

## مقایسه چند مدل بر آورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک، به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش

علی اکبر سبزی پرور\* - فرزین تفضلی - حمید زارع ایبانه - حسین بانژاد - محمد موسوی بایگی - محمد غفوری -

اسداله محسنی موحد - زهره مریانجی<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت: ۸۶/۱۲/۹

تاریخ پذیرش: ۸۷/۵/۱۴

### چکیده

با توجه به ضرورت برآورد تبخیر-تعرق در مدیریت منابع آب، برنامه ریزی آبیاری و ارزیابی اثرات تغییر کاربری اراضی بر روی بازده و تأمین نیاز آبی گیاهان، تعیین دقیق تبخیر-تعرق گیاه مرجع بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. با توجه به مشکلات متعددی که در به‌کارگیری لایسیترها وجود دارد، استفاده از مدل‌هایی که بتوانند این فرآیند را با دقت نسبتاً مطلوبی شبیه سازی و برآورد نمایند، امری ضروری بنظر می‌رسد. در این راستا، مدل‌های تبخیر-تعرقی که به مولفه‌های تابش نیاز دارند، به دلیل عدم دسترسی به داده‌های واقعی تابش، کمتر مورد استقبال کاربران قرار گرفته است. در این تحقیق، ۴ مدل تبخیر-تعرق گیاه مرجع: جنسن هیز اصلاح شده (JH1)، جنسن-هیز (JH2)، پنمن-مانتیت فائو ۵۶ (PMF56)، و پنمن-مانتیت فائو با تابش ایرماک (PMFI) برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع روزانه چمن (ET<sub>o</sub>) در اقلیم سرد نیمه خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. تابش کل (R<sub>s</sub>) مورد نیاز با ۴ مدل شامل: آنگستروم، پاتریج، دانشیار و صباغ محاسبه شد. در مجموع، ۱۶ سناریوی مختلف تولید و تحت بررسی قرار گرفتند. واسنجی نتایج ET<sub>o</sub> بدست آمده با داده‌های چهار لایسیمتر زهکش دار در دوره رشد (اردیبهشت آبان) برای دو سال و با استفاده از معیارهای آماری R<sup>2</sup>، RMSE، MBE، و t انجام گرفت. نتایج بررسی نشان داد که از ۱۶ سناریوی مطالعه شده، مدل جنسن-هیز که معادله تابش دانشیار در آن به کار گرفته شده است، در مقایسه با سایر مدل‌ها، مقدار ET<sub>o</sub> را در سطح معنی‌دار (p < ۵٪) و با دقتی بهتر از مدل PMF56 در اقلیم سرد نیمه خشک همدان برآورد می‌نماید (R<sup>2</sup> > ۰/۸۵). نتایج برآورد مدل PMF56 با تابش کل (R<sub>s</sub>) محاسبه شده به روش پاتریج و تابش خالص محاسبه شده به روش ایرماک، از نظر دقت برآورد در جایگاه بعدی قرار گرفت. اگر چه استفاده همه گیر از مدل تابش آنگستروم، در اغلب سناریوهایی که از مدل تابش آنگستروم استفاده شده بود، نتایج مطلوبی به دست نیامد. این تحقیق نشان داد، در صورتی که مدل مناسب تابش به کار برده شود، می‌توان مدل‌های ساده‌تر ET<sub>o</sub> را جهت تخمین مقدار تبخیر-تعرق مرجع روزانه جایگزین مدل‌های ترکیبی نظیر PMF56 نمود. تکرار این تحقیق برای محاسبه ET<sub>o</sub>، با هدف استفاده بهینه از مدل‌های تابش در سایر اقلیم‌ها نیز توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** مدل‌های تبخیر-تعرق گیاه مرجع، لایسیمتر زهکشدار، مدل‌های تابش، اقلیم سرد نیمه خشک.

۱- به ترتیب دانشیار هواشناسی، دانشجوی کارشناسی ارشد و استادیاران گروه مهندسی آب دانشگاه بو علی سینا و استادیار گروه مهندسی آب دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی

مشهد، استادیار پژوهشی مرکز حفاظت خاک و آبخیزداری کشور و مربی پژوهش مرکز هواشناسی اصفهان

\* - نویسنده مسئول: Email: sabziparvar@yahoo.co.uk

جهت تهیه فایل ورد این مقاله به سایت [DaneshResan.com](http://DaneshResan.com) مراجعه نمایید و عنوان مقاله را جستجو کنید  
بیش از ۲ میلیون مقاله فارسی در این سایت موجود میباشد

## مقدمه

برای تعیین مقدار تبخیر و تعرق می‌بایست ابتدا پارامترهای مورد نیاز مدل‌های تبخیر-تعرق اندازه‌گیری و یا تخمین زده شود. یکی از پارامترهای مهم در تعیین میزان تبخیر-تعرق، انرژی خورشیدی است. تابش خورشیدی یکی از متغیرهای هواشناسی است، که بر بسیاری از فرآیندهای آب و خاک مانند تبخیر، تعرق، ذوب برف و رشد گیاهان اثر می‌گذارد. با وجود اهمیت این متغیر، اندازه‌گیری مستقیم آن بطور محدود انجام می‌شود. سلطانی و مرید، (۱۶). فرمول‌های متفاوتی برای محاسبه انرژی خورشیدی از جمله صباغ، هارگریوز سامانی، تورنتون-رانینگ، ویس، دانشیار، پاتریج و آنگستروم پیشنهاد شده‌اند که هر یک دارای درجه دقت متفاوتی هستند. فرمول‌های محاسباتی تبخیر-تعرق در هر منطقه نسبت به داده‌های تابش یا نوسانات انرژی خورشیدی دارای حساسیت‌های متفاوتی می‌باشند. آنگستروم در سال ۱۹۲۴ با به‌کارگیری داده‌های جوی نظیر ساعات آفتابی توانست مدل ساده‌ای را برای تخمین مقدار تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین ( $R_s$ ) در یک سطح افقی ارائه نماید. بعد از وی دانشمندان زیادی اقدام به بهبود و تعدیل مدل آنگستروم نمودند، که ضرایب تبدیل و داده‌های ورودی مدل آن‌ها وابسته به شرایط اقلیمی است. برخی از محققین، به منظور افزایش دقت مدل خود مؤلفه‌های مستقیم و پراکنده نور خورشید را به‌طور مجزای محاسبه نمودند (پاتریج و پروکتور، (۲۱). آن‌ها در مدل ساده‌ای، مقادیر تابش مستقیم و پراکنده روزانه را با استفاده از نسبت  $(\frac{n}{N})$  و زاویه سمت‌الراس خورشید ( $\theta$ ) محاسبه نمودند. در مطالعه دیگری، مدل صباغ (۲۳) برای شرایط اقلیمی ایران آزمایش گردید. نتایج بررسی نشان داد که این مدل دو مؤلفه‌ای برای شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران مناسب می‌باشد سبزی پرور، (۲۴). مقایسه نتایج مدل فوق با مقادیر اندازه‌گیری شده برخی ایستگاه‌ها، میانگین

خطائی حدود ۵ درصد را نشان می‌دهد شتائی، (۷). درخصوص اصلاح ضرایب تشعشع در معادله پنمن-مانتیث نیز تحقیقاتی صورت گرفته است. از جمله، کاشفی پور (۸) مقادیر ضرایب  $b, a$  مدل تابش آنگستروم را برای منطقه ملائانی در استان خوزستان به ترتیب  $۰/۲۲$  و  $۰/۴۱$  برآورد نمود. بر اساس مطالعه فوق، میانگین مقادیر بدست آمده  $b, a$  برای گستره ایران به ترتیب  $۰/۵۹$  و  $۰/۳۳$  به‌دست آمد. مطالعه انجام شده توسط کاشفی پور و سپاسخواه (۵) نشان داد که تغییر ضریب  $b$  از  $۰/۴۱$  به  $۰/۵۹$  موجب ۱۴ درصد تغییر نیاز آبی سالانه خواهد شد. به‌دین لحاظ، خطای کوچکی در تخمین  $a$  و  $b$  در مدل آنگستروم می‌تواند منجر به تغییر قابل ملاحظه‌ای در  $ET_0$  برآورد شده گردد. سبزی پرور و شتائی (۲۵) نیز نشان دادند، مدل‌های تابش پایه‌گذاری شده بر مبنای ابرناکی ( $CF$ )، تخمین‌های خوبی از تابش خورشیدی ( $R_s$ ) در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک می‌دهند. انتخاب روش مناسب تخمین تبخیر-تعرق در هر منطقه به عواملی مانند شرایط اقلیمی، امکان دسترسی به داده‌های مورد لزوم و پیچیدگی روش، وابسته می‌باشد دهقانی سنیج و همکاران، (۱۳). لذا در هر منطقه با توجه به اقلیم آن، پارامترهای در دسترس، و کیفیت متغیرها باید اقدام به انتخاب مدل مناسب  $ET_0$  نمود. متأسفانه تاکنون مطالعه جامعی در زمینه سنجش حساسیت مدل‌های  $ET_0$  به تابش ورودی انجام نگرفته است، ولی محدود بررسی‌های انجام شده بیانگر این واقعیت است که به‌کارگیری مدل دقیق تابش می‌تواند نقش مهمی در بهبود نتایج تخمین  $ET_0$  ایفا نماید ایرماک و همکاران، (۱۶). با توجه به کیفیت پایین برخی پارامترهای هواشناسی اندازه‌گیری شده در ایران از جمله تابش خورشیدی سبزی پرور و شتائی، (۲۴)، استفاده از مدل‌های تخمین تبخیر-تعرق با ورودی‌های کمترگاهی ضروری به نظر می‌رسد. اگرچه براساس پیشنهاد کارشناسان سازمان فائو، محاسبه  $ET_0$  از روش استاندارد پنمن-مانتیث-

سال‌های مذکور توسط ایستگاه هواشناسی اکباتان ثبت گردیده است. ایستگاه هواشناسی اکباتان همدان از نوع سینوپتیک می‌باشد، که در زمان انجام تحقیق در همان محوطه مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان استقرار داشته است. داده‌های لایسمتری غالباً به صورت دو روزه برداشت گردیده است، ولی تعداد محدودی برداشت نیز به‌ویژه بعد از تابستان به دلیل کاهش نیاز آبی چمن به صورت سه روزه ثبت گردیده است.

میانگین‌های سالانه اقلیمی پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه عبارت است از بارندگی:  $(mm/yr) 300/2$ ، متوسط دما:  $(^{\circ}C) 10/9$ ، میانگین حداکثر دما:  $(^{\circ}C) 19$ ، میانگین حداقل دما:  $(^{\circ}C) 2/7$  و مجموع سالانه تبخیر (از تشت تبخیر کلاس A):  $(mm/yr) 1504/6$ . اقلیم منطقه نیز با توجه به طبقه بندی‌های کوپن و دو مارتن، نیمه خشک سرد ارزیابی گردید سبزی پرور، (۳).

محل استقرار لایسمترها در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان تقریباً در وسط زمین کشاورزی انتخاب گردید، تا از جاده و باد شکن‌های اطراف دور باشد. لایسمترها (۴ عدد) از نوع زهکش دار با ابعاد  $1 \times 1 \times 1$  می‌باشند. مشابه درون لایسمترها، محیط اطراف لایسمترها نیز به وسعت ۲۰ متر در ۲۰ متر به کشت یکنواخت چمن اختصاص یافت. میزان تبخیر-تعرق هر چهار لایسمتر بر اساس معادله بیلان آبی به صورت روزانه اندازه گیری گردید.

#### داده‌های هواشناسی: داده‌های هواشناسی مورد استفاده

در این مطالعه که در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ برداشت شده‌اند، عبارتند از: ساعات آفتابی، سرعت باد، بارندگی، متوسط رطوبت نسبی، حداکثر رطوبت نسبی، حداقل رطوبت نسبی، حداقل دما، حداکثر دما و دمای متوسط، که خلاصه آن در طول فصل رشد در (جدول ۱) ارائه گردیده

فائو ۵۶ که پارامترهای ورودی زیادی دارد توصیه شده است آلن و همکاران، (۱۰). مطالعات سپاسخواه (۵) در سه منطقه باجگاه، جهرم و کوشکک نشان داد که در شرایط کشت واحه‌ای در ایران، به علت وجود جریان افقی گرما محاسبه تبخیر-تعرق به روش پنمن-مانتیت کارایی لازم را ندارد و تخمین کمتری را از واقعیت ارائه می‌کند. در عوض، به نظر می‌رسد که روش جنسن-هیز (در بعضی شرایط) کارایی بهتری داشته باشد. معادله جنسن-هیز (۱۹) نیز برای محاسبه  $ET_0$  در نواحی نیمه خشک غرب آمریکا که شباهت اقلیمی با ایران دارد، ارزیابی گردید. ایرماک و همکاران (۱۶) نشان دادند که به کارگیری برخی مدل‌های تابش برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک جواب‌های معتبری را در تخمین  $ET_0$  ارائه می‌نماید.

هدف از این تحقیق، مطالعه تطبیقی انواع مدل‌های تابش جهت استفاده در ورودی مدل‌های  $ET_0$  و معرفی مناسب‌ترین مدل تابش و  $ET_0$  با استناد به داده‌های لایسمتری در شرایط اقلیمی سرد نیم خشک می‌باشد. به کارگیری مدل مناسب تابش می‌تواند خلاء ناشی از کمبود داده‌های هواشناسی در برخی مناطق فاقد ایستگاه را که نیاز به برآورد  $ET_0$  دارند، جبران نماید. در این پژوهش فرض شده است که استفاده از داده‌های دقیق تابش در مدل‌های تابش-مبنای  $ET_0$  (Radiation-based)، می‌تواند دقت تخمین تبخیر-تعرق روزانه را بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه: داده‌های لایسمتری مورد استفاده

در این تحقیق در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان با عرض جغرافیایی  $51^{\circ} 34'$  شمالی و طول جغرافیایی  $32^{\circ} 48'$  اندازه گیری شده است. در این تحقیق، پارامترهای هواشناسی به صورت روزانه در

روزها (کمتر از ۵ درصد کل روزهای برداشت) نسبت به میانگین اقلیمی انحراف معیار بزرگی را نشان می‌دهند. جهت جلوگیری از انتشار خطا، این گونه داده‌ها از سری آماری حذف گردید.

است. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، کیفیت آن‌ها مورد آزمون کیفی قرار گرفت. روش عددی که برای این منظور انتخاب شد، آزمون همگنی یا ران تست می‌باشد. در بررسی داده‌های خام، گاهی مشاهده گردید که داده‌های بعضی

(جدول ۱) - متوسط پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه در سالهای ۷۳-۱۳۷۲.

ماه	ساعات آفتاب‌ابی (hours)	سرعت باد (m/s)	بارندگی ماهانه (mm)	متوسط رطوبت نسبی (%)	حداکثر رطوبت نسبی (%)	حداقل رطوبت نسبی (%)	میانگین حداکثر دمای (c°)	میانگین حداقل دمای (c°)	دمای متوسط (c°)
اردیبهشت	۷/۴	۱/۶	۴۹/۶	۵۷/۳	۸۷/۰	۳۳/۱	۱۹/۹	۵/۹	۱۲/۹۵
خرداد	۱۱/۴	۰/۸۸	۴/۶	۴۶/۱	۷/۷	۲۳/۷	۲۷/۹	۹/۴	۱۸/۶
تیر	۱۲/۳	۰/۹۵	۱	۴۴/۴	۷۲/۶	۲۲/۷	۳۲/۹	۱۲/۴	۲۲/۶
مرداد	۱۱/۲	۰/۷۲	۰	۴۵/۵	۶۷/۳	۲۳/۲	۳۵/۱	۱۳/۵	۲۴/۳
شهریور	۱۰/۳	۰/۶۷	۰/۳	۳۷/۸	۶۱/۷	۲۰/۵	۳۰/۸	۹/۲	۲۰
مهر	۸/۴	۰/۵۵	۱۴/۳	۴۸	۷۷/۴	۲۵/۳	۲۲/۳	۴	۱۳/۱
آبان	۵/۵	۰/۶۹	۹۷/۱	۶۷/۵	۸۷/۸	۴۲	۱۴	۲/۱	۱۶/۲

مدل‌های مورد استفاده: در این مطالعه جمعاً ۴ مدل تبخیر- تعرق مرجع و ۵ مدل تابش مورد استفاده قرار گرفت. مدل‌های تخمین تبخیر- تعرق مرجع: ۴ مدل انتخاب شده برای تخمین  $ET_0$  عبارتند از: مدل پنمن-مانتیث-فائو<sup>۱</sup> (PMF56):

این مدل ترکیبی توسط آلن و همکاران (۱۰) به شکل زیر ارائه گردید:

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{\bar{T} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

در این معادله،  $ET_0$ : تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (mm/d) که به عنوان تبخیر- تعرق از گیاه مرجع با ارتفاع فرضی ۰/۱۲ متر و یک مقاومت سطحی ثابت ۷۰ s/m و آلیدو ۰/۲۳ تعریف شده است؛  $R_n$ : تابش خالص در سطح محصول (MJ/m<sup>2</sup>.d)؛  $G$ : شار حرارتی خاک

**مدل پنمن-مانتیث-فائو<sup>۱</sup> با تابش ایرماک (PMFI)**

این مدل مشابه PMF56 می‌باشد، با این تفاوت که در آن مقدار تابش خالص (به جای روش رایج فائو<sup>۱</sup> ۵۶) از روش ایرماک و همکاران (۱۶) (معادله ۱۶) استفاده گردید.

**مدل جنسن-هیز شماره ۱ (JH1)**

مدل اصلاح شده جنسن-هیز، توسط جیمز<sup>۲</sup> (۷) به صورت زیر ارائه گردید:

$$ET_0 = C_T (\bar{T} - T_x) R_s \quad (2)$$

**مدل تابش صباغ (Sabbagh):** از مزایای مدل صباغ (۱۹۹۷) در دسترس بودن اطلاعات مورد نیاز آن است، که در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران اندازه گیری می‌شود. صباغ مدل خود را به شکل زیر ارائه نمود:

(۵)

$$R_s = 1.53k \exp \left[ L \left( n / 12 - (RH)^{0.333} / 100 - \left( \frac{1}{T_{\max}} \right) \right) \right]$$

$$k = 100 (\lambda N + W_{ij} C o s L) \quad (۶)$$

$$\lambda = 0.2 / (1 + 0.1 \phi) \quad (۷)$$

که در این معادلات،  $R_s$ : میانگین روزانه تابش رسیده در سطح افقی زمین ( $cal.cm^{-2}.d^{-1}$ )؛  $L$ : عرض جغرافیائی محل ( $Rad$ )؛  $N$ : حداکثر طول روز ( $hour$ )؛  $RH$ : میانگین روزانه رطوبت نسبی در ماه مربوطه (%);  $T_{\max}$ : میانگین حداکثر دمای روزانه ( $^{\circ}C$ )؛  $\phi$ : عرض جغرافیائی محل ( $deg$ )؛  $n$ : طول ساعات آفتابی روزانه ( $hour$ )؛  $\lambda$ : ضریبی که باید بر حسب موقعیت جغرافیائی منطقه محاسبه شود، و  $W_{i,j}$ : فاکتور فصلی ردی (۲۲) که بین ۱/۷ در دسامبر و ۲/۴۸ در ژوئیه متغیر است.

۳- **مدل پاتریج**: پالتریج و پرکتور (۲۱) با استفاده از زاویه سمت الراس لحظه‌ای خورشید، طول روز و مقدار ابرناکی، مؤلفه‌های تابش مستقیم و پراکنده (دیفیوز) را به شرح ذیل محاسبه نمودند:

$$I_{dir} = 81.738 [1 - \exp(-0.075(90 - \theta))] \quad (۸)$$

$$I_{dif} = 0.218 + 0.299(90 - \theta) + 17.272CF \quad (۹)$$

که در این معادلات،  $I_{dif}$ : تابش پراکنده ساعتی ( $cal.cm^{-2}.h^{-1}$ )؛  $I_{dir}$ : تابش مستقیم ساعتی ( $cal.cm^{-2}.h^{-1}$ )؛  $CF$ : ضریب پوشش ابری (صدم) و  $\theta$ : زاویه لحظه‌ای سمت الراس خورشید (درجه) می‌باشند. مقدار تابش کل روز ( $I_{tot}$ ) از طلوع آفتاب تا غروب آفتاب با فواصل زمانی ۱۵ دقیقه‌ای از روابط زیر محاسبه گردید

$R_s$ : تابش خورشیدی بر حسب مقدار آب تبخیر پذیر ( $mm/d$ )؛  $T_s, C_T$ : ثابت‌های سالانه که از روی درجه حرارت حداکثر و حداقل و ارتفاع محل قابل محاسبه می‌باشند.

**مدل جنسن - هیز شماره ۲ (JH2):**

معادله جنسن - هیز (۱۹) از پارامترهای کمتری نسبت به معادله قبلی برخوردار است.

$$ETr = (0.025\bar{T} + 0.08)R_s \quad (۳)$$

به طوری که در آن،  $ETr$ : تبخیر-تعرق گیاه مرجع یونجه بر حسب  $mm/d$ ؛  $R_s$ : تابش خورشیدی بر حسب مقدار آب تبخیر پذیر  $mm/d$ ؛ و  $\bar{T}$ : متوسط درجه حرارت روزانه بر حسب  $^{\circ}C$  می‌باشند برای مقایسه نتایج این مدل با سایر مدل‌ها، تبخیر-تعرق گیاه یونجه با توجه به ضرایب گفته شده در جنسن و همکاران (۲۰) به تبخیر-تعرق مرجع گیاه چمن تبدیل شد.

**مدل‌های مورد استفاده برای تخمین تابش خورشیدی**

در این تحقیق، برای تخمین تابش کل و تابش خالص ۵ مدل زیر انتخاب شد:

**مدل آنگستروم:** مدل آنگستروم اولین بار در سال ۱۹۲۴ توسط آنگستروم به شکل زیر ارائه گردید:

$$R_s = R_a \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (۴)$$

در این معادله،  $R_s$ : تابش دریافتی در سطح افقی در سطح زمین (واحد اختیاری)؛  $R_a$ : حداکثر تابش دریافتی ممکن در سطح افقی در خارج از جو (واحد اختیاری)؛  $n$ : طول ساعات آفتابی روزانه ( $hour$ )؛  $N$ : حداکثر طول روز در محل مطالعه ( $hour$ ) و  $a, b$ : ضرایب ثابت منطقه‌ای می‌باشند. در تحقیق حاضر، مقدار ضرایب  $a$  و  $b$  به ترتیب ۰/۲۴ و ۰/۴۸ در نظر گرفته شد سبزی پرور، (۳) که با مقدار پیشنهادی فائو تفاوت محسوسی ندارد.

$(R_n)$  از مدل ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) استفاده گردید.

$$R_n = (-0.09T_{max}) + (0.203T_{min}) - (0.101RH_{mean}) + (0.687R_s) + 3.97 \quad (16)$$

در معادله ۱۷،  $R_n$ : تابش خالص روزانه بر حسب مگا ژول بر متر مربع در روز  $(Mj/m^2.d)$ ،  $R_s$ : تابش کل روزانه بر حسب مگا ژول بر متر مربع در روز  $(Mj/m^2.d)$ ،  $T_{max}$ : میانگین حداکثر درجه حرارت هوا  $(^{\circ}C)$ ،  $T_{min}$ : میانگین حداقل درجه حرارت هوا  $(^{\circ}C)$  و  $RH_{mean}$ : رطوبت نسبی متوسط (%) می‌باشند.

لازم به ذکر است که مدل تابش انتخاب شده دانشیار، پاتریج و صباغ نیز اخیراً توسط سبزی پرور و شتایی (۲۴) جهت مناطق خشک و نیمه خشک ایران توصیه گردیده اند. مدل آنگستروم نیز مدل استاندارد پیشنهاد شده توسط فائو برای محاسبه تابش خورشیدی  $(R_s)$  در مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ می‌باشد.

### سناریوهای بررسی شده

با ترکیب مدل‌های تبخیر-تعرق و مدل‌های تابش، ۱۶ سناریوی مختلف زیر بررسی شدند:

۱) سناریوی PMF56-A: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل آنگستروم.

۲) سناریوی PMF56-D: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار.

۳) سناریوی PMF56-P: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج.

۴) سناریوی PMF56-S: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل پنمن-مانتیث-فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ.

۵) سناریوی JH1-A: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل

سبزی پرور، (۲۴):

$$\bar{I} = (1 - CF) \int_{sunrise}^{sunset} I_{dir} \cos \theta dt \quad (10)$$

$$\bar{I}_{DF} = \int_{sunrise}^{sunset} I_{dif} dt \quad (11)$$

که در آن‌ها،  $\bar{I}$ : مجموع تابش مؤلفه مستقیم (direct) روزانه،  $\bar{I}_{DF}$ : مجموع تابش مؤلفه پراکنده (diffuse) روزانه و  $dt$ : بازه زمانی (۱۵ دقیقه) می‌باشند. در نهایت با استفاده از رابطه زیر مجموع تابش کل روزانه دریافتی  $(I_{tot})$  در سطح افقی محاسبه گردید:

$$I_{tot} = \bar{I} + \bar{I}_{DF} \quad (12)$$

لازم به ذکر است که یکی از مزیت‌های این مدل نسبت به مدل آنگستروم و صباغ منظور نمودن تابش پراکنده آسمانی در محاسبات می‌باشد. در مناطق خشک و نیمه خشک، مؤلفه تابش پراکنده می‌تواند تا ۲۵ درصد انرژی مصرفی فرآیند تبخیر-تعرق را فراهم نماید.

**مدل دانشیار:** این مدل که تعدیل یافته مدل پاتریج می‌باشد توسط دانشیار (۱۲) جهت محاسبه تابش کل روزانه در برخی از شهرهای ایران با روابط زیر اجراء شد.

$$I_{dif} = 0.123 + 0.181(90 - \theta) + 10.43CF \quad (14)$$

$$I_{dir} = 81.738 [1 - \exp[-0.075(90 - \theta)]]$$

در این تحقیق، مجموع تابش روزانه  $(I_{total})$  دریافتی (در سطح افقی) نیز با استفاده از رابطه زیر سبزی پرور و شتایی، (۲۴) به فواصل زمانی ۱۵ دقیقه محاسبه گردید:

$$I_{total} = \int_{sunrise}^{sunset} I_{dif} dt + (1 - CF) \int_{sunrise}^{sunset} I_{dir} \cos \theta dt \quad (15)$$

پارامترهای به کار رفته در معادلات ۱۳ الی ۱۵، مشابه پارامترهای معادلات ۸ الی ۱۱ می‌باشند.

۵- **مدل ایرماک:** برای محاسبه تابش خالص روزانه

جنسن - هیز - شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل آنگستروم.

(۶ سناریوی JH1-D: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار.

(۷ سناریوی JH1-P: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج.

(۸ سناریوی JH1-S: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ.

(۹ سناریوی JH2-A: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل آنگستروم.

(۱۰ سناریوی JH2-D: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار.

(۱۱ سناریوی JH2-P: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج.

(۱۲ سناریوی JH2-S: تبخیر تعرق برآورد شده با مدل جنسن - هیز - شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ.

(۱۳ سناریوی PMFI-A: تبخیر - تعرق برآورد شده با مدل پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل های آنگستروم و ایرماک.

(۱۴ سناریوی PMFI-D: تبخیر - تعرق برآورد شده با مدل پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار و ایرماک.

(۱۵ سناریوی PMFI-P: تبخیر - تعرق برآورد شده با مدل پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج و ایرماک.

(۱۶ سناریوی PMFI-S: تبخیر - تعرق برآورد شده با مدل پنمن - مانیتث - فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ و ایرماک.

ایرماک.

### معیارهای آماری واسنجی (شاخص های خطا سنجی)

در این تحقیق، برای ارزیابی دقت مدل ها و مقایسه نسبی نتایج با مقادیر اندازه گیری شده توسط لایسیمترها، آزمون های زیر که توسط جاکوویدز (۱۸) پیشنهاد گردیده است، انجام گرفت. جاکوویدز اعتقاد دارد که شاخص های  $RMSE$  و  $MBE$  به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل  $ET_0$  کافی نمی باشند. بنا به توصیه وی، علاوه بر دو معیار که عموماً برای مقایسه مدل های تبخیر - تعرق استفاده می شود، می بایست از معیار سومی بنام  $t$  (معادله ۱۷) که ترکیبی از دو معیار  $MBE$  و  $RMSE$  می باشد، استفاده شود.

$$t = \frac{(n-1)(MBE^2)}{\sqrt{(RMSE^2) - (MBE^2)}} \quad (17)$$

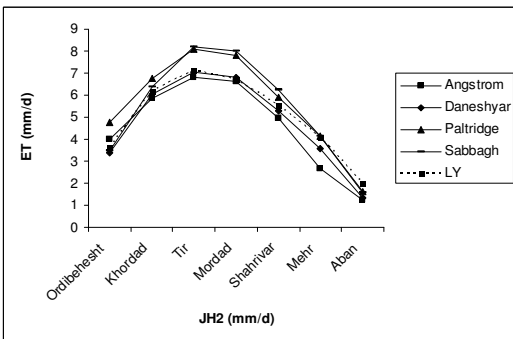
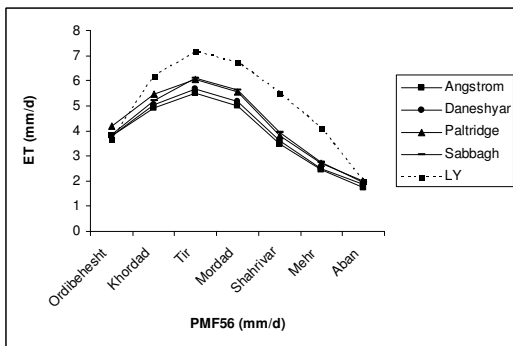
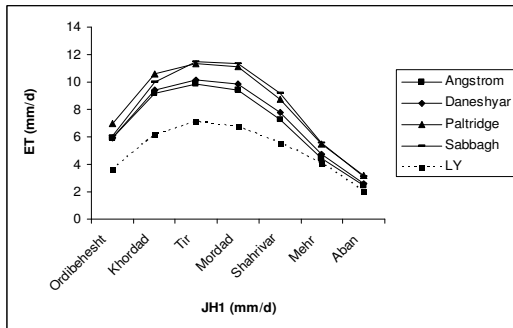
در این رابطه،  $t$  معیار جاکوویدز و  $n$  تعداد مشاهدات می باشد. مقدار  $t$  کمتر بیانگر دقت بهتر مدل می باشد. با توجه به این که در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب  $R^2$  بالا باشد، ولی نمایه های  $MBE$  و  $RMSE$  خطای زیادی را نشان دهند، و برای مدل دیگری، برعکس،  $R^2$  کمتر ولی خطاهای  $MBE$  و  $RMSE$  و یا  $t$  قابل قبول باشند، چنین مواردی تصمیم گیری در انتخاب مدل بهینه را دشوار می سازد. بدین منظور، در تحقیق حاضر، معیار ترکیبی جدید که حاصل نسبت  $R^2$  به  $t$  می باشد ( $R^2/t$ )، معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. با به کارگیری معیار خطای جدید  $R^2/t$  مشکل انتخاب مدل (مدل های) بهینه به طور قابل ملاحظه ای بهبود بخشیده شد. مقادیر  $R^2/t$  بالاتر، بیانگر سازگاری بهتر مدل با واقعیت می باشد.

### نتایج و بحث

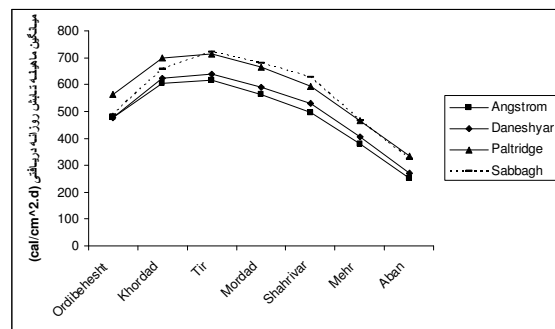
ابتدا با توجه به مدل های تابش ذکر شده، مقادیر تابش



دارد، مقدار  $ET_0$  را کمتر از لایسیمترها پیش بینی می نماید. در سناریوهای  $JH2-P, JH2-S$  مقدار  $ET_0$  بیش از حد برآورد شده است. این در حالی است که سناریوی  $JH2-D$  کمترین اختلاف را نسبت به داده های لایسیمتری از خود نشان داد (جدول ۵).



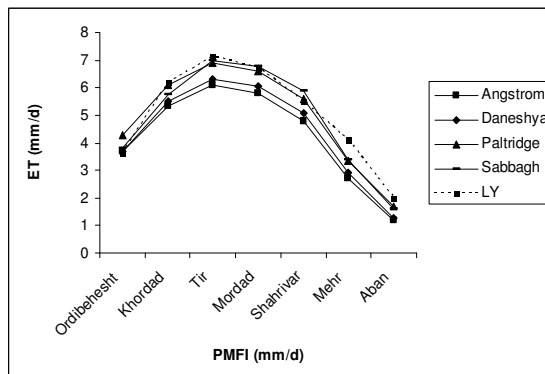
روزانه و ماهیانه در دوره مورد مطالعه برای ایستگاه هواشناسی همدان توسط ۴ مدل تابش محاسبه گردید (شکل ۱). سپس تبخیر-تعرق روزانه مرجع برای هر یک از سناریوهای فوق الذکر برای طول دوره رشد در سال های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ محاسبه و نتایج حاصل با داده های تجربی لایسیمتری مقایسه گردیدند (شکل ۲). جهت واسنجی نتایج مدل ها، معیارهای آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین خطای گرایش (MBE)، ریشه دوم میانگین خطا (RMSE) و معیارهای ترکیبی  $t$  و  $R^2/t$  جهت ۱۶ سناریو محاسبه شد. (جدول ۲ الی ۵) مقادیر محاسبه شده معیارهای خطاسنجی را برای سناریوهای بررسی شده نشان می دهند.



(شکل ۱) - میانگین ماهیانه تابش روزانه برآورد شده در محل لایسیمتری (بر حسب کالری بر سانتیمتر مربع در روز).

همان طور که در (شکل ۲) و (جدول ۲) ملاحظه می گردد، نتایج مدل  $PMF56$  در تمام سناریوها مقدار  $ET_0$  را کمتر از مقدار واقعی لایسیمتری تخمین می زند. برعکس، مدل  $JH1$  در همه سناریوها  $ET_0$  را خیلی بیشتر از مقدار واقعی لایسیمترها تخمین می زند (جدول ۳). این امر احتمالاً به دلیل اختلاف زیاد دمای ماکزیمم و مینیمم در مرداد ماه در اقلیم نیمه خشک همدان می باشد. سناریوی  $JH2-A$  که فقط ۲ پارامتر تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین و دمای متوسط را به عنوان متغیرهای اصلی در ورودی لازم

در تمامی سناریوهای PMFI، به کارگیری معادله تابش خالص ایرماک و همکاران (۱۴) موجب شد که معادله PMF56 جواب‌های نزدیکتری نسبت به اعداد لایسیمتری نشان دهد (جدول ۴). سناریوهای  $PMFI - P$ ،  $PMFI - S$  که از تابش پیشنهادی ایرماک استفاده کرده بودند، نسبت به سناریوهای  $PMF56 - P$ ،  $PMF56 - S$  (که برای محاسبه تابش خالص آن از روش استاندارد پیشنهادی فائو استفاده کرده اند) نتایج قابل قبول تری را ارائه نمودند.



(شکل ۲) - مقایسه میانگین ماهیانه  $ET_0$  بر آورد شده (۱۶ سناریو) با داده‌های لایسیمتری.

(جدول ۲) - مقادیر خطای  $ET_0$  برآورد شده با مدل PMF56 در مقایسه با داده‌های لایسیمتری.

مدل‌های تابش	$R^2$	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	t	$R^2 / t$
آنگستروم	۰/۶۷	-۲/۸۸	۳/۳۱	۱۸/۴۱	۰/۰۲۹
دانشیار	۰/۷	-۲/۶۵	۳/۰۹	۱۷/۵۶	۰/۰۳۸
پاتریج	۰/۶۹	-۱/۹۸	۲/۵۶	۱۲/۸۱	۰/۰۰۵
صباغ	۰/۷۳	-۱/۹۳	۲/۴۶	۱۳/۳۳	۰/۰۵۴

(جدول ۳) - مقادیر خطای  $ET_0$  برآورد شده با مدل JH1 در مقایسه با داده‌های لایسیمتری.

مدل‌های تابش	$R^2$	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	t	$R^2 / t$
آنگستروم	۰/۸۱	۴/۵۹	۵/۰۵	۲۳/۱۴	۰/۰۳۵
دانشیار	۰/۸۱	۵/۳۳	۵/۷۷	۲۵/۳۶	۰/۰۳۲
پاتریج	۰/۸	۷/۱۷	۷/۵۲	۳۳/۳	۰/۰۲۴
صباغ	۰/۸۲	۷/۶۳	۸/۰۷	۳۰/۵	۰/۰۲۷

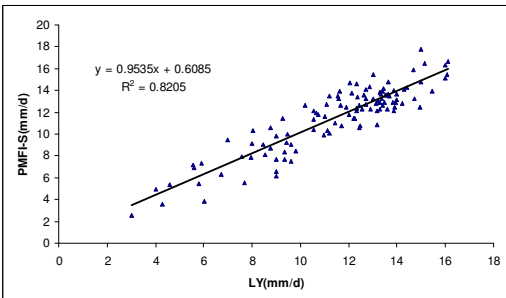
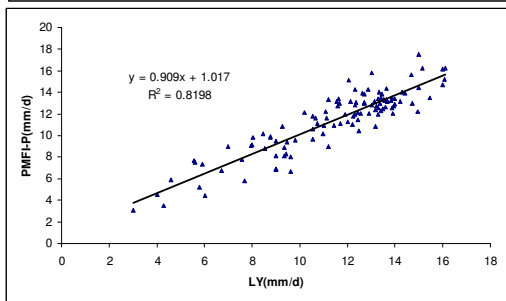
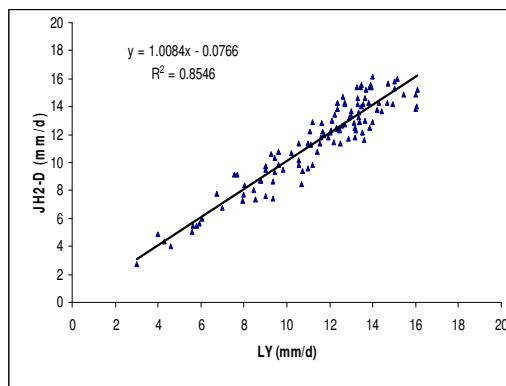
(جدول ۴) - مقادیر خطای  $ET_0$  برآورد شده با مدل PMFI در مقایسه با داده‌های لایسیمتری.

مدل‌های تابش	$R^2$	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	t	$R^2 / t$
آنگستروم	۰/۸	-۱/۵۶	۲/۰۲	۱۲/۶۷	۰/۰۶۳
دانشیار	۰/۸۱	-۱/۱۵	۱/۷	۹/۶۴	۰/۰۸
پاتریج	۰/۸۲	-۰/۰۲	۱/۲۵	۰/۲	۴/۱
صباغ	۰/۸۲	-۰/۰۷۶	۱/۲۹	۰/۶۲	۱/۳۲

(جدول ۵) - مقادیر خطای  $ET_0$  برآورد شده با مدل JH2 در مقایسه با داده‌های لایسیمتری.

مدل‌های تابش	$R^2$	MBE(mm/d)	RMSE(mm/d)	t	$R^2 / t$
آنگستروم	۰/۷۲	-۱/۲۵	۲/۱۶	۷/۵	۰/۱
دانشیار	۰/۸۵	-۰/۰۲	۱/۳۳	۰/۱۵	۵/۶۶
پاتریج	۰/۸۲	۱/۴۶	۲/۰۷	۱۰/۳۹	۰/۰۸
صباغ	۰/۸	۱/۶	۲/۳۱	۱۰/۱۲	۰/۰۸

می‌گردد. بعد از سناریوی فوق، سناریوهای PMFI-P و PMFI-S از نظر دقت برآورد به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند (جدول ۴). همخوانی روند تغییرات تابش کل ماهیانه (شکل ۱) با تغییرات ماهیانه تبخیر-تعرق مرجع (شکل ۲) مؤید این واقعیت است که  $ET_0$  به دست آمده در کلیه حالات، حساسیت نسبتاً زیادی به پارامتر تابش از خود نشان می‌دهد. این امر ضرورت استفاده از مدل مناسب تابش را در اینگونه محاسبات تأیید می‌نماید.



(شکل ۳) - همبستگی خطی  $ET_0$  مدل‌های منتخب با داده‌های لایسیمتری.

لازم به ذکر است که مدل تابش آنگستروم که به صورت رایج در تمامی شرایط اقلیمی ایران استفاده می‌گردد، به دلیل عدم سازگاری در برخی اقلیم‌ها، جهت به کارگیری در مدل‌های  $ET_0$  همیشه توصیه نمی‌گردد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که مدل‌های تابش دو مؤلفه‌ای تابش کل خورشیدی را با دقت بهتری پیش بینی می‌کنند (سبزی پرور، (۲۴)). در این رابطه نیز بررسی‌های سپاسخواه (۵) نشان داد که در شرایط کشت واحه‌ای در ایران روش PMF56 که از تابش آنگستروم استفاده نموده است، نتایج  $ET_0$  قابل قبولی را ارائه نمی‌کند. نتایج تحقیق حاضر نیز یافته‌های نامبرده را تأیید می‌نماید. در بررسی‌های دیگری نیز، خیرابی و همکاران (۲) و توشیح (۱) متذکر شدند که نتایج مدل PMF56 در برخی اقلیم‌های کشور، نسبت به داده‌های تجربی لایسیمتری مقادیر کمتری (Underestimation) را نشان می‌دهند.

مطالعات انجام شده توسط جنسن و همکاران (۲۰) و ایرماک و همکاران (۱۶) نیز نشان داد که در شرایط اقلیمی که مدل PMF56 مقادیر  $ET_0$  قابل قبولی را ارائه نماید، به کارگیری مدل‌های ساده غیر ترکیبی تبخیر-تعرق تابش-مبنا و دما-مبنا، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل رایج PMF56 باشند. نتایج به دست آمده در تحقیق حاضر با یافته‌های نامبرده‌گان مطابقت دارد.

نتایج پژوهش حاضر نشان داد، در صورتی که از معادله دانشیار جهت تخمین تابش کل استفاده شود، مدل ساده جنسن - هیز شماره ۲ نتایج  $ET_0$  بهتری را در مقایسه با مدل PMF56 در شرایط اقلیمی مورد مطالعه ارائه می‌نماید (جدول ۵ و ۲). لذا سناریوی JH2-D به عنوان بهترین گزینه جهت تخمین  $ET_0$  در شرایط اقلیمی سرد نیمه خشک توصیه

تابش دو مؤلفه‌ای ارایه شده جهت مناطق خشک و نیمه خشک محاسبه گردد. ضمناً با توجه به این که دقت معادله‌های تخمین تابش و تبخیر-تعرق در یک منطقه تابع شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه می‌باشند، و حسب مورد در دیگر مناطق نیاز به تعدیل دارند، پیشنهاد می‌گردد که این تحقیق در مناطق دیگری با شرایط اقلیمی متفاوت نیز انجام گردد.

همبستگی نتایج سناریوی انتخاب شده JH2-D با داده‌های لایسیمتری در (شکل ۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، معادله همبستگی به‌دست آمده در سطح معنی داری دارای ضریب تعیین قابل قبول ( $R^2 > 0.85$ ) و عرض از مبدا ناچیزی می‌باشد. با توجه به کیفیت پایین داده‌های تابش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های تابش سنجی کشور سبزی پرور، (۳)، پیشنهاد می‌شود تابش مورد نیاز مدل‌های تبخیر-تعرق از معادلات

### منابع

- ۱- توشیح، وفا (۱۳۷۸). تعیین آب مصرفی پتانسیل گیاه مرجع (چمن) و مقایسه آن‌ها با فرمول‌های تجربی. طرح ملی. شماره طرح ۷۳۱۱۰۲-۱۵-۱۱۴.
- ۲- خیرابی، جمشید، توکلی، علیرضا، انتصاری، محمد رضا و سلامت، علیرضا (۱۳۷۶). معرفی جهات نظری و کاربردی روش پنمن-مانیت و ارایه تبخیر-تعرق مرجع استاندارد برای ایران. گروه کار آب مورد نیاز گیاهان و مدیریت محصولات زراعی. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. نشریه شماره ۷۶/۱۶. ۱۶۵ ص.
- ۳- سبزی پرور، علی اکبر (۱۳۸۴). مدلسازی اطلس تابش کشور با استفاده از داده‌های زمینی، اطلاعات ماهواره‌ای و مدل‌های فیزیکی. طرح تحقیقاتی، سازمان هواشناسی کشور. تهران، وزارت راه و ترابری. ۱۸۱ ص.
- ۴- سبزی پرور، علی اکبر (۱۳۸۶). برآورد تابش کل خورشیدی استان همدان در محدوده طول موجهای ۳. میکرون الی ۴ میکرون با استفاده از داده‌های هواشناسی و مدل‌های تحت آنگستروم. طرح تحقیقاتی، دانشگاه بو علی سینا، همدان، ۵۹ ص.
- ۵- سپاسخواه، علیرضا (۱۳۷۶). روش‌های کاربردی محاسبه تبخیر و تعرق گیاهان زراعی. کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. مجموعه مقالات کارگاه آموزشی. مقاله شماره ۲.
- ۶- سلطانی، سعید و مرید، سعید (۱۳۸۴). مقایسه برآورد تابش خورشید با استفاده از روش‌های گریوز-سامانی و شبکه‌های عصبی مصنوعی. مجله دانش کشاورزی. دانشگاه تبریز. شماره ۱. جلد ۱۵.
- ۷- شتایی، حسن (۱۳۷۵). بررسی انطباق یک نمونه از مدل محاسباتی تابش در شرایط اقلیمی ایران. اولین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم. سازمان هواشناسی کشور. تهران.
- ۸- کاشفی پور، محمود و سپاسخواه، علیرضا (۱۳۷۶). تعیین ضرائب محلی تشعشع برای منطقه ملاثانی در استان خوزستان. مجله علمی کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز. جلد بیستم. شماره ۱ و ۲. صفحات ۲۶-۱۷.
- 9- Allen, R.G. (1996). *Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation*. J. Irrig. Drain. Eng. 122(2):97-106.
- 10- Allen, R.G. Pereira, L.S. Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrig. and Drain. Papr No. 56. Rome.
- 11- Angstrom, A. (1924). *Solar and terrestrial radiation*. Quarterly J. Meteorological Society. 50:121.

- 12- Daneshyar, M. (1978). *Solar radiation statistics for Iran*. Sol Energy. 21:345-9.
- 13- Dehghanisani, H. Yamamoto, T. Rasiyah, V. (2004). *Assessment of evapotranspiration estimation models for use in semi-arid environments*. Agric. Water. Manage. 64:91-106.
- 14- Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A. (1985). *Reference crop evapotranspiration from temperature*. Appl. Engng. in Agric. 1(2). 96-99.
- 15- Hargreaves, G. H. and Allen, R.G. (2003). *History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation*. J. Irrig. Drain. Eng. 129(1):53-62.
- 16- Irmak, 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.
- 17- James, L.G. (1988). *Principles of farm irrigation system design*. New York, John Wiley and Sons, Inc.
- 18- Jacovides, C.P. (1997). *Reply to comment on Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration models*. Agricultural water management 3:95-97.
- 19- Jensen, M.E. and Haise, H.R. (1963). *Estimating evapotranspiration from solar radiation*. J. Irrig. And Drain. ASCE. 89:15-41.
- 20- 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.
- 21- Paltridge, G.W. Proctor, D. (1976). *Monthly mean solar radiation statistics for Australia*. Sol Energy. 235-43.
- 22- Reddy, S. J. (1971). *An empirical method for the estimation of total solar radiation*. Solar Energy, 13, 289-291.
- 23- Sabbagh, J. Sayigh, A.A.M. Al-Salam, E.M.A. (1977). *Estimation of the total solar radiation from meteorological data*. Sol. Energy. 19:307-11.
- 24- 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.
- 25- 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 Photoenergy, Online://www.hindawi.com, Doi: 10.1155/2007/94786.
- 26- Sabziparvar, A.A. (2008). *A Simple formula for estimating global solar radiation in central arid deserts of Iran*, Renewable Energy, 33: 1002-1010.
- 27- Vanderlinden, K. Giraldez, J.V. Van Meirrenne, M. (2004). *Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in southern Spain*. J. Irrig. Drain. Eng. 130(3):184-191.
- 28- Walter, I. A. (2001). *ASCE standardized reference evapotranspiration equation*. Proc. Watershed Management and Operations Management. ASAE. St. Joseph. Mich. 209-215.

## Comparison of some crop reference evapotranspiration models in a cold semi-arid climate to optimize the use of radiation models

Á.sabziparvar\* - F.Tafazoli – H.Zare Abyaneh – H.Banejad - M.Mousavi Byegi – M.Ghafouri  
– A.A.Mohseni Movahed – Z.Maryanji<sup>1</sup>

### Abstract

The estimation of reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is of great importance due to its applications in water resource management as well as irrigation scheduling. Difficulties associated with using lysimeters have encouraged researchers to use various ET<sub>o</sub> models, while the shortage of actual radiation data seems the main obstacle for users of radiation-based models. In this research the output of four radiation-based evapotranspiration models including: Penman-Montieth-FAO56 (PMF56), Penman-Montieth FAO-Irmak (PMFI), modified Jensen-Haise (JH1), and Jensen-Haise (JH2) are evaluated for a cold semi-arid climate. The daily ET<sub>o</sub> values were generated for 16 different scenarios and the results were compared against a two-year lysimeter data during the growing season (May to November). Deviations of model results were investigated using mean of R<sup>2</sup>, RMSE, MBE and t-test criteria. The results indicated that the JH2 model which uses radiation model of Daneshyar, can generate the most accurate ET<sub>o</sub> values (R<sup>2</sup>>0.85, P<0.05) in cold semi-arid climates. Although, the Angstrom radiation models are widely being used to generate radiation data in recent years, this research showed that other radiation models can provide more accurate radiation data for radiation-based ET<sub>o</sub> models. In places with lack or shortage of meteorological data, using an accurate radiation model might significantly reduce the errors generated by certain ET<sub>o</sub> models. The mentioned radiation models and ET<sub>o</sub> models should be examined for other climates.

**Key words:** Evapotranspiration models, Radiation models, Drainable lysimeter, Cold semi-arid climate

\* - Corresponding author Email: sabziparvar@yahoo.co.uk

1 - Contribution from College of Agriculture Bu-Ali Sina University & Ferdowsi University & Soil – Conservation and watershed Management Research Center & Research staff, Applied Agromerological Research Center, Isfahan