پیش‌بینی تبخیر– تعرق سالانه با کاربرد داده‌های هواشناسی در شماری از ایستگاه‌های مناطق نیمه‌خشک ایران

علی اکبر عرب سلغار*[۱] ، هادی دهقان[۲] ، حسین صدقی[۳] و محمد نادریان فر[۴]

تاریخ دریافت:۸۹/۹/۷ تاریخ پذیرش:۸۹/۱۲/۸

چکیده

عمده‌ترین عامل مصرف منابع آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تبخیر- تعرق است، لذا آگاهی از روند تغییرات و پیش‌بینی این فراسنج و سایر فراسنجهای اقلیمی موثر بر آن نقش موثری را در برنامه‌ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. هدف اصلی این تحقیق در مرحله‌ی اول بررسی روند تغییرات، در مرحله‌ی دوم پیش‌بینی ETo سالانه با استفاده از رگرسیون چند متغیره بین فراسنجهای موثر بر تبخیر- تعرق در شش ایستگاه سینوپتیک ایران، شامل مشهد، شیراز، تبریز، کرمانشاه، خرم‌آباد و ارومیه می‌باشد. از آن‌جایی که روند فراسنجهای اقلیمی در اقلیم‌های مختلف متفاوت است، حتی‌الامکان از ایستگاه‌هایی استفاده شده است که همگی در اقلیم نیمه‌خشک و تا حد امکان دارای آمار طولانی مدت می‌باشند. برای محاسبه‌ی روند از روش کمترین مربعات خطا بهره گرفته شده است. برای پیش‌بینی تبخیر- تعرق کل دوره‌ی آماری (L) به دو قسمت تقسیم شد: ۱- دوره‌ی (L-5) سال ابتدایی، که از این دوره جهت واسنجی ضرایب تابع چند متغیره استفاده شد. ۲- پنج سال انتهایی که برای پیش‌بینی ETo و ارزیابی معادلات رگرسیونی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بررسی روند نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها دماهای بیشینه، کمینه و تبخیر- تعرق افزایش و بارندگی و رطوبت نسبی روند کاهشی داشته‌اند. پیش‌بینی ETo سالانه با استفاده از رگرسیون چند متغیره بطور کلی نشان از توافق خوب بین ETo سالانه‌ی تخمین زده شده با استفاده از معادله‌ی پنمن- مانتیت و روش مذکور با خطای نسبی کم می‌باشد. مقادیر خطای نسبی در ایستگاه مشهد بین ۴/۱– تا ۲/۴، شیراز بین ۱/۶– تا ۰/۹، تبریز بین ۰/۵– تا ۲/۴، کرمانشاه بین ۲/۳– تا ۰/۷، خرم‌آباد بین ۰/۱– تا ۲/۹ و ارومیه بین ۲/۳– تا ۲/۸ محاسبه شدند. بنابراین به آسانی می توان با استفاده از معادلات رگرسیونی تبخیر- تعرق را با دقتی مناسب پیش‌بینی کرد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر- تعرق ، رگرسیون چند متغیره، روش فائو پنمن- مانتیث، اقلیم نیمه‌خشک

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۲- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی دانشگاه فردوسی مشهد
۳- استاد و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران
۴- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی آب دانشگاه فردوسی مشهد
*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: email: ali.arabsolghar@gmail.com

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

با توجه به اینکه بیشتر نقاط ایران در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته و دارای منابع آب محدود می‌باشند، آب اولین و مهم‌ترین عامل محدودیت در افزایش تولید کشاورزی است. بنابراین ضروری است تا مصرف آب در کشاورزی بهینه شود.

آبیاری جهت برطرف کردن نیاز آبی، تولید و رشد گیاه در مناطق خشک و نیمه خشک ضروری می‌باشد. بنابراین محاسبه‌ی دقیق نیاز آبی گیاه (ETc) جهت بهینه‌سازی مصرف آب، برنامه‌ریزی آبیاری و افزایش کارایی مصرف آب ضروری است. محاسبه‌ی ETc در بسیاری از مدلهای هیدرولوژیکی مانند طرحهای منابع آب، آبیاری و زهکشی نیز مورد نیاز است (سامر و جاکوبز، ۲۰۰۵).

اندازه گیری مستقیم ETc تقریبا دشوار، زمان بر و پرهزینه است (سامر و جاکوبز، ۲۰۰۵). تبخیر- تعرق گیاهی (ETc) اغلب از طریق ضرب تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ETo) در ضریب گیاهی به دست می آید. ETo را می‌توان از روش‌های تئوری یا تجربی محاسبه کرد. از بین روشهای مختلف محاسبه ETo، معادله‌ی پنمن- مانتیت (آلن و همکاران، ۱۹۹۸) و معادله‌ی هارگریوز- سامانی (۱۹۸۲) بطور گسترده جهت محاسبه‌ی EToدر دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. توابع رگرسیونی چند متغیره نیز جهت محاسبه‌ی ETo مفید و کاربردی هستند و در بعضی از نقاط دنیا نتایج رضایت‌بخشی را داشته‌اند (لی و همکاران، ۲۰۱۰).

اگر داده‌های تشت تبخیر موجود باشند با واسنجی مناسب ضریب تشت (Kp) می‌توان از آن به عنوان ابزار کاربردی دیگری جهت محاسبه‌ی ETo بهره جست (پریرا و همکاران، ۱۹۹۵). آلن و همکاران (۱۹۹۸) معادله‌ی پنمن مانتیت را توسعه دادند که امروزه به عنوان روش استاندارد محاسبه‌ی ETo بکار می رود.. این معادله در نقاط مختلف دنیا در مقایسه با معادلات دیگر نتایج رضایت‌بخشتری را داده است (سامر و جاکوبز، ۲۰۰۵).

لی و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی در شمال چین دقت روشهای تشت تبخیر و رگرسیون چند متغیره را بین فراسنجهای موثر بر تبخیر- تعرق (دمای متوسط، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی) در مقایسه با روش پنمن- مانتیت پس از واسنجی روش‌های فوق در پیش بینی سالانه‌ی ETo مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد که روش رگرسیون چند متغیره خطای کمتری نسبت به روش تشت تبخیر دارد.

موسوی‌بایگی و همکاران (۱۳۸۸) معادله‌ی ساده‌ای را با استفاده از ایجاد رگرسیون بین مقدار ETo روزانه‌ی محاسبه شده به روش پنمن- مانتیت و فراسنجهای دمای هوا، تابش و ضریب رطوبتی جهت برآورد ETo روزانه در کلیه‌ی ایستگاههای سینوپتیک استان خراسان رضوی ارائه کردند. علیزاده و همکاران (۱۳۸۰) در تحقیقی دقت و کارایی روشهای هارگریوز- سامانی (۱۹۸۲) و تشت تبخیر را برای محاسبه‌ی ETo در ایستگاههای سینوپتیک استان خراسان نسبت به روش پنمن- مانتیت مورد بررسی قرار داد. آنها همچنین اثر خشکی را بر داده‌ها تصحیح کردند و نشان دادند که روش هارگریوز- سامانی قبل از تصحیح داده‌های تبخیر- تعرق در طول سال حدود ۱۲ درصد نسبت به روش استاندارد فرابرآورد می‌نماید، در حالی که پس از تصحیح ، این مقدار به ۲ درصد رسید.

بررسی منابع نشان می‌دهد که تاکنون معادلات مختلفی برای تعیین ETo ارائه شده اند. برای تعیین بهترین معادله تجربی برای یک منطقه خاص، روش معمول استفاده از داده‌های لایسیمتری در مقیاسهای زمانی متفاوت می‌باشد. در صورت نبود داده‌های لایسیمتری مناسب می‌توان از روش پنمن- مانتیت به عنوان یک روش استاندارد برای ارزیابی سایر روشها استفاده کرد. با توجه به اینکه هر معادله برآوردکننده ETo در منطقه‌ای خاص و با شرایط اقلیمی مربوط به آن منطقه استخراج شده است، لذا لازم است که کارایی این معادلات برای استفاده در مناطق دیگر مورد ارزیابی قرار گیرند و یا آن که معادله‌ی تجربی جدیدی برای آن منطقه واسنجی گردد. در این تحقیق سعی شده است با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه مانند دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد، یک معادله تجربی در هر ایستگاه از طریق رگرسیون خطی چند متغیره واسنجی شود. همچنین برای ارزیابی دقت معادلات تجربی از روش

Archive of SID

www.SID.ir

پنمن- مانتیت به عنوان روش استاندارد استفاده شده است.

از اهداف دیگر تحقیق حاضر بررسی روند تغییرات دراز مدت ETo و سایر فراسنجهای اقلیمی در مقیاس سالانه می‌باشد. از آنجا که تبخیر- تعرق عمده‌ترین عامل مصرف آب درمناطق خشک و نیمه خشک مانند کشور ایران می‌باشد، لذا آگاهی از روند تغییرات این فراسنج و سایر فراسنجهای اقلیمی موثر بر آن نقش موثری در برنامه ریزی، توسعه و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. تاکنون تحقیقات متعددی بر روی روند فراسنجهای اقلیمی در ایران انجام شده است که در ادامه به بعضی از آنها اشاره شده است.

گل‌کار حمزیی یزد و همکاران (۱۳۸۶) به بررسی روند تغییرات زمانی ETo با استفاده از روش پنمن- مانتیت پرداختند. نتایج نشان داد که در دوره‌ی آماری ۴۰ ساله، بطور میانگین، ۳۸ درصد از ایستگاهها دارای روند مثبت و ۶۲ درصد دارای روند منفی و در دوره‌ی آماری ۲۰ ساله، ۶۲/۵ درصد از ایستگاهها دارای روند مثبت و ۳۷/۵ درصد دارای روند منفی بوده‌اند. نتایج تحقیقات فولادمند (۱۳۸۹) نیز نشان داد که بطور کلی روند تغییرات ET_o پیش‌بینی شده در سطح استان فارس صعودی است.

در تحقیق دیگری از شیرغلامی و قهرمان (۱۳۸۴) روند تغییرات دمای متوسط سالانه‌ی تعدادی از ایستگاههای هواشناسی ایران مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ۵۹ درصد ایستگاهها تغییرات دما دارای روند مثبت و در ۴۱ درصد دیگر دارای روند منفی می‌باشند و همچنین نتایج بررسی در دوره مشترک آماری سالهای ۱۹۶۸ تا ۱۹۹۸ نشان داد که در ۶۸ درصد ایستگاهها روند مثبت و در ۳۲ درصد دیگر روند منفی حاکم است. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد در مناطق مختلف بسته به مقیاس زمانی و مکانی، ET_o و فراسنجهای اقلیمی روند متفاوتی از خود نشان می‌دهند. بنابراین یکی از ضرورت‌های انجام این تحقیق نسبت به تحقیقات قبلی طول دوره آماری است که هر چه طول دوره آماری بیشتر باشد نتایج از اعتبار بیشتری برخوردار خواهند بود. از طرفی در بیشتر مطالعات انجام شده روند ET_o یا یک فراسنج اقلیمی خاص مورد بررسی قرار گرفته است و روند تغییرات فراسنجهای اقلیمی موثر بر تبخیر تعرق بررسی نشده است (شیرغلامی و قهرمان، ۱۳۸۴، قهرمان و تقواییان، ۲۰۰۸). بر این اساس اهداف تحقیق حاضر را می‌توان به صورت ذیل خلاصه کرد:

۱- بررسی تغییرات و روند احتمالی تبخیر تعرق سالانه و فراسنجهای اقلیمی مؤثر بر آن با استفاده از آزمون فراسنجی کمترین مربعات خطا.

۲- ارائه‌ی معادلات تجربی ساده با توجه به فراسنجهای هواشناسی جهت برآورد ET_o سالانه در ایستگاههای سینوپتیک نواحی اقلیمی نیمه خشک ایران.

مواد و روش‌ها

ایستگاههای مورد مطالعه

به منظور انجام تحقیق حاضر از داده‌های هواشناسی ۶ ایستگاه سینوپتیک واقع در اقلیم نیمه‌خشک با طول دوره آماری مشترک ۵۵ ساله استفاده گردید. در جدول ۱ مشخصات این ایستگاهها ارائه شده است.

جدول۱ – خصوصیات مکانی ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه

	ایستگاه					
	مشهد	شیراز	تبریز	کرمانشاه	خرم آباد	ارومیه
دوره‌ی آماری	۱۹۵۱-۲۰۰۵	۱۹۵۱-۲۰۰۵	۱۹۵۱-۲۰۰۵	۱۹۵۱-۲۰۰۵	۱۹۵۱-۲۰۰۵	۱۹۵۱-۲۰۰۵
ارتفاع (m)	۹۹۹/۲	۱۴۸۸	۱۳۶۱	۱۳۲۲	۱۱۲۵	۱۳۱۳
طول جغرافیایی	۵۹ ° ۳۸ '	۵۲ ° ۳۲ '	۴۶ ° ۱۷ '	۴۷ ° ۷ '	۴۸ ° ۲۲ '	۴۵ ° ۵ '
عرض جغرافیایی	۳۶ ° ۱۶ '	۲۹ ° ۳۶ '	۳۸ ° ۵ '	۳۴ ° ۱۷ '	۳۳ ° ۲۹ '	۳۷ ° ۳۲ '

Archive of SID

www.SID.ir

آمار اکثر ایستگاهها در سالهای مورد مطالعه کامل بود و در مواردی که کمبود آمار وجود داشت، از ایستگاههای مجاور تخمین زده شد. بدین ترتیب کل دوره‌ی آماری (L) در هر ایستگاه به دو قسمت تقسیم شد:

۱- دوره‌ی (L-5) سال ابتدایی، که از آن برای واسنجی ضرایب تابع چند متغیره استفاده شد.

۲- پنج سال انتهایی که برای پیش بینی ETo و ارزیابی معادلات رگرسیونی استفاده شد.

معادله‌ی پنمن- مانتیث

به منظور برآورد مقدار ET_o از روش پنمن- مانتیث مطابق معادله‌ی زیر استفاده شد (آلن و همکاران، ۱۹۹۸):

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta(R_n - G) + \gamma[890/(T+273)]U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\,U_2)} \qquad (۱)$$

که در آن: ET_o تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع (میلی متر در روز)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر مترمربع در روز)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (درجه‌ی سانتی گراد)، U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه)، $e_a - e_d$ کمبود فشار بخار اشباع (کیلوپاسکال)، Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه‌ی سانتی گراد)، γ ضریب رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه‌ی سانتی گراد) و G شار گرمایی زمین (مگاژول بر مترمربع در روز) می‌باشند. نحوه‌ی محاسبه‌ی اجزای معادله فوق به وسیله‌ی آلن و همکاران (۱۹۹۸) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که به منظور محاسبه‌ی ETo ماهانه از روش پنمن- مانتیث از برنامه‌ی تهیه شده در نرم افزار MATLAB استفاده شد و پس از آن ETo سالانه در هر ایستگاه محاسبه گردید.

آزمون روند

به منظور بررسی روند ETo سالانه و سایر عوامل اقلیمی (دماهای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی و بارندگی) از روش کمترین مربعات خطا استفاده شد. بطور کلی در این روش عرض از مبدأ و شیب خط رگرسیون به وسیله حداقل نمودن خطا بین دو متغیر مستقل (زمان، X) و متغیر وابسته (مقدار فراسنج، Y) به دست آمده و سپس آماره‌ی $t = b/s_b$ که در آن b عرض از مبدأ خط برازش داده شده و s_b انحراف معیار داده‌ها (رابطه‌ی۲) است، تعریف می‌شود:

$$S_b^{\,2} = \frac{S^2}{\sum (X - X_i)^2} \qquad (۲)$$

که در آن S^2 از رابطه‌ی (۳) به دست می آید:

$$S^2 = \frac{\sum (Y - Y_i)^2}{(n-2)} \qquad (۳)$$

فرضیه های صفر و مقابل نیز به صورت زیر تعریف می شوند:

$$H_0 : b = 0, H_1 \neq 0 \qquad (۴)$$

اگر قدر مطلق $t = b/s_b$ از $t_{1-\frac{\alpha}{2},n-2}$ از جدول t-student بزرگتر باشد، فرض H_0 رد خواهد شد، در این صورت شیب خط اختلاف معنی‌داری با صفر خواهد داشت و از آن به عنوان روند در سری زمانی یاد می‌شود. یکی از شرایط اساسی استفاده از آزمون فوق این است که داده‌ها باید از تابع توزیع نرمال تبعیت کنند. بدین منظور ابتدا آزمون کولموگروف- اسمیرنوف مورد استفاده قرار گرفته و در صورتی که داده‌ها از تابع توزیع نرمال تبعیت کنند، می‌توان روش کمترین مربعات خطا را به کار برد.

پیش‌بینی تبخیر- تعرق سالانه

براساس داده‌های اقلیمی سالانه در ایستگاه‌های انتخابی (دمای متوسط، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی و سرعت باد) که بر مقدار ETo مؤثر هستند، یک معادله‌ی تجربی در هر ایستگاه از طریق رگرسیون خطی چند متغیره واسنجی شد. معادله‌ی رگرسیون چهار متغیره ETo سالانه به صورت زیر می‌باشد:

$$ETo, a = C_T T_a + C_N N_a + C_{RH} RH_a + C_u U_a + D \qquad (۵)$$

که در آن T_a دمای متوسط سالانه (درجه سانتی گراد)، N_a مجموع ساعات آفتابی سالانه (ساعت)، RH_a درصد رطوبت نسبی، U_a متوسط سرعت بادسالانه (متر بر ثانیه) می باشند. C_T، C_N، C_{RH} و C_U ضرایب معادله رگرسیون و D عرض از مبدأ می‌باشد. بعد از واسنجی

Archive of SID

www.SID.ir

ضرایب رگرسیون فوق از طریق داده‌های هواشناسی سالهای اولیه، مقدار ETo با استفاده از رابطه‌ی (۵) برای پنج سال انتهایی پیش‌بینی کرد. برای مقایسه‌ی نتایج حاصل از ETo سالانه‌ی محاسباتی از روش پنمن- مانتیت و پیش‌بینی شده از رابطه‌ی (۵) از معیارهای درصد خطای نسبی و میانگین مجذور مربعات خطا به صورت رابطه‌های زیر استفاده گردید:

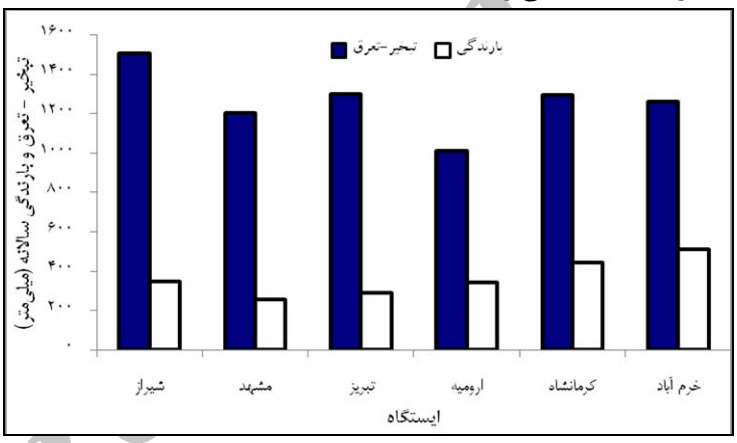
$$RE = (\frac{ETo_{pre} - ETo_{FAO-PM}}{ETo_{FAO-PM}}) \times 100 \quad (۶)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ETo_{pre} - ETo_{FAO-PM})^2}{n}} \quad (۷)$$

در معادلات بالا ETo_{pre} تبخیر- تعرق پیش‌بینی شده، ETo_{FAO-PM} تبخیر- تعرق محاسبه شده با استفاده از روش پنمن- مانتیت، RE درصد خطای نسبی و n تعداد سالهای آماری می‌باشد. مقادیر RE مثبت نشانه برآورد بیشتر و مقادیر منفی نشانه برآورد کمتر می‌باشد. مقدار $RMSE$ ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد و در صورتی که مقادیر پیش‌بینی شده و محاسبه شده یکی باشند (بهترین حالت) برابر صفر می‌باشد.

نتایج و بحث

بررسی‌های میانگین ETo سالانه نشان می‌دهند که در ایستگاههای مورد مطالعه، ایستگاه شیراز با ۱۵۱۰ میلی‌متر بیشترین و ایستگاه ارومیه با ۱۰۱۱ میلی‌متر کمترین مقدار ETo را در دوره آماری داشته‌اند. در شکل ۱ مقایسه‌ی بین میانگین ETo و بارندگی سالانه در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل۱- مقایسه‌ی میانگین ETo و بارندگی سالانه (میلی‌متر) در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه.

چنانچه مشاهده می شود بیشترین اختلاف مربوط به ایستگاه شیراز و کمترین آن مربوط به ایستگاه خرم آباد می‌باشد.

تحلیل روند تبخیر – تعرق و داده‌های اقلیمی

از آن جایی که در آزمون کمترین مربعات خطا داده‌ها باید از توزیع نرمال تبعیت کنند، لذا سریهای زمانی ETo و سایر فراسنجهای اقلیمی توسط آزمون کولموگروف- اسمیرنوف مورد آنالیز قرار گرفت و مشخص گردید که توزیع داده‌ها نرمال است. شیب خط روند درازمدت ETo و بارندگی سالانه و سایر فراسنجهای اقلیمی در جدول ۲ ارائه شده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول۲- شیب خط روند دراز مدت فراسنجهای اقلیمی و ETo سالانه در کل دوره‌ی آماری (۲۰۰۵- ۱۹۵۱) در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعه در اقلیم نیمه خشک ایران.

ایستگاه	دمای حداقل	دمای حداکثر	رطوبت نسبی	بارندگی	ETo
شیراز	۰/۰۵*	۰/۰۲*	-۰/۱۱*	-۰/۳۷	۱/۱۱
مشهد	۰/۰۵*	۰/۰۳*	-۰/۰۸*	۰/۳۱	۲/۳۵*
تبریز	۰/۰۴*	۰/۰۲*	-۰/۱۶*	-۱/۷۲*	۱/۷۶
ارومیه	-۰/۰۳*	-۰/۰۱	-۰/۰۴	-۲/۰۹*	۲/۶۲*
کرمانشاه	۰/۰۳*	۰/۰۲*	-۰/۱۴*	۰/۰۸	-۰/۵۴
خرم آباد	-۰/۰۴*	-۰/۰۲*	-۰/۰۳	-۰/۷۶	-۰/۹۷

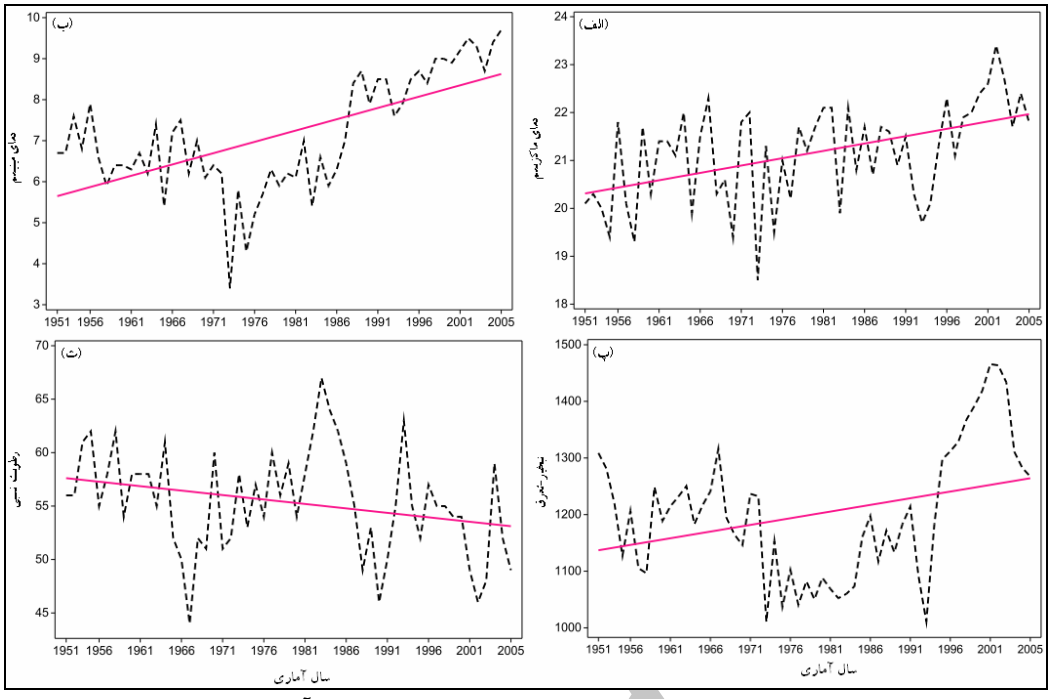
* : معنی دار در سطح ۵ درصد

بطور کلی نتایج نشان داد از مجموع ۶ ایستگاه تحت بررسی، در ایستگاههای شیراز، مشهد، تبریز و ارومیه شیب خط روند درازمدت ETo مثبت و در ایستگاههای کرمانشاه و خرم آباد منفی می‌باشد. از بین ایستگاههای مورد مطالعه شیب خط در ایستگاههای مشهد و ارومیه در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

شیب خط بارندگی سالانه در ایستگاههای شیراز، تبریز، ارومیه و خرم آباد منفی و در ایستگاههای مشهد و کرمانشاه مثبت می‌باشد. چنانچه معنی‌دار بودن شیب‌ها مد نظر قرار گیرد، درایستگاههای تبریز و ارومیه روند کاهش معنی‌دار بارندگی را شاهد هستیم. این نتایج بطور کلی نشان می‌دهد که در دراز مدت ETo افزایش و بارندگی کاهش یافته است. فراسنجهای اقلیمی موثر بر ETo مانند دماهای بیشینه و کمینه و رطوبت نسبی روند تقریباً مشابهی را نشان دادند. به عنوان مثال دماهای بیشینه و کمینه در همه‌ی ایستگاه‌ها به جز ارومیه و خرم آباد روند افزایشی داشته و رطوبت نسبی در همه‌ی ایستگاهها کاهش یافته است. با توجه به روند افزایشی دما در اکثر ایستگاه‌ها روند کاهشی رطوبت نسبی قابل توجیه خواهد بود. به نظر می رسد از بین فراسنجهای موثر بر ETo، دما مهمترین فراسنج اقلیمی می‌باشد که با افزایش آن ETo در همه‌ی ایستگاهها (به جز ایستگاه ارومیه) افزایش یافته است. درشکل۲ نمودارهای مربوط به بررسی روند در ایستگاه سینوپتیک مشهد به عنوان نمونه نشان داده شده است.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۲- بررسی روند ETo و سایر داده های اقلیمی در مقیاس سالانه در کل دوره‌ی آماری در ایستگاه سینوپتیک مشهد (خط مستقیم روند درازمدت وخط منقطع نوسانات سالانه می‌باشد)؛ (الف) دمای بیشینه (ماکزیمم)، (ب) دمای کمینه (مینیمم)، (پ) ETo و (ت) رطوبت نسبی

پیش‌بینی تبخیر– تعرق سالانه با استفاده از توابع رگرسیونی چهار متغیره

ضرایب تابع رگرسیونی چهار متغیره برای سالهای ابتدایی از طریق رگرسیون خطی چندمتغیره بین ETo سالانه و سایر داده های اقلیمی با استفاده از نرم افزار SPSS تعیین شدند. این ضرایب به همراه ضریب تبیین (R^2) در شش ایستگاه انتخابی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول۳- ضرایب معادله رگرسیونی چهار متغیره در ایستگاههای مختلف.

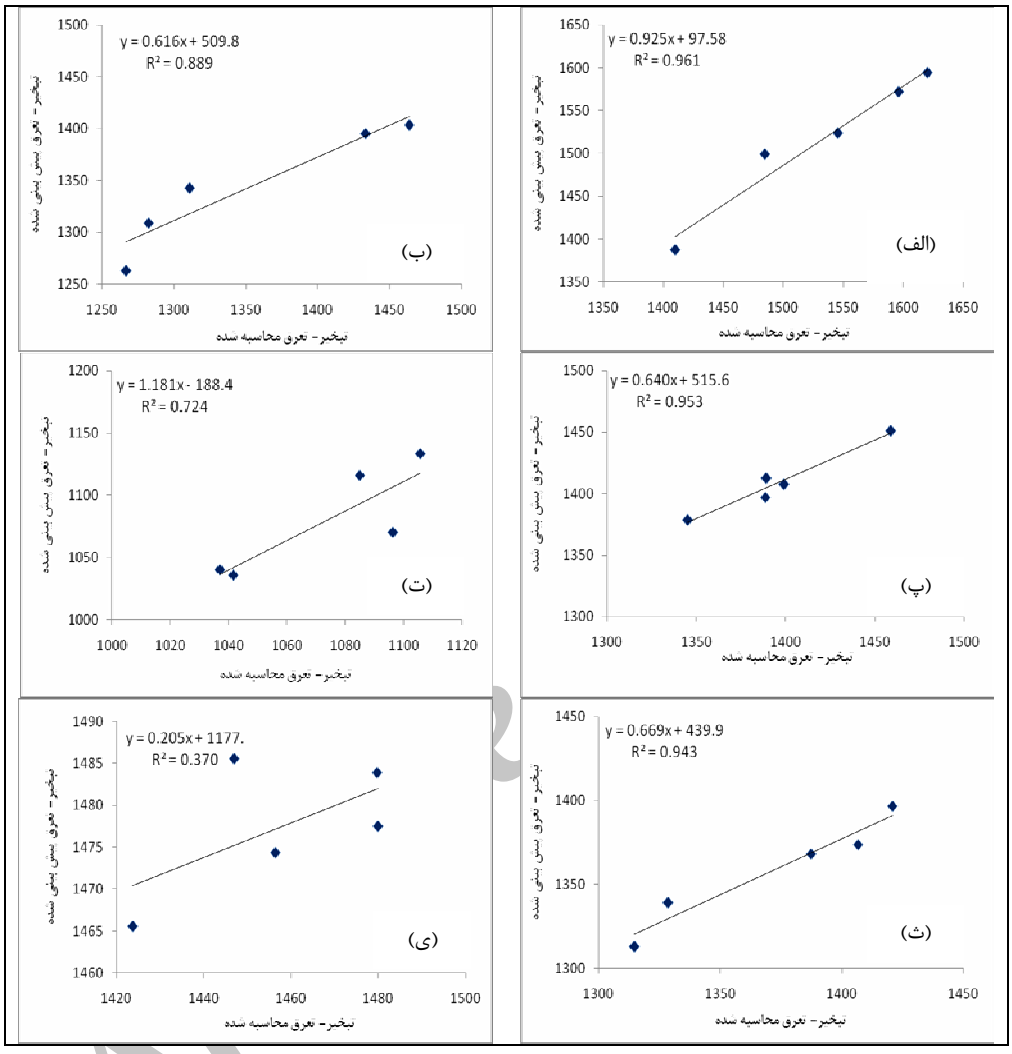
	ایستگاه					
	مشهد	شیراز	تبریز	کرمانشاه	خرم آباد	ارومیه
C_T	۲۸/۹۷۴	۴۰/۱۷۵	۳۰/۹۷۷	۲۳/۷۷۳	۲۴/۲۶۵	۲۷/۳۶۲
C_N	۰/۰۵۷	۰/۰۳	۰/۱۰۶	۰/۰۸۳	۰/۱۱۹	۰/۱۱۲
C_{RH}	-۵/۳۴	-۶/۲۹۹	-۷/۰۷۸	-۸/۳۶۸	-۱/۴۵۹	۰/۵
C_u	۱۸۲/۹۳۹	۲۴۸/۲۴۸	۱۵۶/۰۱۹	۱۷۶/۱۴۴	۲۶۷/۸۰۳	۱۳۴/۲۹۲
D	۶۲۶/۲۱۳	۴۹۴/۷۹۷	۶۱۱/۹۰۶	۷۵۹/۶۷۴	۲۲۳/۲۷۲	۱۸۹/۴۱۳
R^2	۰/۹۶۸	۰/۹۶۶	۰/۹۳۵	۰/۹۵۱	۰/۹۹۲	۰/۹۷۸

چنانچه مشاهده می شود ضریب R^2 در همه‌ی ایستگاه‌ها بزرگتر از ۰/۹ و در حد قابل قبول می‌باشد. با استفاده از این ضرایب و رابطه‌ی (۵) ETo سالانه در پنج سال آخر پیش‌بینی شد. مقایسه‌ی بین ETo محاسباتی با روش پنمن- مانتیت و پیش‌بینی شده با رابطه‌ی (۵) برای ایستگاههای مختلف در شکل ۳ به همراه معادله‌ی

Archive of SID

www.SID.ir

خط (شیب و عرض از مبدأ) و ضـریب تبیـین نـشان داده شده است.



شکل۳- مقایسه‌ی ETo سالانه‌ی محاسبه شده و پیش‌بینی شده در ایستگاههای سینوپتیک مورد مطالعـه؛ (الـف) شـیراز، (ب) مشهد، (پ) تبریز، (ت) ارومیه، (ث) کرمانشاه و (ی) خرم آباد.

مقدار *RMSE* نشان می‌دهد که تا چه حد اخـتلاف بـین تک‌تک مقادیر پیش‌بینی شده نسبت بـه مقـدار محاسـبه شده متناظر، صرف‌نظر از این که کمتـر یـا بیـشتر باشـد، وجود دارد. مقدار این شاخص از ۲۰/۵۹ میلی‌متر در سـال در ایستگاه کرمانشاه تا ۳۶/۸۱ در ایـستگاه مـشهد متغیـر است (جدول ۴).

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های آماری R^2 و RMSE بین مقادیر ETo پیش‌بینی شده و محاسبه شده در پنج سال آخر.

فراسنج	مشهد	شیراز	تبریز	کرمانشاه	خرم آباد	ارومیه
R^2	۰/۸۸	۰/۹۶	۰/۹۵	۰/۹۴	۰/۳۷	۰/۷۲
RMSE	۳۶/۸۱	۲۲/۰۶	۱۹/۲۳	۲۰/۵۹	۲۶/۷۹	۲۲/۲

www.SID.ir

مقادیر *RMSE* با توجه به اینکه پیش‌بینی ETo در مقیاس سالانه انجام شده است، قابل توجیه می‌باشد. همچنین درصد خطای نسبی (*RE*) پیش بینی ETo سالانه با استفاده از رابطه‌ی (۵) در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول۵- درصد خطای نسبی پیش بینی ETo سالانه با استفاده از معادلات رگرسیونی در پنج سال آخر.

	ایستگاه					
	مشهد	شیراز	تبریز	کرمانشاه	خرم آباد	ارومیه
۲۰۰۱	-۴/۱	- ۱/۶	- ۰/۵	-۱/۶	۰/۲	- ۲/۳
۲۰۰۲	- ۲/۶	- ۱/۵	۱/۶	۰/۷	۲/۶	-۰/۵
۲۰۰۳	۲/۴	- ۱/۳	۰/۵	- ۱/۳	۲/۹	۰/۳
۲۰۰۴	۲	۰/۹	۲/۴	- ۰/۱	- ۰/۱	۲/۸
۲۰۰۵	- ۰/۳	- ۱/۵	۰/۶	- ۲/۳	۱/۲	۲/۵

بطور کلی توافق خوبی بین مقادیر محاسباتی و پیش‌بینی شده ETo در همه‌ی ایستگاهها وجود دارد. مقادیر خطای نسبی در ایستگاه مشهد بین ۴/۱- تا ۲/۴، در شیراز بین ۱/۶– تا ۰/۹، در تبریز بین ۰/۵– تا ۲/۴، در کرمانشاه بین ۲/۳– تا ۰/۷، در خرم‌آباد بین ۰/۱– تا ۲/۹ و در ارومیه بین ۲/۳– تا ۲/۸ محاسبه شده است و بطور کلی در حد قابل قبولی می‌باشند. در جدول ۶ نیز مقادیر متوسط ETo تخمینی با استفاده از روش پنمن- مانتیت و پیش‌بینی شده در کل دوره‌ی آماری نشان داده شده‌اند. مقدار خطای نسبی از ۰/۲- در ایستگاه کرمانشاه تا ۰/۳ در ایستگاه خرم آباد متفاوت می‌باشند.

جدول ۶- مقادیر متوسط ETo تخمینی با استفاده از روش فائو و پیش بینی شده در کل دوره‌ی آماری.

فراسنج	مشهد	شیراز	تبریز	کرمانشاه	خرم آباد	ارومیه
Est.	۱۲۰۷	۱۵۱۰	۱۳۰۳	۱۲۹۷	۱۲۶۱	۱۰۱۱
Pre.	۱۲۰۷	۱۵۰۷	۱۳۰۵	۱۲۹۴	۱۲۶۵	۱۰۱۲
RE*.	۰	-۰/۱	۰/۱	-۰/۲	۰/۳	۰/۰۹

* .Est: مقدار EToمحاسبه شده با استفاده از معادله‌ی پنمن- مانتیت، .Pre : مقدار ETo پیش بینی شده با استفاده از معادله‌ی رگرسیونی چند متغیره، RE : درصد خطای نسبی بین مقادیر محاسباتی و پیش بینی شده.

نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های رگرسیونی ارائه شده در ایستگاههای مختلف متفاوت بوده و معادله‌ی یک ایستگاه را نمی‌توان به سایر ایستگاهها بسط داد. این نتایج با دستاوردهای سایر محققین نیز همخوانی دارد. به عنوان مثال فولادمند (۱۳۸۹) برای استان فارس گزارش کرد که مدل سری زمانی مناسب برای پیش‌بینی ETo ماهانه در ایستگاههای مختلف یکسان نمی‌باشد. نتایج تحقیقات لی و همکاران (۲۰۱۰) در پیش‌بینی ETo سالانه نشان داد که مقادیر خطای نسبی با استفاده از معادله رگرسیونی بین ۶/۲- تا ۴/۳ (بجز یکی از ایستگاهها) و با استفاده از روش تشت تبخیر بین ۱۴/۷- تا ۲۱/۷ می‌باشد، که نشان از دقت بیشتر معادلات رگرسیونی نسبت به روش تشت تبخیر دارد. مقادیر خطای نسبی با استفاده از معادله‌ی رگرسیونی در مطالعه‌ی حاضر بین ۴/۱- تا ۲/۹ محاسبه شد که به طور کلی نتایج نشان می‌دهد مدل‌های رگرسیونی از دقت قابل قبولی برخوردار می‌باشند.

نتیجه‌گیری

استفاده از لایسیمتر به عنوان یک روش مستقیم و معتبر برای برآورد ETo مطرح است. با این حال در اکثر

Archive of SID

www.SID.ir

مطالعات به دلیل کمبود داده‌های لایسیمتری، استفاده از روابط ارائه شده توسط محققین مختلف، که معتبرترین آنها معادله‌ی پنمن- مانتیت است، رایج می‌باشد. در این تحقیق به دلیل نبود داده‌های لایسیمتری مناسب، دقت روش رگرسیون خطی چند متغیره در مقایسه با روش پنمن- مانتیت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که با استفاده از این روش می‌توان ETo را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. نتایج بررسی روند ETo، بارندگی و سایر فراسنجهای اقلیمی نیز نشان دادند که با توجه به تغییرات اقلیمی در اکثر ایستگاه‌ها دماهای بیشینه و کمینه و ETo افزایش و بارندگی و رطوبت نسبی کاهش یافته است. از بین فراسنجهای اقلیمی میانگین دما موثرترین فراسنج موثر بر ETo می‌باشد. از مزایای تحقیق حاضر نسبت به مطالعات قبلی می توان به بررسی روند تغییرات همزمان ETo و فراسنجهای اقلیمی موثر بر آن اشاره کرد.

منابع

۱- شیرغلامی، ه. و ب. قهرمان. ۱۳۸۴. بررسی روند تغییرات دمای متوسط سالانه در ایران. علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. ۹(۱): ۹-۲۵.

۲- علیزاده، ا.، ب. میرشاهی، م. هاشمی‌نیا، و ح. ثنائی‌نژاد. ۱۳۸۰. بررسی دقت و عملکرد تبخیر – تعرق پتانسیل محاسبه شده به روشهای هارگریوز – سامانی و تشتک تبخیر در ایستگاههای سینوپتیک استان خراسان. نیوار. ۴۲ و ۴۳: ۵۱-۷۰.

۳- فولادمند ح. ر. ۱۳۸۹. پیش‌بینی ماهانه تبخیر- تعرق پتانسیل گیاه مرجع در استان فارس. دانش آب و خاک. پذیرفته شده برای چاپ.

۴- گل‌کارحمزیی‌یزد، ح. ر.، ف. کاوه، ب. قهرمان و ح. صدقی. ۱۳۸۶. بررسی روند تغییرات سری زمانی تبخیر- تعرق ماهیانه گیاه مرجع با استفاده از روش پیشنهادی فائو- پنمن- مانتیس. علوم کشاورزی. ۱۳(ویژه‌نامه ۲): ۴۱۷-۴۳۳.

۵- موسوی‌بایگی، م.، م. عرفانیان و م. سرمد. ۱۳۸۸. استفاده از حداقل داده‌های هواشناسی برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع و ارائه ضرایب اصلاحی (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی). آب وخاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۳(۱): ۹۱-۹۹.

6- Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56, Rome, Italy, 300p.

7- Ghahraman, B. and S. Taghvaeian. 2008. Investigation of annual rainfall trends in Iran. J. Agric. Sci. Techno. 10: 93-97.

8- Hargreaves, G. H. and Z. A. Samani. 1982. Estimating Potential evapotranspiration. J. Irrig. Drain. Engin. 108(IR3): 223-230.

9- Li, Y., R. Horton, T. Ren, and C. Chen. 2010. Prediction of annual reference evapotranspiration using climatic data. Agric. Water Manage. 97: 300-308.

10- Pereira, A. R., N. A. V. Nova, A. S. Pereira, and V. Barbieri. 1995. A model for the class A pan coefficient. Agric. For. Meteoral. 76: 75-82.

11- Sumner, D. M. and J. M. Jacobs. 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. J. Hydrol. 308: 81-104.

Archive of SID

www.SID.ir