مقایسه چند مدل برآورد تبخیر–تعرق گیاه مرجع در یک اقلیم سرد نیمه خشک، به منظور استفاده بهینه از مدل‌های تابش

علی‌اکبر سبزی‌پرور* - فرزین تفضلی - حمید زارع ابیانه - حسین بانژاد - محمد موسوی بایگی - محمد غفوری - اسداله محسنی موحد - زهره مریانجی[1]

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 وتأمین نیاز آبی گیاهان، تعیین دقیق تبخیر–تعرق گیاه مرجع بسیار مهم و حیاتی می‌باشد. با توجه به مشکلات متعددی که در به‌کارگیری لایسیمترها وجود دارد، استفاده از مدل‌هایی که بتوانندابن فرآیند را با دقت نسبتا 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–مانتیث فائو ۵۶ (PMF56)، و پنمن–مانتیث فائو با تابش ایرماک (PMFI) برای تخمین تبخیر–تعرق مرجع روزانه چمن (ET_o) در اقلیم سرد نیمه خشک مورد ارزیابی قرار گرفت. تابش کل(R_s) 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_o بدست آمده با داده‌های چهار لایسیمتر زهکش دار در دوره رشد (اردیبهشت آبان) برای دو سال و با استفاده از معیارهای آماری R^2، 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 به‌کار گرفته شده است، در مقایسه با سایر مدل‌ها، مقدار ET_o را در سطح معنی‌دار (۵ ٪ >p) و با دقتی بهتر از مدل PMF56 در اقلیم سرد نیمه خشک همدان برآورد می‌نماید (R^2 >۰/۸۵). نتایج برآورد مدل PMF56 با تابش کل (R_s) 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 به‌دست نیامد. این تحقیق نشان داد، در صورتی که مدل مناسب تابش به‌کار برده شود، می‌توان مدل‌های ساده‌تر ET_o را جهت تخمین مقدار تبخیر–تعرق مرجع روزانه جایگزین مدل‌های ترکیبی نظیر PMF56 نمود. تکرار این تحقیق برای محاسبه ET_o ، 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

مقدمه

برای تعیین مقدار تبخیر وتعرق می‌بایست ابتدا پارامترهای مورد نیاز مدل‌های تبخیر- تعرق اندازه گیری 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 می گذارد. با وجود اهمیت این متغیر، اندازه گیری 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 ارایه 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 مجزاء محاسبه نمودند (پاتریج و پروکتور، (۲۱). آنها درمدل ساده ای، مقادیر تابش مستقیم و پراکنده روزانه را با استفاده از نسبت $(\frac{n}{N})$ و زاویه سمت الراس خورشید (θ) محاسبه نمودند. در مطالعه دیگری، مدل صباغ (۲۳) برای شرایط اقلیمی ایران آزمایش گردید. نتایج بررسی نشان داد که این مدل دو مولفه‌ای برای شرایط اقلیمی خشک و نیمه خشک ایران مناسب می‌باشد سبزی پرور، (۲۴). مقایسه نتایج مدل فوق با مقادیر اندازه گیری 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 ضرائب b,a مدل تابش آنگستروم را برای منطقه ملاثانی در استان خوزستان به ترتیب۰/۲۲ 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 از۰/۴۱ 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_o 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 نیمه خشک 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_o نمود. متاسفانه تاکنون مطالعه جامعی در زمینه سنجش حساسیت مدل‌های ET_o به تابش ورودی انجام نگرفته است، ولی معدود بررسی‌های انجام شده بیانگر این واقعیت است که به‌کارگیری مدل دقیق تابش می‌تواند نقش مهمی در بهبود نتایج تخمین ET_o ایفا نماید ایرماک و همکاران، (۱۶). با توجه به کیفیت پایین برخی پارامترهای هواشناسی اندازه گیری 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_o از

روش استاندارد پنمن- مانتیث- فائو۵۶ 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- مانتیث کارایی لازم را ندارد و تخمین کمتری را از واقعیت ارایه می‌کند. در عوض، به نظر می‌رسد که روش جنسن- هیز (در بعضی شرایط) کارایی بهتری داشته باشد. معادله جنسن- هیز (۱۹) نیز برای محاسبهET_o در نواحی نیمه خشک غرب آمریکا که شباهت اقلیمی با ایران دارد، ارزیابی گردید. ایرماک و همکاران (۱۶) نشان دادند که به‌کارگیری برخی مدل‌های تابش برای اقلیم‌های خشک و نیمه خشک جواب‌های معتبری را در تخمین ET_o ارایه می‌نماید.

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

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: داده‌های لایسیمتری مورد استفاده در این تحقیق در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان با عرض جغرافیائی ´۵۱ °۳۴ شمالی و طول جغرافیایی ´۳۲ °۴۸ اندازه گیری شده است. در این تحقیق، پارامترهای هواشناسی به‌صورت روزانه در 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 لایسیمتری غالبا به‌صورت دو روزه برداشت گردیده است، ولی تعداد محدودی برداشت نیز به‌ویژه بعد از تابستان به‌دلیل کاهش نیاز آبی چمن به‌صورت سه روزه ثبت گردیده است.

میانگین‌های سالانه اقلیمی پارامترهای هواشناسی منطقه مورد مطالعه عبارت است از بارندگی: (mm/yr) ۳۰۰/۲ ، متوسط دما:(°C) ۱۰/۹، میانگین حداکثر دما: (°C) ۱۹ ، میانگین حداقل دما: (°C) ۲/۷ و مجموع سالانه تبخیر (از تشت تبخیر کلاس A): (mm/yr) ۱۵۰۴/۶. اقلیم منطقه نیز با توجه به طبقه بندی‌های کوپن و دو مارتن، نیمه خشک سرد ارزیابی گردید سبزی پرور، (۳).

محل استقرار لایسیمترها در مرکز تحقیقات کشاورزی و منابع طبیعی همدان تقریبا در وسط زمین کشاورزی انتخاب گردید، تا از جاده و باد شکن‌های اطراف دور باشد. لایسیمترها (۴ عدد) از نوع زهکش دار با ابعاد۱×۱×۱ می‌باشند. مشابه درون لایسیمترها، محیط اطراف لایسیمترها نیز به وسعت ۲۰ متر در ۲۰ متر به کشت یکنواخت چمن اختصاص یافت. میزان تبخیر- تعرق هر چهار لایسیمتر 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) ارایه گردیده است. قبل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، کیفیت آن‌ها مورد آزمون کیفی قرارگرفت. روش عددی که برای این منظور انتخاب شد، آزمون همگنی یا ران تست می‌باشد. در بررسی داده‌های خام، گاهی مشاهده گردید که داده‌های بعضی 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.

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

ماه	ساعات آفتابی (hours)	سرعت باد (m/s)	بارندگی ماهانه (mm)	متوسط رطوبت نسبی (%)	حداکثر رطوبت نسبی (%)	حداقل رطوبت نسبی (%)	میانگین حداقل دما (c^0)	میانگین حداکثر دما (c^0)	دمای متوسط (c^0)
اردیبهشت	۷/۴	۱/۶	۴۹/۶	۵۷/۳	۸۷/۰	۳۳/۱	۵/۹	۱۹/۹	۱۲/۹۵
خرداد	۱۱/۴	۰/۸۸	۴/۶	۴۶/۱	۷/۷	۲۳/۷	۹/۴	۲۷/۹	۱۸/۶
تیر	۱۲/۳	۰/۹۵	۱	۴۴/۴	۷۲/۶	۲۲/۷	۱۲/۴	۳۲/۹	۲۲/۶
مرداد	۱۱/۲	۰/۷۲	۰	۴۵/۵	۶۷/۳	۲۳/۲	۱۳/۵	۳۵/۱	۲۴/۳
شهریور	۱۰/۳	۰/۶۷	۰/۳	۳۷/۸	۶۱/۷	۲۰/۵	۹/۲	۳۰/۸	۲۰
مهر	۸/۴	۰/۵۵	۱۴/۳	۴۸	۷۷/۴	۲۵/۳	۴	۲۲/۳	۱۳/۱
آبان	۵/۵	۰/۶۹	۹۷/۱	۶۷/۵	۸۷/۸	۴۲	۲/۱	۱۴	۱۶/۲

مدل‌های مورد استفاده: در این مطالعه جمعا ٤ 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[1] ۵۶ $(PMF56)$:

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

$$ET_0 = \frac{0.408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{\overline{T}+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad (۱)$$

در این معادله، ET_0: تبخیر- تعرق گیاه مرجع چمن (mm/d) که به عنوان تبخیر- تعرق از گیاه مرجع با ارتفاع فرضی ۱۲/ ۰ متر و یک مقاومت سطحی ثابت $70\ s/m$ و آلبیدو ۲۳/ ۰ تعریف شده است؛ R_n: تابش خالص در سطح محصول $(Mj/m^2.d)$؛ G: شار حرارتی خاک (Mj/m^2d)؛ $\overline{T}$: متوسط درجه حرارت هوا (c)؛ e_s: فشار بخار اشباع (kpa)؛ e_a: فشار بخار واقعی (kpa)؛ $(e_s - e_a)$: کمبود فشار بخار اشباع (kpa)؛ Δ: شیب منحنی فشار بخار در مقابل درجه حرارت (kpa/c)؛ γ: ثابت سایکرومتریک (kpa/c) و u_2: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری (m/s) می‌باشند.

مدل پنمن-مانتیث-فائو۵۶ با تابش ایرماک (PMFI)

این مدل مشابه PMF56 می‌باشد، با این تفاوت که در آن مقدار تابش خالص (به‌جای روش رایج فائو۵۶) از روش ایرماک و همکاران (۱۶) (معادله ۱۶) استفاده گردید.

مدل جنسن- هیز شماره ۱ $(JH1)$

مدل اصلاح شده جنسن- هیز، توسط جیمز[2] (۷)

1 Food and Agriculture Organization

2 -James

به‌صورت زیر ارایه گردید:

$$ET_0 = C_T\left(\overline{T} - T_x\right)R_s \qquad (۲)$$

R_s: تابش خورشیدی بر حسب مقدار آب تبخیر پذیر (mm/d)؛ T_x, 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.

$$ETr = (0.025\overline{T} + 0.08)R_s \qquad (۳)$$

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 $\overline{T}$: متوسط درجه حرارت روزانه برحسب ^{o}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:

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

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 ۲۴/. و ۴۸/. در نظر گرفته شد سبزی پرور، (۳) که با مقدار پیشنهادی فائو تفاوت محسوسی ندارد.

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)

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

$$k = 100\left(\lambda N + W_{ij}CosL\right) \qquad (۶)$$

$$\lambda = 0.2/\left(1 + 0.1\phi\right) \qquad (۷)$$

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 (%)؛ $\overline{T}_{\max}$: میانگین حداکثر دمای روزانه (^{o}C)؛ ϕ: عرض جغرافیائی محل (deg)؛ n: طول ساعات آفتابی روزانه $(hour)$ λ: 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 ژوییه 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 :

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

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

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 θ: 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 سبزی پرور،(۲۴):

$$\overline{I} = (1 - CF) \int_{sunrise}^{sunset} I_{dir} Cos\theta \, dt \quad (۱۰)$$

$$\overline{I_{DF}} = \int_{sunrise}^{sunset} I_{dif} \, dt \quad (۱۱)$$

که در آن‌ها، $\overline{I}$: مجموع تابش مؤلفه مستقیم (direct) روزانه ، $\overline{I}_{DF}$: 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:

$$I_{tot} = \overline{I} + \overline{I_{DF}} \quad (۱۲)$$

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.

(۱۳)

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

(۱۴)

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

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

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

(۱۵)

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

۵- مدل ایرماک : برای محاسبه تابش خالص روزانه (R_n) از مدل ایرماک و همکاران (۲۰۰۳) استفاده گردید.

$$R_n = (-0.09T_{max}) + (0.203T_{min}) - (0.101RH_{mean}) + (0.687R_s) + 3.97 \quad (۱۶)$$

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 (^oC)، T_{min}: میانگین حد اقل درجه حرارت هوا (^oC) و RH_{mean}: رطوبت نسبی متوسط (%) می‌باشند.

لازم به‌ذکر است که مدل تابش انتخاب شده دانشیار، پاتریج و صباغ نیز اخیرا 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- فائو۵۶ می‌باشد.

سناریوهای بررسی شده

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

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

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

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

۴) سناریوی PMF56-S: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل

پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ.

۵) سناریوی JH1-A: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل آنگستروم.

۶) سناریوی JH1-D: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار.

۷) سناریوی JH1-P: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج.

۸) سناریوی JH1-S: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۱ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ.

۹) سناریوی JH2-A: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل آنگستروم.

۱۰) سناریوی JH2-D: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره ۲ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار.

۱۱) سناریوی JH2-P: تبخیرتعرق برآورد شده با مدل جنسن- هیز- شماره۲ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج.

۱۲) سناریوی JH2-S: تبخیرتعرق 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- مانتیث- فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل‌های آنگستروم و ایرماک.

۱۴) سناریوی PMFI-D: تبخیر- تعرق بر آورد شده با مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل دانشیار و ایرماک.

۱۵) سناریوی PMFI-P: تبخیر- تعرق بر آورد شده با مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل پاتریج و ایرماک.

۱۶) سناریوی PMFI-S: تبخیر- تعرق بر آورد شده با مدل پنمن- مانتیث- فائو ۵۶ و تابش محاسبه شده با مدل صباغ و ایرماک.

معیارهای آماری واسنجی (شاخص‌های خطا سنجی)

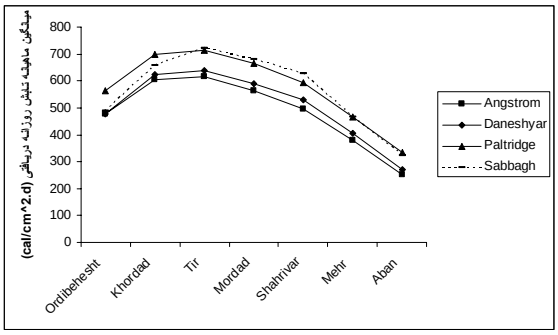
در این تحقیق، برای ارزیابی دقت مدل‌ها و مقایسه نسبی نتایج با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمترها، آزمون‌های زیر که توسط جاکوویدز (۱۸) پیشنهادگردیده است، انجام گرفت. جاکوویدز اعتقاد دارد که شاخص‌های $RMSE$ و MBE به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل ET_0 کافی نمی باشند. بنا به توصیه وی، علاوه بر دو معیارکه عموما برای مقایسه مدل‌های تبخیر- تعرق استفاده می‌شود، می‌بایست از معیار سومی بنام t (معادله ۱۷) که ترکیبی از دو معیارMBE و RMSE می‌باشد، استفاده شود.

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

در این رابطه، t معیار جاکوویدز و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار t کمتر بیانگر دقت بهتر مدل می‌باشد. با توجه به این‌که در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب R^2 بالا باشد، ولی نمایه‌های 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، جنین مواردی تصمیم گیری در انتخاب مدل بهینه را دشوار می‌سازد. بدین منظور، در تحقیق حاضر، معیار ترکیبی جدید که حاصل نسبت R^2 به t می‌باشد(R^2/t)، معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. با به کارگیری معیار خطای جدید R^2/t مشکل انتخاب مدل (مدل‌های) بهینه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده شد. مقادیر R^2/t بالاتر، بیانگر سازگاری بهتر مدل با واقعیت می‌باشد.

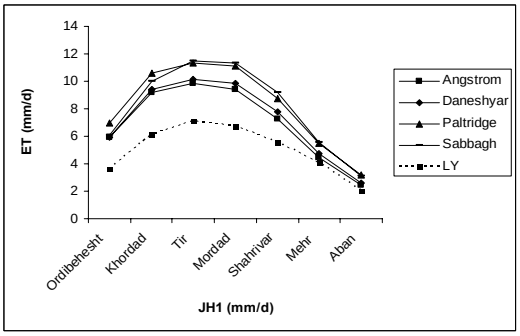
نتایج و بحث

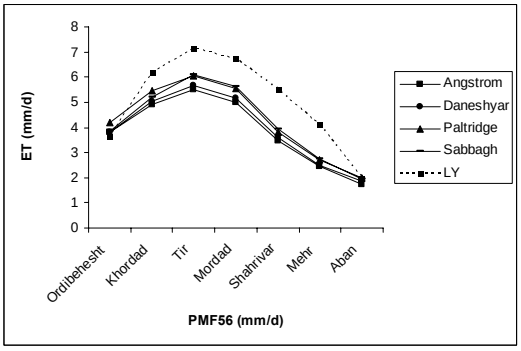
ابتدا با توجه به مدل‌های تابش ذکر شده، مقادیر تابش روزانه و ماهیانه در دوره مورد مطالعه برای ایستگاه هواشناسی همدان توسط ۴ مدل تابش محاسبه گردید (شکل۱). سپس تبخیر-تعرق روزانه مرجع برای هر یک از سناریوهای فوق الذکر برای طول دوره رشد در سال‌های ۱۳۷۲ و ۱۳۷۳ محاسبه و نتایج حاصل با داده‌های تجربی لایسیمتری مقایسه گردیدند (شکل۲). جهت واسنجی نتایج مدل‌ها، 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 می‌دهند.

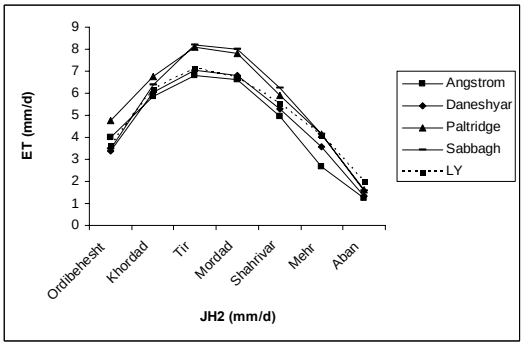


(شکل۱) - میانگین ماهیانه تابش روزانه بر آورد شده در محل لایسیمتری (بر حسب کالری بر سانتیمتر مربع در روز).

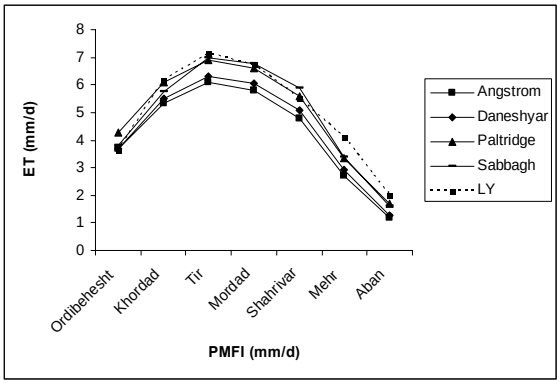
همان‌طور که در (شکل ۲) و (جدول ۲) ملاحظه می‌گردد، نتایج مدل $PMF56$ در تمام سناریوها مقدار ET_0 را کمتر از مقدار واقعی لایسیمتری تخمین می‌زند. بر عکس ، مدل $JH1$ در همه سناریوها ET_0 را خیلی بیشتر از مقدار واقعی لایسیمترها تخمین می‌زند (جدول۳). این امر احتمالا به دلیل اختلاف زیاد دمای ماکزیمم و مینیمم در مرداد ماه در اقلیم نیمه خشک همدان می‌باشد. سناریوی $JH2-A$ که فقط ۲ پارامتر تابش خورشیدی دریافتی در سطح زمین و دمای متوسط را به عنوان متغیرهای اصلی در ورودی لازم دارد، مقدار ET_0 را کمتر از لایسیمترها پیش بینی می‌نماید. 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 داده‌های لایسیمتری از خود نشان داد (جدول۵).







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 (جدول۴). 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 ارایه نمودند.



(شکل۲) - 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	۰/۰۵
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

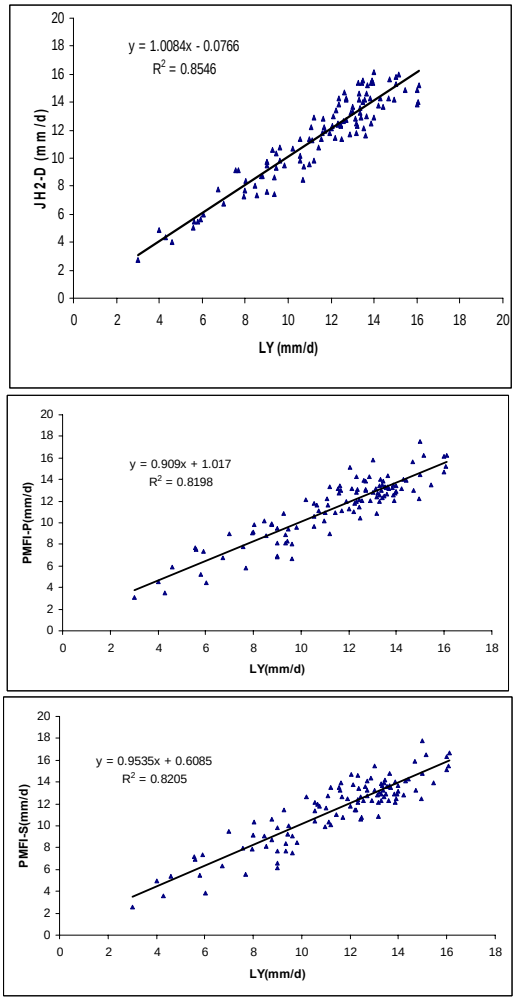
(جدول ۵) - مقادیر خطای ET_0 برآورد شده با مدل $JH2$ در مقایسه با داده‌های لایسیمتری.

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

لازم به‌ذکر است که مدل تابش آنگستروم که به صورت رایج در تمامی شرایط اقلیمی ایران استفاده می‌گردد، به‌دلیل عدم سازگاری در برخی اقلیم‌ها، جهت به‌کارگیری در مدل‌های ET_0 همیشه توصیه نمی گردد. 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 ارایه نمی کند. نتایج تحقیق حاضر نیز یافته‌های نامبرده را تایید 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 ارایه ننماید، به‌کارگیری مدل‌های ساده غیر ترکیبی تبخیر-تعرق تابش- مبناء و دما- مبناء، می‌تواند جایگزین مناسبی برای مدل رایج PMF56 باشند. نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر با یافته‌های نامبردگان 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 ارایه می‌نماید (جداول ۵ و ۲). لذا سناریوی JH2-D به‌عنوان بهترین گزینه جهت تخمین ET_0 در شرایط اقلیمی سرد نیمه خشک توصیه می‌گردد. بعد از سناریوی فوق، سناریوهای PMFI-P و PMFI-S از نظر دقت برآورد به ترتیب در جایگاه‌های بعدی قرار می‌گیرند (جدول۴). همخوانی روند تغییرات تابش کل ماهیانه (شکل۱) با تغییرات ماهیانه تبخیر- تعرق مرجع (شکل۲) مؤید این واقعیت است که ET_0 به‌دست آمده در کلیه حالات، حساسیت نسبتا زیادی به پارامتر تابش از خود نشان می‌دهد. این امر ضرورت استفاده از مدل مناسب تابش را در اینگونه محاسبات تأیید می‌نماید.



(شکل۳) - همبستگی خطی ET_0 مدل‌های منتخب با داده‌های لایسیمتری.

همبستگی نتایج سناریوی انتخاب شده JH2-D با داده‌های لایسیمتری در (شکل۳) نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، معادله همبستگی به‌دست آمده در سطح معنی داری دارای ضریب تعیین قابل قبول (R^2>۰/۸۵) و عرض از مبداء ناچیزی می‌باشد. با توجه به کیفیت پایین داده‌های تابش اندازه گیری شده در ایستگاه‌های تابش سنجی کشور سبزی پرور،(۳) ، پیشنهاد می‌شود تابش مورد نیاز مدل‌های تبخیر-تعرق از معادلات تابش دو مؤلفه‌ای ارایه شده جهت مناطق خشک و نیمه خشک محاسبه گردد. ضمنا 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.

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-مانتیث 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. ۱۶۵ص.

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 ومرید، سعید(۱۳۸۴). مقایسه بر آورد تابش خورشید با استفاده از روش‌هارگریوز- 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 ۱و ۲. صفحات ۲۶-۱۷.

9- Allen, R.G. (1996). *Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiraiton 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- Dehghanisanij, H. Yamamoto, T. Rasiah, V. (2004). *Assessment of evapotranspiraiton 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. Engrg. in Agric. 1(2). 96-99.
15- Hargreaves, G. H. and Allen, R.G. (2003). *History and evaluation of Hargreaves evapotranspiraiton equation*. J. Irrig. Drain. Eng. 129(1):53-62.
16- Irmark, S. Irmark, 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.
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 evapotranspiraiton 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 solarradiation 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 centralarid deserts of Iran,* Renewable Energy, 33: 1002-1010.
27- Vanderlinden, K. Giraldez, J.V. Van Meirrenne, M. (2004). *Assessing reference evapotranspiraiton by the Hargreaves method in southern Spain*. .J. Irrig. Drain. Eng.130(3):184-191.
28- Walter, I. A. (2001). *ASCE standardized reference evapotranspiraiton equation*. Proc. Watershed Management and Operaitons 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

A.sabziparvar* - F.Tafazoli – H.Zare Abyaneh – H.Banejad - M.Mousavi Byegi – M.Ghafouri – A.A.Mohseni Movahed – Z.Maryanji[1]

Abstract

The estimation of reference evapotranspiration (ETo) 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 ETo 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 ETo 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^2, RMSE, MBE and t-test criteria. The results indicated that the JH2 model which uses radiation model of Daneshyar, can generate the most accurate ETo values ($R^2>0.85$, $P<0.05$) 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 ETo models. In places with lack or shortage of meteorological data, using an accurate radiation model might significantly reduce the errors generated by certain ETo models. The mentioned radiation models and ETo 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