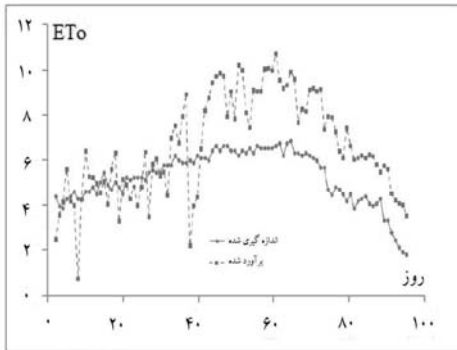
شکل ۳- مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش جنسن- هیز ۱ با استفاده از مدل‌های تابش آنگستروم (الف)، صباغ (ب)، گلور- مک‌کالور (ج) و بلک (د).



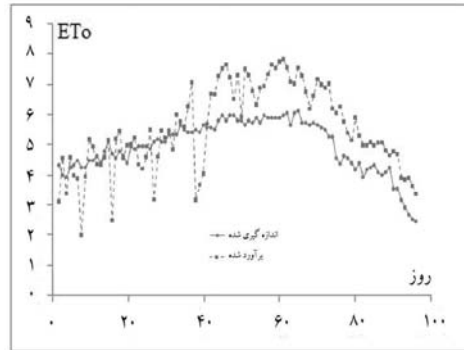
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴- مقدار اندازه‌گیری شده و برآورد شده تبخیر- تعرق گیاه مرجع به روش جنسن- هیز ۲ با استفاده از مدل‌های تابش آنگستروم (الف)، صباغ (ب)، گلور- مک‌کالور (ج) و بلک (د).

چنانچه در شکل‌های ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود در همه مدل‌های بررسی شده، مقادیر تبخیر- تعرق برآورد شده در چند روز خاص با مقادیر اندازه‌گیری شده تفاوت فاحشی دارد که علت این تغییر زیاد، گاه مقدار بارش ناگهانی قابل توجه و گاه ابرناکی زیاد و کاهش تابش رسیده به سطح زمین می‌باشد. برای نمونه در روز ۷ می (اولین نوسان غیرعادی) پس از چند روز بارندگی ناچیز (حداکثر ۲ میلی‌متر) بارشی به اندازه ۲۶/۱ میلی‌متر رخ داده و به این ترتیب، مقدار تبخیر- تعرق به میزان قابل توجهی کاهش یافته است.

همان‌طور که انتظار می‌رود در بین مدل‌های بررسی شده در بالا، مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ که در آن مقدار تابش خالص با همان روش پیشنهادی آلن و همکاران محاسبه می‌شود به دلیل وجود پارامترهای بسیار زیاد به کار رفته در آن، دقیق‌ترین مدل تخمین تبخیر-تعرق می‌باشد. مدل جنسن-هیز شماره ۱ نسبت به سایر مدل‌ها از دقت کم‌تری برخوردار است و مقادیر تبخیر-تعرق را خیلی بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده توسط میکروولایسیمترها تخمین می‌زند. علت این مسأله احتمالاً وجود اختلاف زیاد بین دمای بیشینه و کمینه در اقلیم نیمه‌خشک مشهد به‌خصوص در ماه‌های گرم سال است. 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 اندازه‌گیری شده دارد. مقایسه دو روش پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ و پنمن-مانتیث-فائو با تابش ایرماک، نشان می‌دهد که محاسبه تابش خالص به روش ایرماک در دوره گرم‌تر سال، مقادیر مناسبی برای این پارامتر ارائه نمی‌دهد. در جدول ۵ نتایج آنالیز آماری انجام گرفته نشان داده شده است.

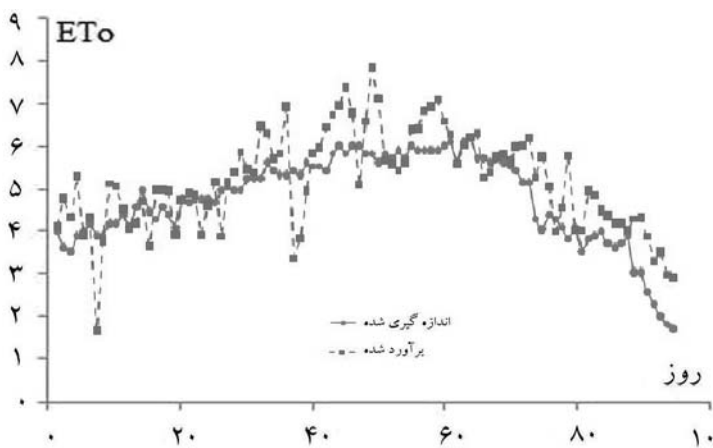
جدول ۵- نتایج آنالیز آماری انجام شده.

مدل	پارامتر آماری	آنگستروم	صباغ	گلور-مک کالور	بلک
پنمن-مانتیث-فائو ۵۶	RMSE	۰/۷۸۱	۰/۷۵۴	۰/۷۹۹	۰/۹۴۰
	R ^۲	۰/۶۲۵	۰/۶۰۱	۰/۶۱۵	۰/۵۹۱
	MBE	۰/۰۳۸	۰/۰۵۹	۰/۰۳۲	۰/۲۸۱
	t	۰/۴۶۸	۰/۷۶۳	۰/۳۸۴	۳/۰۳۳
پنمن-مانتیث-فائو با تابش ایرماک	RMSE	۱/۹۴۲	۱/۹۹۰	۱/۹۵۷	۲/۳۸۷
	R ^۲	۰/۳۹۱	۰/۲۸۹	۰/۳۸۳	۰/۳۵۱
	MBE	۱/۳۴۱	۱/۴۰۹	۱/۳۳۳	۱/۷۴۵
	t	۹/۲۵۲	۹/۷۲۴	۹/۰۲۰	۱۰/۳۸۶
جنسن هیز ۱	RMSE	۳/۲۵۶	۳/۲۸۹	۳/۲۶۹	۴/۰۹۲
	R ^۲	۰/۵۰۶	۰/۳۸۳	۰/۴۹۱	۰/۴۲۴
	MBE	۲/۸۶۱	۲/۹۶۳	۲/۸۴۹	۳/۵۵۷
	t	۱۷/۸۵۲	۲۰/۱۳۰	۱۷/۲۴۵	۱۷/۰۴۹
جنسن هیز ۲	RMSE	۱/۴۲۵	۱/۴۳۳	۱/۴۴۹	۲/۰۱۸
	R ^۲	۰/۵۲۱	۰/۴۰۹	۰/۵۰۸	۰/۴۴۴
	MBE	۰/۷۶۰	۰/۸۲۸	۰/۷۵۲	۱/۲۷۷
	t	۶/۱۰۸	۶/۸۶۹	۵/۸۸۱	۷/۹۲۳

جدول بالا نشان می‌دهد که از میان همه مدل‌های بررسی شده، مدل تبخیر- تعرق پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ همبستگی بیش‌تری با داده‌های لایسیمیتری دارد. پس از آن مدل جنسن- هیز ۲ قرار دارد که احتمالاً اگر ضرایب آن برای منطقه مشهد کالیبره شود، باز هم بهبود خواهد یافت. مدل‌های جنسن- هیز شماره ۱ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک نیز به دلیل مقادیر بالای RMSE و t قابل اعتماد نمی‌باشند.

با در نظر گرفتن مدل‌های تابش بررسی شده، ملاحظه می‌شود که مدل تابش آنگستروم با ضرایب پیشنهادی توسط آلن و همکاران، بهتر از سایر مدل‌های بررسی شده می‌باشد و مدل گلور- مک‌کالور، صباغ و بلک در رتبه‌های بعدی قرار دارند. به‌طور کلی در صورتی که دقیق‌ترین معادله برای تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع، مورد نظر باشد علاوه بر انتخاب مدل مناسب منطقه، پارامترهای هواشناسی مورد استفاده نیز باید دارای کیفیت بالایی باشند. پیشنهاد سازمان فائو، مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ است که این پژوهش نیز دقت بالای این مدل نسبت به سایر مدل‌های بررسی شده را نشان داد (جدول ۵). اما باید توجه داشت که استفاده از پارامترهای زیاد در یک معادله سبب افزایش خطا در هر مرحله محاسباتی و در نتیجه در کل مدل می‌شود. استفاده از ایستگاه‌های غیرمرجع و کاربرد ضرایب اصلاحی نیز دلیل دیگری بر افزایش میزان خطاست. بنابراین در صورت در دسترس نبودن اطلاعات کافی و یا داده‌های با کیفیت نامطلوب، بهتر است از مدل‌هایی که به پارامترهای ورودی کم‌تری نیاز دارند، استفاده شود. مدل هارگریوز- سامانی (۱۹۸۵) یکی از این مدل‌هاست که تنها نیازمند اندازه‌گیری متوسط دمای روزانه و محاسبه تابش رسیده به بالای جو (R_a) است و چون تحت‌تأثیر تابش خورشیدی رسیده به زمین (R_s) نمی‌باشد، نیازی به استفاده از مدل‌های مختلف تابش نیز ندارد. شکل ۵ و جدول ۶ نشان می‌دهند که این مدل نسبت به مدل‌های جنسن- هیز شماره ۱ و ۲ و پنمن- مانتیث- فائو با تابش ایرماک از دقت بالاتری برخوردار است و در صورت نبود امکان استفاده از مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ می‌توان از این مدل استفاده نمود.

به‌طور کلی تابش، مهم‌ترین پارامتر در تخمین تبخیر- تعرق گیاه مرجع می‌باشد اما متأسفانه معمولاً اندازه‌گیری آن با دقت کافی صورت نمی‌گیرد و حتی در برخی ایستگاه‌ها اصلاً اندازه‌گیری نمی‌شود، بنابراین پیشنهاد می‌شود که از روش‌های ارایه شده در این پژوهش برای تخمین تابش خورشیدی استفاده شود.



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

جدول ۶- آنالیز آماری مدل هارگریوز- سامانی در مقایسه با داده های لایسیمتری.

پارامتر آماری	مدل
۰/۹۱۵	RMSE
۰/۵۶۶	R ^۲
۰/۴۲۹	MBE
۵/۱۴۴	t

سپاسگزاری

نگارندگان مقاله بدین وسیله از حمایت و مساعدت معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد برای انجام این پژوهش در قالب طرح تحقیقاتی شماره ۲/۱۵۰۴۲، سپاسگزاری می نمایند.

منابع

- Allen, R.G. and Pruitt, W.O. 1988. Closure to Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula, J. Irrig. and Drain Eng. 114: 2. 375-380.
- Allen, R.G. and Pruitt, W.O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors, J. Irrig. and Drain. ASCE, 117: 5. 758-773.
- 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.
- Angstrom, A. 1924. Solar and terrestrial radiation, Quarterly J. Meteorol. Soc. 50: 121.

5. Black, J.N., Bonython, C.W. and Prescott, J.A. 1956. Solar radiation and duration of sunshine, *Quart, J. R. Met, Soc.* 80: 231.
6. Dehghanisanj, H., Yamamoto, T. and Rasiah, V. 2004. Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments. *Agric. Water, Manage.* 64: 91-106.
7. Glover, J. and McCulloch. 1957. The empirical relation between solar radiation and hours of sunshine, *Quart, J. R. Met. Soc.* 172p.
8. Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature, *Appl. Eng. in Agric.* 1: 2. 96-99.
9. Hargreaves, G.H. 1994. Defining and using reference evapotranspiration, *J. Irrig and Drain, Eng, ASCE*, 120: 6.
10. Irmrak, S., Irmak, A., Allen, R.G. and Jones, J.W. 2003. Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates, *J. Irrig. Drain. Eng.* 129: 5. 336-347.
11. Jacovides, C.P. 1997. Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models, *Agricultural water management*, 3: 95-97.
12. James, L.G. 1988. Principles of farm irrigation system design, New York, John Wiley and Sons, Inc.
13. Jensen, M.E. and Haise, H.R. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation, *J. Irrig. and Drain. ASCE*, 89:15-41.
14. 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, 360p.
15. Paltridge, G.W. and Proctor, D. 1976. Monthly mean solar radiation statistics for Australia, *Sol Energy*, Pp: 235-243.
16. Reddy, S.J. 1971. An empirical method for the estimation of total solar radiation. *Solar Energy*, 13: 289-291.
17. 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.
18. 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 Inter. J.* 32: 649-655.
19. 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 J. Photo energy*, Online://www.hindawi.com, Doi, 10.1155/2007/94786.
20. Sabziparvar, A.A., Tafazoli, F., Zare Abyaneh, H., Banejad, H., Mousavi-Baygi, M., Ghafouri, M., Moheseni Movahed, A.A. and Maryanji, Z. 2008. Comparison of some crop reference evapotranspiration models in a cold semiarid climate to optimize the use of radiation models, water and soil *J.* 22: 2. 328-340.
21. Salih, A.M.A. and Sendil, U. 1984. Evapotranspiration under extremely arid climates, *J. Irig. Drain.* 110: 3. 289-303.
22. Shih, S.F. 1984. Data requirement for evapotranspiration estimation, *J. Irrig. and Drain Eng. ASCE*, 110: 3. 263-274.
23. Smith, M. 1993. *Climwat for Cropwat: a climatic database for irrigation planning and management*, *FAO Irrig. and Drain. Eng. ASCE*, 125: 1. 26-33.



The assessment of four reference crop evapotranspiration models in a semi-arid climate of Iran to find the best radiation model

*M. Mousavi-Baygi¹, B. Ashraf² and A. Miyanabadi³

¹Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

²M.Sc. Student, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad,

³M.Sc. Graduate, Dept. of Water Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

Received: 2009/10/23; Accepted: 2010/10/06

Abstract

Evapotranspiration is one of the most important parts of water cycle in the nature but, the measurement of actual evapotranspiration (via Lysimeter as an exact measurement instrument) is so difficult and not practical. Therefore, equations that can estimate the value of evapotranspiration only by using meteorological data are necessary. In this study, four different reference crop evapotranspiration of Penman-Montith FAO56 (PMF56), Penman-Montith FAO with Irmak Radiation (PMFI), Jensen-Hais1 (JH1) and Jensen-Hais2 (JH2) have been assessed in a semi-arid climate of Iran to estimate the ET_0 . The investigations showed that, when the data of radiation, temperature and wind changed by $\pm 5\%$ and $\pm 10\%$, the radiation was more effective than other parameters. Therefore to calculate the short wave radiation, radiation models of Angstrom, Sabbagh, Gelever-Mc Culoch and Black have been used. Calibration of obtained results with data of three weighting microlysimeter during the growing season (May to October) duration 95 days by using different statistical parameter such as coefficient of determination (R^2), Root mean square error (RMSE), Mean bios error (MBE) and t-test criteria of 0.781, 0.625, 0.038 and 0.468 respectively, indicated that PMF56 model with radiation models of Angstrom is the best model for estimation of reference evapotranspiration and the models of JH1 and PMFI have low exactness for this climate. The finding of the present research reveal that in all investigated evapotranspiration models, the models that used Angstrom radiation have high accuracy and radiation models of Sabbagh, Gelever-Mc Culoch and Black are in next orders.

Keywords: Reference crop evapotranspiration models, Radiation models, Weighting microlysimeter, Semi-arid climate

* Corresponding Author; Email: mousavi500@yahoo.com