

## ارزیابی و واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع باتوجه به اثر دوره محاسباتی برای اقلیم نیمه خشک سرد

هوشنگ قمرنیا<sup>۱\*</sup>، سید وحیدالدین رضوانی<sup>۲</sup> و پرویز فتاحی<sup>۳</sup>

(E-mail: hghamarnia@razi.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۵/۰۹ - تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۹)

### چکیده

به منظور تعیین مقدار آب آبیاری در بخش تحقیقات کشاورزی، لازم است مقدار نیاز آبی گیاه یا تبخیر و تعرق گیاه مرجع ( $ET_0$ ) محاسبه شود و در این رابطه معادلات زیادی برای برآورد آن ارائه شده است. از طرف دیگر، در بسیاری از طرح‌های آبیاری و زهکشی از میانگین داده‌های هواشناسی ۱۰ روزه و ماهیانه استفاده می‌شود که این امر بر میزان دقت تبخیر و تعرق محاسباتی در مقیاس ۱۰ روزه و ماهانه تأثیر می‌گذارد. در این پژوهش، اثر دوره‌های محاسباتی روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه بر دقت برآورد تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از مدل‌های پنمن مانیتث فائو، تابش فائو، پنمن اصلاح شده، هارگریوز، مک‌کینگ و پرستلی تیلور در شهرستان سنندج با اقلیم سرد نیمه خشک مورد بررسی قرار گرفت. سپس با انتخاب مدل با دقت بالاتر، اقدام به واسنجی آن گردید. برای ارزیابی دقت مدل‌های فوق، از داده‌های لایسیمیتری اندازه‌گیری شده در ایستگاه تحقیقاتی سنندج استفاده شد. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد مدل پنمن اصلاح شده در تمامی دوره‌های محاسباتی، مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع را با دقت بالاتری پیش‌بینی می‌کند و واسنجی این معادله نیز تأثیری بر افزایش دقت آن نداشت. همچنین، نتایج نشان داد که طول دوره محاسباتی، تأثیر معنی‌داری بر دقت پیش‌بینی مدل‌های تبخیر و تعرق ایجاد نمی‌کند.

**کلمات کلیدی:** پنمن اصلاح شده، تبخیر و تعرق، دوره محاسباتی، واسنجی، هارگریوز

۱ - دانشیار، گروه مهندسی آب، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه رازی کرمانشاه، کرمانشاه - ایران (نویسنده مسئول مکاتبات \*)

۲ - دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج - ایران

۳ - استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه کردستان، سنندج - ایران

### مقدمه

تخمین دقیق مقدار تبخیر و تعرق، اولین و مهمترین قدم در طراحی، مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های آبیاری و سایر سیستم‌های توزیع و کاربرد آب، محاسبه تلفات تبخیری از سطح دریاچه‌ها و سایر منابع آب‌های سطحی، اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی و آگروهیدرولوژیکی، مطالعات بیلان آبی و زیست‌محیطی، مدیریت منابع آب و غیره می‌باشد (۱۲). از سوی دیگر، واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق مرجع امری ضروری و حیاتی به شمار می‌آید، زیرا اکثر مدل‌های ارائه شده برای مناطق معتدل و مرطوب واسنجی و صحت‌سنجی شده‌اند (۹ و ۱۷). روش‌هایی که برای برآورد تبخیر و تعرق به‌کار گرفته می‌شود به دو گروه اصلی روش‌های مستقیم و غیرمستقیم یا محاسباتی تقسیم‌بندی می‌شوند (۳). در روش‌های مستقیم با محصور کردن محدوده توسعه ریشه گیاه و کنترل فرآیندهایی که اندازه‌گیری آن‌ها ساده نمی‌باشد، می‌توان اجزای متفاوت رابطه آب و خاک را با دقت بیشتر اندازه‌گیری کرد (۹). ساده‌ترین وسیله برای تعیین تبخیر و تعرق در مقیاس کوچک لایسیمتر (Lysimeter) است. لایسیمتر یک مخزن با ابعاد مشخص است که در داخل خاک تعبیه شده و مقادیر آب ورودی و خروجی از آن اندازه‌گیری می‌گردد (۳). در روش‌های غیرمستقیم یا محاسبه‌ای، از عوامل مختلف اقلیمی و گیاهی مؤثر بر نیاز آبی استفاده شده و به منظور تعیین و یا تخمین تبخیر و تعرق گیاه، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع محاسبه و سپس با تعیین ضریب گیاهی در مراحل مختلف رشد، مقدار تبخیر و تعرق گیاه موردنظر محاسبه می‌شود (۳، ۹ و ۱۴). تبخیر و تعرق یک سطح، بدون کمبود آب و عدم وجود بیماری‌های گیاهی، تبخیر تعرق گیاه (سطح) مرجع یا تبخیر و تعرق مرجع ( $ET_0$ ) نامیده می‌شود. سطح مرجع عبارت است از گیاه مرجع چمن فرضی با ارتفاع ۱۰ تا ۱۲ سانتی‌متر، مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر که دارای ضریب بازتابش (آلبیدو) ۰/۲۳ است. در این شرایط کمبود آب در خاک نیز نباید وجود داشته باشد. برای گیاه مرجع یونجه نیز تعریف مشابهی ذکر شده که در آن ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود (۳، ۴، ۹ و ۱۶). تبخیر و تعرق گیاه مرجع، بازتاب تأثیر شرایط اقلیمی است. روش‌های متعددی برای تخمین  $ET_0$  پیشنهاد شد که هر یک کم و بیش

دارای محدودیت‌هایی بوده و در شرایط خاص قابل توصیه‌اند. کلیه این روش‌ها ترکیبی از مفاهیم نظری و نتایج تجربی هستند. روش پنمن - مانتیت فائو به عنوان یک روش مبنا توصیه شده است، اما این روش به پارامترهای زیادی نیاز دارد. با توجه به این‌که در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی همه پارامترهای موردنیاز این روش، اندازه‌گیری نمی‌شود، باید به دنبال روش ساده‌تری بود که بتواند تبخیر و تعرق مرجع را با دقتی بالا برآورد کند و به پارامترهای ورودی کمتری نیاز داشته باشد. تحقیقات زیادی در رابطه با واسنجی معادلات مختلف صورت گرفته که در بعضی از آنها نتایج به‌دست آمده با داده‌های لایسیمتری مقایسه شده است. در سایر موارد معادله پنمن - مانتیت توصیه شده به وسیله سازمان خواروبار جهانی، به عنوان روش مبنا در تخمین تبخیر و تعرق مرجع در نظر گرفته شده است (۸، ۱۱، ۱۲، ۱۵ و ۱۶). در تحقیقی در منطقه کرمان، روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که روش‌های بلانی کریدل (پروت)، ترنت وایت، پنمن فائو و تابش با داده‌های لایسیمتری انطباق بیشتری دارند (۶). در پژوهشی مشابه در منطقه همدان نیز روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و نتایج حاصل از مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق با داده‌های لایسیمتری مقایسه شد. نتایج این تحقیق نشان داد که روش بلانی کریدل از دقت بالاتری برخوردار است (۲). در منطقه اراک نیز فرمول‌های تجربی محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع چمن با نتایج حاصل از لایسیمتر مورد بررسی قرار گرفت و ارزیابی‌ها نشان داد که روش تشعشع بهترین روش محاسبه تبخیر و تعرق در این منطقه است (۷). در پژوهش دیگری، معادله هارگریوز به منظور محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس روزانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در این تحقیق، معادله هارگریوز با مبنا قرار دادن معادله پنمن - مانتیت واسنجی شد و نتایج نشان داد که فرآیند واسنجی اثر مطلوبی بر کارایی روش هارگریوز می‌گذارد (۱۳). در منطقه فارس معادله هارگریوز با توجه به معادله پنمن - مانتیت مورد واسنجی قرار گرفت و ضرایب اصلاحی این معادله برای این منطقه محاسبه گردید (۱۱). در تحقیقی در منطقه فارس تبخیر و تعرق به‌دست آمده با روش

حدود ۷۰ هزار هکتار است که از این مقدار، ۴۹ هزار هکتار اراضی دیم، ۱۲ هزار هکتار آبی و نه هزار هکتار باغات را تشکیل می‌دهند. در این شهرستان، محصولات نظیر گندم، جو، یونجه، سبزی و صیفی‌کاری، حبوبات و دانه‌های روغنی به صورت دیم یا آبی کشت می‌گردد. از آنجاکه برنامه‌ریزی آبیاری بر مبنای مقدار تبخیر و تعرق مرجع و رطوبت موجود در منطقه توسعه ریشه صورت می‌گیرد، لذا برآورد دقیق مقدار تبخیر و تعرق مرجع گامی اساسی در انجام برنامه‌ریزی بهینه آبیاری در مزارع کشاورزی و باغات شهرستان سنندج می‌باشد. شکل (۱) موقعیت استان کردستان و شهرستان سنندج را نشان می‌دهد. به منظور انجام محاسبات از داده‌های لایسیمیتری اندازه‌گیری شده گیاه مرجع چمن، در ایستگاه تحقیقات کشاورزی شهرستان سنندج و آمار هواشناسی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سنندج در سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۶ بهره گرفته شد. سنجش‌های لایسیمیتری در دو مقیاس ۱۰ روزه و ماهیانه صورت گرفته است. داده‌های هواشناسی مورد استفاده در این تحقیق عبارتند از: دمای ماکزیم ( $T_{max}$ )، دمای مینیم ( $T_{min}$ )، رطوبت نسبی (RH)، سرعت باد (U)، ساعات آفتابی (n). به منظور محاسبه سرعت باد در ارتفاع دو متر سطح زمین از معادله (۱) استفاده شده است (۹ و ۱۰):

$$U_2 = \frac{4.87 \cdot U_{10}}{\ln(67.8 \cdot 10 - 5.42)} \quad (1)$$

در این رابطه،  $U_2$  میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه) و  $U_{10}$  میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری (متر بر ثانیه) می‌باشد. میزان تابش خورشیدی با استفاده از فرمول آنگستروم (معادله ۲) محاسبه شد (۹ و ۱۰):

$$R_s = \left( 0.25 + 0.5 \frac{n}{N} \right) \cdot R_a \quad (2)$$

در این رابطه،  $R_s$  تابش خورشیدی رسیده به زمین ( $MJm^{-2}day^{-1}$ )، N حداکثر ساعات آفتابی ممکن (ساعت)، n تعداد ساعات آفتابی واقعی (ساعت) و  $R_a$  تابش‌های ماوراءزمینی ( $MJm^{-2}day^{-1}$ ) می‌باشد.

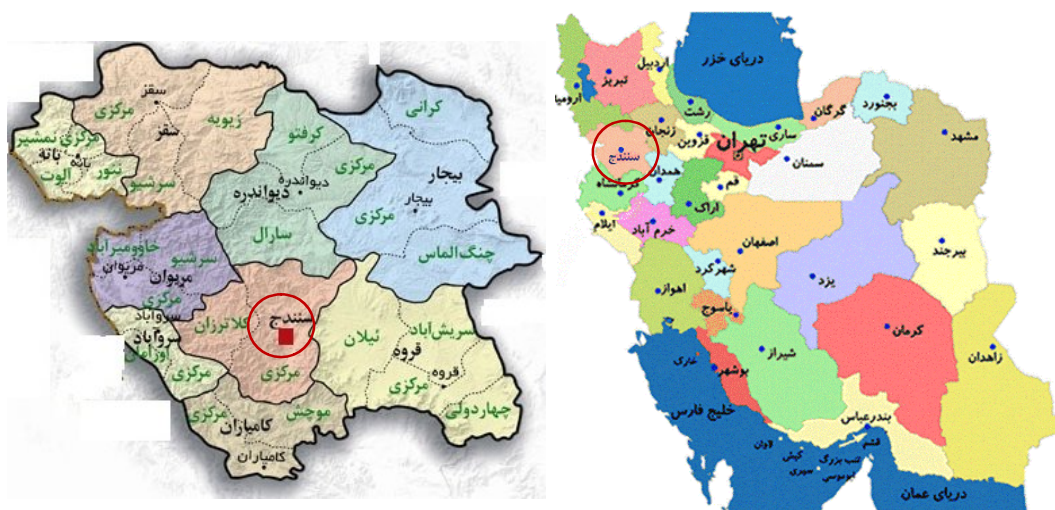
بلانی - کریدل باتوجه به روش پنمن - مانیتث، واسنجی شد و ضرایب معادله بلانی کریدل محاسبه گردید (۸). در پژوهشی در شمال اسپانیا، معادلات مختلف تبخیر و تعرق مرجع باتوجه به روش پنمن - مانیتث مورد واسنجی قرار گرفت. نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که روش هارگریوز - سامانی با داشتن  $32/2$  درصد و روش مک‌کینک با داشتن  $7/9$  درصد بیش برآورد، به ترتیب ضعیف‌ترین و بهترین عملکرد را دارند (۱۲). در تحقیقی در منطقه بالکان نیز معادلات تبخیر و تعرق مرجع تحت شرایط آب و هوایی مرطوب مورد ارزیابی قرار گرفت و نسبت به روش پنمن - مانیتث واسنجی شد. نتایج حاصل نشان داد که روش تورک بهترین نتیجه را در این منطقه به دست می‌دهد (۱۶). در پژوهشی مشابه در ایالت اونتاریو در کانادا، روش‌های مختلف را مورد بررسی قرار گرفت که نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد باتوجه به میزان اطلاعات هواشناسی موجود، روش‌های پریستلی - تیلور و هارگریوز می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش پنمن - مانیتث باشند (۱۵).

بررسی منابع و مقالات در دسترس نشان داد که تاکنون در زمینه بررسی اثر دوره محاسباتی بر دقت تخمین تبخیر و تعرق مرجع هیچ‌گونه تحقیقی انجام نشده است. لذا، اهداف این تحقیق عبارتند از: الف) بررسی اثر دوره‌های محاسباتی روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه بر دقت تخمین تبخیر و تعرق مرجع، ب) مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با سنجش‌های لایسیمیتری و تعیین بهترین معادله و ج) واسنجی بهترین معادله برآورد تبخیر و تعرق مرجع برای اقلیم‌های نیمه خشک سرد شهرستان سنندج با استفاده از داده‌های لایسیمیتری.

## مواد و روش‌ها

### موقعیت منطقه مورد مطالعه

شهرستان سنندج یکی از شهرستان‌های استان کردستان، از نظر جغرافیایی، در طول جغرافیایی  $47^\circ$  شرقی و عرض جغرافیایی  $35^\circ$  و  $15'$  شمالی و ارتفاع  $1500$  متر از سطح دریا قرار دارد و جزء مناطق نسبتاً سرد و نیمه خشک طبقه‌بندی می‌شود. مساحت اراضی تحت کشت در این شهرستان در



شکل ۱ - موقعیت شهرستان سنندج در کشور و استان کردستان

ضریب مربوط به سرعت باد،  $e_s$  فشار بخار اشباع در دمای روزانه (میلی بار) و  $e_a$  فشار بخار واقعی بخار هوا در دمای روزانه (میلی بار) می باشد.

ضریب اصلاحی  $C$  به عواملی نظیر سرعت باد در روز، نسبت سرعت باد در روز و شب، رطوبت نسبی و تشعشع خورشیدی معادل آب تبخیر پذیر بستگی دارد (۱).

روش هارگریوز فقط به داده های ماکزیمم و مینیمم دما احتیاج دارد. این روش را می توان در دوره های ۲۴ ساعته، هفتگی، ۱۰ روزه یا ماهیانه به کار برد. فرم کلی این مدل به صورت معادله (۴) می باشد (۹ و ۱۳):

$$ET_0 = 0.0023 \cdot R_a \left( \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} + 17.8 \right) \sqrt{(T_{\max} - T_{\min})} \quad (4)$$

در این رابطه،  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر در روز) و  $T_{\max}$  و  $T_{\min}$  به ترتیب دمای ماکزیمم و مینیمم (درجه سانتی گراد) است.  $R_a$  نیز تابش های ماوراءزمینی (میلی متر در روز) است (۹ و ۱۳).

روش تابش فائو نیز به صورت معادله (۵) بیان می شود. در این رابطه،  $C$  فاکتوری است که به رطوبت و سرعت باد بستگی دارد و  $W$  فاکتور وزنی اثر درجه حرارت در ارتباط با

#### معادلات تبخیر و تعرق

پنمن در سال ۱۳۴۸ رابطه تبخیر و تعرق را به طور عمده براساس بیلان انرژی بنیان گذاشت و عوامل آئرو دینامیکی، باد و رطوبت هوا را نیز در آن دخالت داد. روش پنمن یکی از کامل ترین روش های اندازه گیری تبخیر و تعرق مرجع طی نیم قرن اخیر به حساب می آید. در طی این مدت، فرمول پنمن به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته و هم زمان با آن اساتید فن در جهت تکامل آن کوشیده اند و اصلاحاتی را در آن انجام داده اند که از جمله روشی تحت عنوان فرمول پنمن اصلاح شده در نشریه فائو ۲۴ آمده است. اصلاحات پیشنهادی در روش فائو ۲۴، بیشتر مربوط به ضریب تعدیل  $C$ ، در رابطه با متوسط روزانه داده های اقلیمی و یک ضریب اصلاحی در رابطه با سرعت باد روزانه است. فرمول پنمن اصلاح شده فائو ۲۴ به صورت معادله (۳) می باشد (۱):

$$ET_0 = C [W \cdot R_n + (1 - W) : f(u) \cdot (e_s - e_a)] \quad (3)$$

در این رابطه،  $ET_0$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع (میلی متر در روز)،  $W$  فاکتور وزنی مربوط به تأثیر تشعشع روی  $ET_0$  در درجه حرارت ها و ارتفاعات مختلف،  $R_n$  تشعشع خالص خورشیدی معادل آب تبخیر پذیر (میلی متر در روز)،  $f(u)$

گرفت. در ابتدا با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه میزان تبخیر و تعرق مرجع در مقیاس روزانه محاسبه و سپس با در نظر گرفتن مجموع آنها مقدار تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه محاسبه گردید. در ادامه، به منظور محاسبه تبخیر و تعرق ۱۰ روزه از داده‌های هواشناسی روزانه به صورت ۱۰ روزه میانگین‌گیری و از روی داده‌های هواشناسی مربوط به هر دهه، میزان تبخیر و تعرق مرجع ۱۰ روزه محاسبه گردید. برای تبخیر و تعرق ماهانه نیز به صورت مشابه عمل شد. در شکل (۲) روند انجام این محاسبات نشان داده شده است.

در ادامه این تحقیق، روشی که مقدار تبخیر و تعرق مرجع را با بالاترین دقت پیش‌بینی می‌نماید به عنوان روش مبنا در منطقه مورد مطالعه انتخاب و واسنجی گردید. به منظور واسنجی روش مبنا، از داده‌های لایسیمیتری اندازه‌گیری شده در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۵ و همچنین به منظور ارزیابی معادله واسنجی شده از داده‌های لایسیمیتری سال ۱۳۷۶ استفاده گردید.

#### شاخص‌های آماری

در این تحقیق، برای مقایسه کمی نتایج حاصله از مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق، از شاخص‌های آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، راندامان یا کارایی مدل (EF)، میانگین درصد خطا (MAPE) و ضریب تعیین ( $R^2$ ) استفاده گردید. بیان ریاضی شاخص‌های آماری فوق‌الذکر به صورت معادله‌های (۹) تا (۱۲) می‌باشد (۵ و ۱۶). مقدار RMSE نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها تا چه حد اندازه‌گیری‌ها را بیشتر یا کمتر تخمین زده‌اند. مقدار EF نیز مقادیر پیش‌بینی شده را با مقادیر میانگین اندازه‌گیری شده مقایسه می‌کند. مقادیر مثبت این شاخص نشان می‌دهد که مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به میانگین مشاهدات، برتری دارد. اگر میزان این شاخص صفر باشد، نشان‌دهنده این است که از مقادیر میانگین مشاهدات می‌توان به جای مقادیر پیش‌بینی شده استفاده نمود و مقادیر منفی نشان‌دهنده عدم کارایی مدل‌های مورد استفاده در پیش‌بینی تبخیر و تعرق مرجع است.  $R^2$  نشان‌دهنده بخشی از تغییرات کل می‌باشد که به وسیله رابطه خطی بین دو متغیر توجیه می‌شود. در شرایطی که مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده با هم برابر باشند (بهترین حالت)، مقدار این

ارتفاع است.  $R_s$  نیز تابش خورشیدی ( $\text{MJm}^{-2}\text{.day}^{-1}$ ) است (۱۰).

$$ET_0 = C (W.R_s) \quad (5)$$

روش‌های مک‌کینک و پریستلی-تیلور بر مبنای تابش و دما استوار می‌باشند که به ترتیب در هلند و استرالیا بسط داده شده‌اند. فرم کلی این دو معادله به ترتیب به صورت معادله‌های (۶) و (۷) می‌باشد (۱۰):

$$ET_0 = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{2.45} - 0.12 \quad (6)$$

$$ET_0 = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\gamma} \quad (7)$$

در این رابطه‌ها،  $G$  شار گرما به داخل خاک ( $\text{MJm}^{-2}\text{.day}^{-1}$ )،  $R_n$  و  $R_s$  به ترتیب تابش خورشیدی و تشعشع خالص خورشیدی ( $\text{MJm}^{-2}\text{.day}^{-1}$ )،  $\gamma$  ضریب ثابت رطوبتی و  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ ) است (۱۰).

معادله پنمن - مانتیث براساس توازن انرژی روی یک سطح مرطوب پوشیده از گیاه ارایه گردیده است. این معادله به عنوان معتبرترین روش برآورد نیاز آبی گیاهان توسط کارشناسان فائو معرفی شده است. فرم کلی این معادله به صورت معادله (۸) است (۴، ۹ و ۱۰):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta R_n + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (8)$$

در این رابطه،  $ET_0$  تبخیر و تعرق مرجع ( $\text{mm}\text{.day}^{-1}$ )،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ )،  $R_n$  تابش خالص ( $\text{MJm}^{-2}\text{.day}^{-1}$ )،  $G$  شار گرمایی خاک ( $\text{MJm}^{-2}\text{.day}^{-1}$ )،  $\gamma$  ضریب ثابت رطوبتی ( $\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$ )،  $T$  میانگین دمای هوا ( $^\circ\text{C}$ )،  $U_2$  میانگین ۲۴ ساعته سرعت باد در ارتفاع دو متری ( $\text{ms}^{-1}$ ) و  $e_s - e_a$  کمبود فشار بخار (kPa) می‌باشد.

در این تحقیق، روش‌های پنمن - مانتیث فائو ۵۶، تابش فائو، پنمن اصلاح شده، هارگریوز، مک‌کینک و پریستلی-تیلور باتوجه به داده‌های لایسیمیتری (لایسیمتر زهکش‌دار) در دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه مورد مقایسه و بررسی قرار

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i^c - X_i^m}{X_i^m} \right|}{n} \quad (11)$$

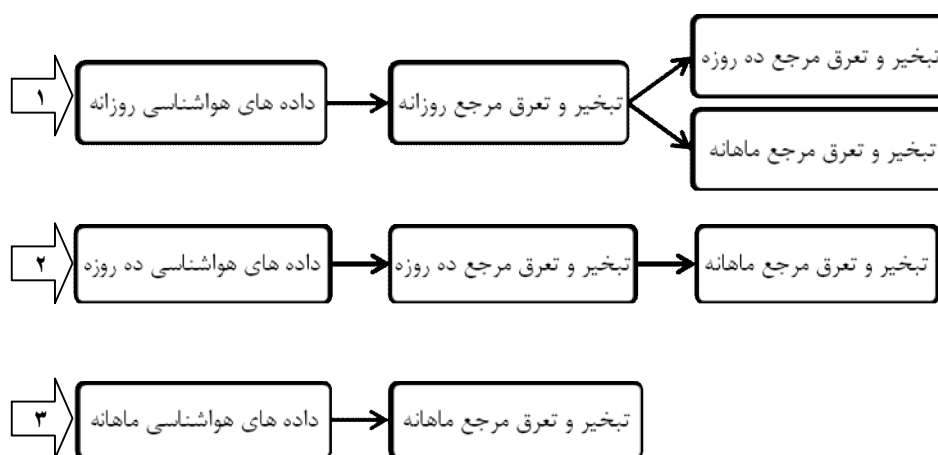
$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (X_i^c - \bar{X}^m)(X_i^c - \bar{X}^m) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^c - \bar{X}^m)^2 \sum_{i=1}^n (X_i^m - \bar{X}^m)^2} \quad (12)$$

در این رابطه،  $X_i^c$  و  $X_i^m$  به ترتیب مقدار پیش‌بینی و اندازه‌گیری شده پارامتر مورد نظر و  $\bar{X}$  میانگین پارامتر پیش‌بینی یا اندازه‌گیری شده و  $n$  تعداد داده‌ها می‌باشد.

شاخص‌ها به صورت:  $RMSE = 0$ ،  $EF = 1$ ،  $MAPE = 0$  و  $R^2 = 1$  خواهد بود (۵).

$$RMSE = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^c - X_i^m)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i^m - \bar{X})^2 - \sum_{i=1}^n (X_i^c - X_i^m)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i^m - \bar{X})^2} \quad (10)$$



شکل ۲ - روند انجام محاسبات

## نتایج و بحث

### الف - مقایسه کیفی

۱۰ روزه و ماهانه و دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه، به ترتیب در جدول‌های (۱) و (۲) نمایش داده شده است. نتایج مندرج در جدول (۱) نشان می‌دهد که برای مقیاس زمانی ۱۰ روزه، تفاوت معنی‌داری مابین دقت پیش‌بینی مدل‌ها به ازای دوره‌های محاسباتی روزانه و ۱۰ روزه وجود ندارد (اختلاف کمتر از پنج درصد). از طرف دیگر، نتایج نشان می‌دهد که روش پنمن اصلاح شده، تبخیر و تعرق مرجع را با دقت بیشتری برآورد می‌کند ( $R^2 = 0.7683 - 0.7613$ ). همچنین، به منظور دست یافتن به دقت بالاتر باید از میانگین داده‌های هواشناسی ۱۰ روزه استفاده نمود. باتوجه به این موضوع که روش پنمن اصلاح شده و پنمن - مانتیت روش‌هایی ترکیبی هستند و به داده‌های هواشناسی

برای این منظور، با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده به وسیله لایسیمتر زهکش‌دار، نتایج به‌دست آمده از روش‌های پنمن - مانتیت فائو ۵۶، تابش فائو، پنمن اصلاح شده، هارگریوز، مک‌کینک و پرستلی تیلور، مقایسه گردید. در شکل (۳) مقادیر تبخیر و تعرق مرجع پیش‌بینی شده به‌وسیله مدل‌های فوق‌الذکر در مقابل داده‌های اندازه‌گیری شده نشان داده شده است.

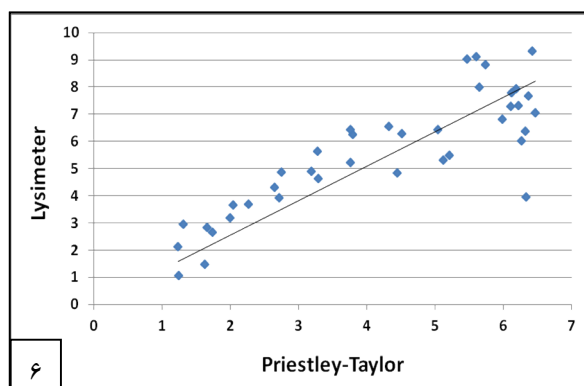
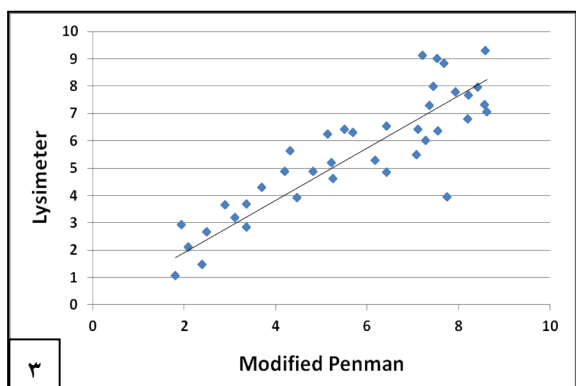
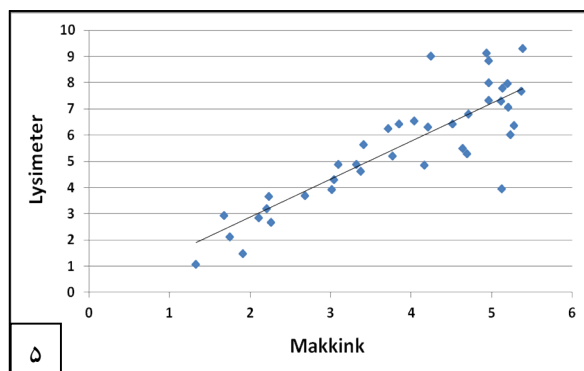
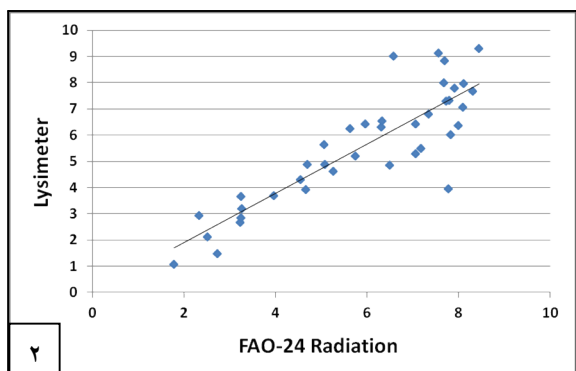
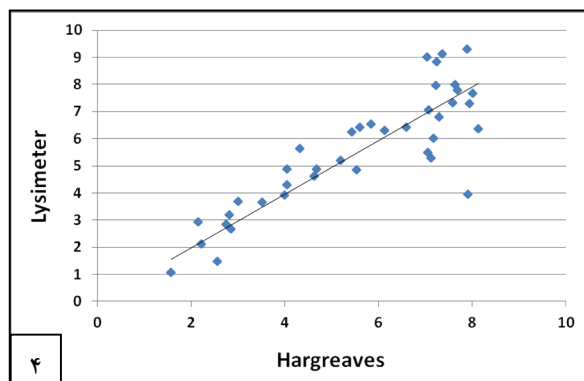
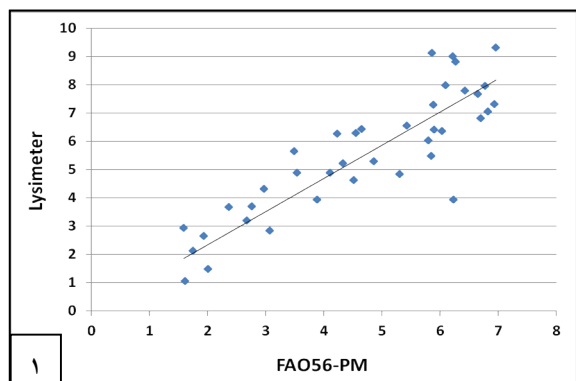
### ب - مقایسه کمی

در پژوهش حاضر، از شاخص‌های آماری به منظور مقایسه کمی نتایج حاصل از مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق مرجع استفاده گردید. مقادیر شاخص‌های آماری برای هر یک از روش‌ها در مقیاس‌های زمانی روزانه،

تبخیر و تعرق مرجع دارد ( $R^2 = ۰/۶۶۳۶ - ۰/۵۹۰۷$ ) (جدول ۱).

نتایج نشان می‌دهد که تفاوت معنی‌داری مابین دقت پیش‌بینی مدل‌ها به ازای دوره‌های محاسباتی روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه وجود ندارد (اختلاف کمتر از پنج درصد) (جدول ۲).

زیادی احتیاج دارند، روش هارگریوز که مبنایی دمایی دارد، با داشتن  $R^2 = ۰/۷۴۰۸ - ۰/۷۳۸۸$ ،  $MAPE$  و  $RMSE$  کمتر نسبت به سایر روش‌ها، می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش پنمن اصلاح شده در دوره‌های ۱۰ روزه باشد. همچنین، روش پریستلی - تیلور، کمترین دقت را در برآورد



شکل ۳ - مقادیر تبخیر و تعرق اندازه‌گیری و پیش‌بینی شده (میلی‌متر در روز) با روش‌های: ۱ - پنمن - مانتیث فانو، ۲ - تابش فانو، ۳ - پنمن اصلاح شده، ۴ - هارگریوز، ۵ - مک‌کینک و ۶ - پریستلی تیلور در مقیاس ۱۰ روزه

جدول ۱ - مقدار شاخص‌های آماری حاصله از مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق مرجع از مدل‌های مختلف در دوره‌های ۱۰ روزه

روش محاسبه	دوره آماری	R <sup>2</sup>	EF	MAPE	RMSE
FAO56-PM	روزانه	۰/۷۵۱۳	۰/۵۵۷۵	۰/۲۱۹	۱/۴۲۱
	۱۰ روزه	۰/۷۵۲۷	۰/۵۹۱۲	۰/۲۰۹	۱/۳۶۶
FAO24-Radiation	روزانه	۰/۷۵۰۲	۰/۷۳۹۳	۰/۱۸۰۲	۱/۰۹۱
	۱۰ روزه	۰/۷۵۷۱	۰/۷۲۸۰	۰/۱۸۰۵۵	۱/۱۱۴
Modified Penman	روزانه	۰/۷۶۱۳	۰/۷۴۲۳	۰/۱۸۱۷	۱/۰۸۵
	۱۰ روزه	۰/۷۶۸۳	۰/۷۴۲۷	۰/۱۸۱۲	۱/۰۱۵
Hargreaves	روزانه	۰/۷۴۰۸	۰/۷۴۰۶	۰/۱۶۱۳	۱/۰۸۸
	۱۰ روزه	۰/۷۳۸۸	۰/۷۳۷۶	۰/۱۶۲۹	۱/۰۹۴
Makkink	روزانه	۰/۷۴۶۶	۰/۰۳۴۴	۰/۳۰۶۱	۲/۱
	۱۰ روزه	۰/۷۴۰۸	۰/۰۳۷۳	۰/۳۰۴۴	۲/۰۹۷
Priestley-Taylor	روزانه	۰/۵۹۰۷	۰/۳۲۳۹	۰/۲۸۱۸	۱/۷۵۷
	۱۰ روزه	۰/۶۶۳۶	۰/۳۲۶۴	۰/۲۸۰۶	۱/۷۵۴

جدول ۲ - مقدار شاخص‌های آماری حاصله از مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق مرجع از مدل‌های مختلف در دوره ماهانه

روش محاسبه	دوره آماری	R <sup>2</sup>	EF	MAPE	RMSE
FAO56-PM	روزانه	۰/۹۳۹۳	۰/۸۰۰	۰/۱۸	۰/۹۴
	۱۰ روزه	۰/۹۳۹۴	۰/۸۰۲	۰/۱۷	۰/۹۴
FAO24-Radiation	ماهانه	۰/۹۲۹۹	۰/۸۱۱	۰/۱۸	۰/۹۲
	روزانه	۰/۹۳۴۴	۰/۸۸۵	۰/۱۵	۰/۷۱
Modified Penman	۱۰ روزه	۰/۹۳۴۵	۰/۸۸۴	۰/۱۵	۰/۷۲
	ماهانه	۰/۹۲۶۷	۰/۸۸۰	۰/۱۶	۰/۷۳
Hargreaves	روزانه	۰/۹۳۷۹	۰/۹۱۰	۰/۱۳	۰/۶۳
	۱۰ روزه	۰/۹۳۸۲	۰/۹۰۹	۰/۱۳	۰/۶۳
Makkink	ماهانه	۰/۹۳۸۹	۰/۹۱۰	۰/۱۴	۰/۶۳
	روزانه	۰/۹۳۰۷	۰/۹۲۷	۰/۱۲	۰/۵۷
Priestley-Taylor	۱۰ روزه	۰/۹۳۱۱	۰/۹۲۷	۰/۱۲	۰/۵۷
	ماهانه	۰/۹۲۷۳	۰/۹۲۴	۰/۱۳	۰/۵۸
Makkink	روزانه	۰/۹۱۵۵	۰/۳۲۴	۰/۲۸	۱/۷۳
	۱۰ روزه	۰/۹۱۵۵	۰/۳۲۷	۰/۲۸	۱/۷۳
Priestley-Taylor	ماهانه	۰/۹۰۶۵	۰/۳۰۳	۰/۲۹	۱/۷۶
	روزانه	۰/۸۶۹۱	۰/۶۰۹	۰/۲۵	۱/۳۲
Priestley-Taylor	۱۰ روزه	۰/۸۷	۰/۶۱۴	۰/۲۵	۱/۳۱
	ماهانه	۰/۹۱۱۸	۰/۶۲۷	۰/۲۴	۱/۲۹

برای این سه روش، به یکدیگر بسیار نزدیک است. بنابراین، با توجه به مقدار بیشتر EF و مقدار کمتر MAPE و RMSE برای روش‌های پنمن اصلاح شده و هارگریوز نسبت به پنمن - مانتیث، می‌توان این دو روش را به عنوان بهترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق مرجع در دوره‌های ماهانه انتخاب نمود. از سوی دیگر، به منظور دستیابی به دقت

از طرف دیگر، با توجه به شاخص ضریب تعیین، روش پنمن - مانتیث، پنمن اصلاح شده و هارگریوز، تبخیر و تعرق مرجع را نسبت به سایر روش‌ها با دقت بالاتری برآورد می‌نمایند ( $R^2_{\text{Modified Penman}} = 0/9379 - 0/9382 - 0/9389$ ،  $R^2_{\text{Hargreaves}} = 0/9307 - 0/9311 - 0/9273$  -  $0/9299$ ،  $R^2_{\text{FAO56-PM}} = 0/9299 - 0/9394$ ). شاخص ضریب تعیین



بدین منظور، کل داده‌ها به دو دسته داده‌های صحت‌سنجی (سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۵) و ارزیابی (۱۳۷۶) تقسیم شد.

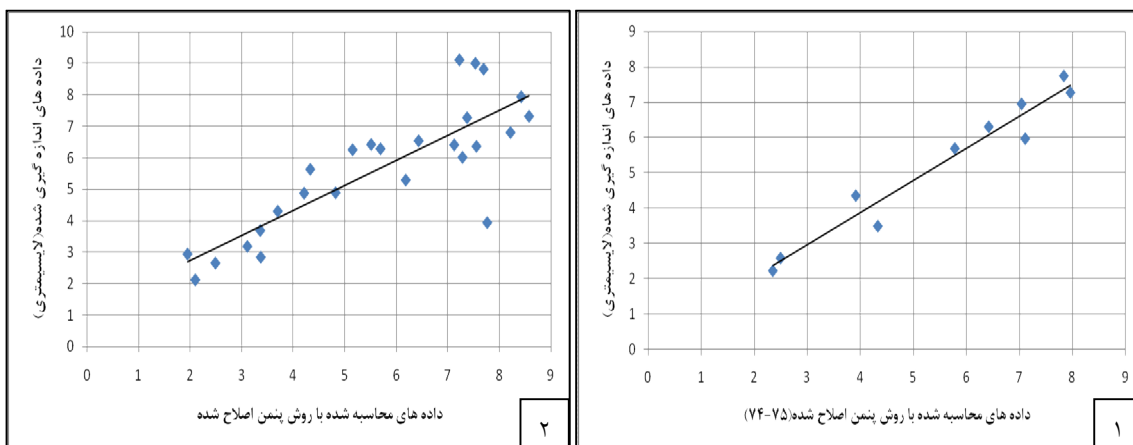
با استفاده از داده‌های ۱۰ روزه و ماهانه لایسمتری در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۵ معادله پنمن اصلاح شده فائو و هارگریوز مورد واسنجی قرار گرفتند. جدول (۳) معادلات حاصل از واسنجی هر دو روش و شکل‌های (۴) و (۵) همبستگی بین داده‌های حاصل از این روش‌ها را با داده‌های لایسمتری نشان می‌دهد.

به منظور ارزیابی معادله‌های واسنجی شده از داده‌های لایسمتری سال ۱۳۷۶ بهره گرفته شده است. جدول‌های (۴) و (۵) به ترتیب مقادیر شاخص‌های آماری روش‌های مختلف در دوره آماری ۱۰ روزه و ماهانه را نشان می‌دهد.

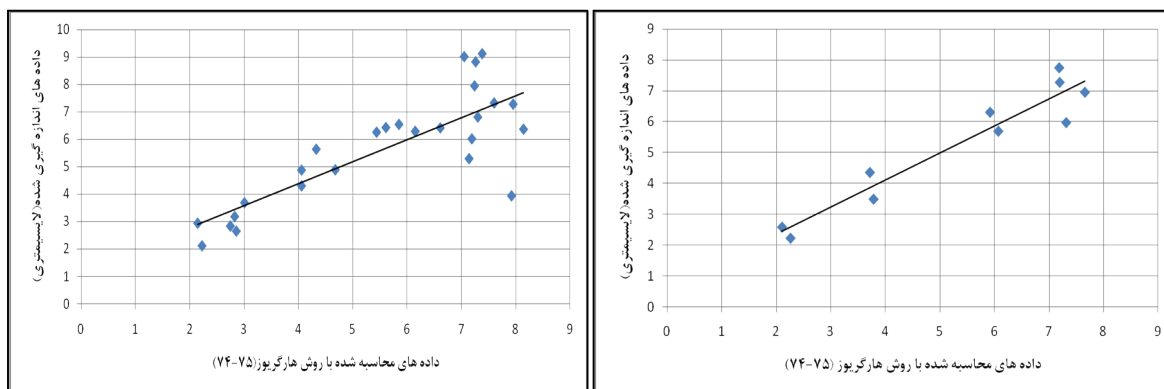
بالتر در روش پنمن اصلاح شده، می‌توان از میانگین داده‌های هواشناسی ماهانه و در روش هارگریوز، از میانگین داده‌های هواشناسی ۱۰ روزه استفاده نمود.

### ج- واسنجی

در این تحقیق، روش پنمن اصلاح شده فائو و هارگریوز در دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه به عنوان بهترین روش‌ها انتخاب شدند. باتوجه به تعداد پارامترهای زیاد پنمن اصلاح شده، فائو نسبت به سایر روش‌ها و عدم وجود داده‌های هواشناسی کافی در بسیاری از مناطق کشور، روش هارگریوز نیز به عنوان روش جایگزین برای روش پنمن اصلاح شده در دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه پیشنهاد و هر دو روش با استفاده از داده‌های لایسمتری چمن، در سنندج واسنجی گردید.



شکل ۲- همبستگی مابین داده‌های حاصل از روش پنمن اصلاح شده با داده‌های لایسمتری در دوره آماری: ۱- ماهانه و ۲- ۱۰ روزه



شکل ۳- همبستگی مابین داده‌های حاصل از روش هارگریوز با داده‌های لایسمتری در دوره آماری: ۱- ماهانه و ۲- ۱۰ روزه

جدول ۳ - معادله حاصل از واسنجی و ضریب تعیین آن باتوجه به داده‌های لایسیمتری

روش	دوره آماری	معادله واسنجی شده	ضریب تعیین ( $R^2$ )
پنمن اصلاح شده	ماهانه	$Y = 0.913 X + 0.2227$	۰/۹۵
	۱۰ روزه	$Y = 0.794 X + 1.1532$	۰/۷۰
هارگریوز	ماهانه	$Y = 0.876 X + 0.6078$	۰/۹۲
	۱۰ روزه	$Y = 0.804 X + 1.1734$	۰/۶۵

جدول ۴ - مقادیر شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف در دوره آماری ۱۰ روزه

روش	RMSE ( $\text{mmd}^{-1}$ )	MAPE ( $\text{mmd}^{-1}$ )	EF	$R^2$
بهترین حالت	۰	۰	۱	۱
روش پنمن اصلاح شده	۰/۹۴۱	۰/۲۲۶	۰/۸۴۸	۰/۸۹
روش پنمن اصلاح شده - واسنجی شده	۱/۰۱۵	۰/۳۰۴	۰/۸۲۴	۰/۸۹
روش هارگریوز	۰/۷۲۲	۰/۱۵۴	۰/۹۱۱	۰/۹۳
روش هارگریوز - واسنجی شده	۰/۹۵۳	۰/۲۷۷	۰/۸۴۴	۰/۹۳

جدول ۵ - مقادیر شاخص‌های آماری مدل‌های مختلف در دوره آماری ماهانه

روش	RMSE ( $\text{mmd}^{-1}$ )	MAPE ( $\text{mmd}^{-1}$ )	EF	$R^2$
بهترین حالت	۰	۰	۱	۱
روش پنمن اصلاح شده	۰/۸۱۴	۰/۲۷۴	۰/۸۹۴	۰/۹۵
روش پنمن اصلاح شده - واسنجی شده	۰/۷۳۱	۰/۲۶۶	۰/۹۱۵	۰/۹۵
روش هارگریوز	۰/۴۹۱	۰/۱۷۳	۰/۹۶۲	۰/۹۸
روش هارگریوز - واسنجی شده	۰/۶۵۴	۰/۲۵۰	۰/۹۳۲	۰/۹۸

شده در دوره ماهانه، نتایج به دست آمده درمقایسه با سنجش‌های لایسیمتری، دقیق‌تر می‌شود (جدول ۵). کاهش میزان RMSE و MAPE به ترتیب از ۰/۲۷۴-۰/۸۱۴ به ۰/۷۳۱-۰/۲۶۶ و افزایش مقدار EF از ۰/۸۹۴ به ۰/۹۱۵ این موضوع را تأیید کرد. همچنین، واسنجی معادله هارگریوز برای دوره آماری ماهانه، باعث بهبود نتایج نمی‌شود.

در روش‌های پنمن اصلاح شده و هارگریوز، مقدار شاخص‌های آماری RMSE و MAPE بعد از واسنجی معادلات افزایش و EF کاهش یافته است (جدول ۴). بنابراین واسنجی معادلات پنمن اصلاح شده و هارگریوز برای دوره آماری ۱۰ روزه باعث بهبود نتایج به دست آمده نمی‌شود. باتوجه به داده‌های موجود، با واسنجی روش پنمن اصلاح

## نتیجه‌گیری

محاسبه تبخیر و تعرق مرجع روش پمن اصلاح شده توصیه می‌گردد و از طرف دیگر، توصیه می‌شود که برای بالا بردن دقت محاسبات از داده‌های ماهانه هواشناسی استفاده شود. در صورت استفاده از روش هارگریوز نیز پیشنهاد می‌شود که به منظور دقیق‌تر شدن نتایج از داده‌های ۱۰ روزه استفاده گردد. در این تحقیق، به منظور واسنجی مدل‌های منتخب، داده‌های لایسیمتری به دو دسته صحت‌سنجی و ارزیابی تقسیم شد. نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که در منطقه موردنظر، معادله هارگریوز در مقیاس ۱۰ روزه و ماهانه نیازی به واسنجی ندارد و واسنجی تأثیری بر افزایش دقت این معادله نمی‌گذارد و این روش بدون واسنجی نیز، نتایج خوبی را به دست می‌دهد. از سوی دیگر، واسنجی روش پمن اصلاح شده برای دوره ماهانه می‌تواند باعث دقیق‌تر شدن محاسبات گردد، درحالی‌که واسنجی این روش در دوره ۱۰ روزه توصیه نمی‌گردد.

هدف از انجام پژوهش حاضر، شناسایی بهترین روش برآورد تبخیر و تعرق مرجع و واسنجی آن در اقلیم نیمه خشک سرد (مطالعه موردی: شهرستان سنندج) است. نتایج حاصل از تحقیق حاضر نشان داد که روش پمن اصلاح شده و پرستیلی تیلور در دو مقیاس ۱۰ روزه و روزانه به ترتیب دارای بیشترین و کمترین دقت پیش‌بینی می‌باشند. در محاسبه تبخیر و تعرق مرجع ماهیانه نیز روش پمن اصلاح شده نتایج بهتری را به ترتیب با استفاده از داده‌های ماهانه، ۱۰ روزه و روزانه (ضرایب تعیین: ۰/۹۳۸۹، ۰/۹۳۸۲ و ۰/۹۳۷۹) به دست می‌دهد و روش پرستیلی تیلور نیز پایین‌ترین دقت را داراست. همچنین از روش هارگریوز نیز باتوجه به این‌که تعداد ورودی کمتری نسبت به پمن اصلاح شده دارد، می‌توان به عنوان یک روش جایگزین استفاده نمود. در مقیاس روزانه، ۱۰ روزه و ماهانه، طول دوره محاسباتی تأثیر معنی‌داری بر دقت پیش‌بینی‌های مدل منتخب ندارد. باتوجه به مطالب فوق جهت

## منابع مورد استفاده

۱. خیرابی ج.، دربندی ص.، انتصاری م ر.، سادات میرئی م. ح.، سلامت ع. و مقدسی ف (۱۳۸۱) بررسی و مقایسه تطبیقی روش پمن - مانیتث با روش‌های فائو ۲۴ در ایران. انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۱۹۰ ص.
۲. زارع ایبانه ح.، قاسمی ع. و احمدی م (۱۳۸۶) تعیین مناسب‌ترین روش برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع درمقایسه با روش‌های تجربی برای منطقه همدان. نهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان.
۳. علیزاده ا. و کمالی غ. ع (۱۳۸۶) نیاز آبی گیاهان در ایران. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد. ۲۲۸ ص.
۴. علیزاده ا (۱۳۸۵) طراحی سیستم‌های آبیاری سطحی. انتشارات دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد. ۴۵۲ ص.
۵. فتحی پ.، محمدی ی. و همایی م (۱۳۸۸) مدل‌سازی هوشمند سری زمانی آورد ماهانه ورودی به سد وحدت سنندج. آب و خاک. ۲۳(۱): ۲۲۰-۲۰۹.
۶. مجدزاده ب. و صمدی ح (۱۳۸۲) مقایسه تبخیر و تعرق گیاه مرجع محاسبه شده به وسیله فرمول‌های تجربی و با لایسیمتر در کرمان. هشتمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان.
۷. معروفی ص. و غفوری کسبی م (۱۳۸۸) بررسی و مقایسه فرمول‌های تجربی محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه گیاه مرجع چمن با نتایج حاصل از لایسیمتر. مجموعه مقالات همایش ملی بحران آب در کشاورزی و منابع طبیعی. شهری.
8. Ahmadi SH and Fooladmand HR (2008) Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. Irrigation Science. 26(4): 303-312.
9. Allen RG and Pereira LS (1998) Crop evapotranspiration. Guideline for computing crop water requirement. FAO Irrigation and Drainage. Paper No. 56. Rome, Italy.

- 10 . Allen RG (2001) Manual of reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations. University of Idaho.
- 11 . Fooladmand HR and Haghghat M (2007) Spatial and temporal calibration of Hargreaves equation for calculating monthly ETo based on Penman-Monteith Method. *Irrigation and Drainage*. 56(4): 439-44.
- 12 . Landeras G, Ortiz-Barredo A and Lopez J (2008) Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural Water Management*. 95(5): 553-565.
- 13 . Noori mohammadieh M, Mohammadi M, Helali J, Nazari B and Sohrabi T (2009) Evaluation of Hargreaves equation for calculating daily ETo (Case study: North West of Iran). *Advances in Natural and Applied Science*. 3(2): 273-278.
- 14 . Savana AP and Frenken K (2002) Crop water requirements and irrigation scheduling. FAO irrigation manual module 4. Herare, 132 p.
- 15 . Sentelhas PC, Gillespie TJ and Santos EA (2010) Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*. 97(5): 635-644.
- 16 . Trajkovic S and Kolakovic S (2009) Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. *Water Resource Management*. 23(14): 3057-3067.
- 17 . Ventura F, Spano D, Duce P and Snyder RL (1999) An evaluation of common evapotranspiration equation. *Irrigation Science*. 18(4): 163-170.

## **Evaluation and calibration of reference evapotranspiration models according to calculating periods for a cold semi-arid climate**

H. Ghamarnia <sup>1\*</sup>, S.V. Rezvani <sup>2</sup> and P. Fathi <sup>3</sup>

(E-mail: [hghamarnia@razi.ac.ir](mailto:hghamarnia@razi.ac.ir))

(Received: 31 July 2011, Accepted: 9 March 2013)

### **Abstract**

In agricultural practices, reference evapotranspiration ( $ET_0$ ) parameters need to be specified for crop water requirement determination. Although, the crop water requirement is not an easy task. Numerous mathematical models and experimental methods have been developed for this purpose in the entire world. On the other hand, ten-daily and monthly average meteorological data are used in many of Irrigation and drainage projects which can affect the calculation of evapotranspiration in ten-day and monthly scale. In this paper, daily, ten-day, and monthly calculating periods were studied on accuracy of reference evapotranspiration estimation using FAO Penman Monteith, FAO Radiation, Modified Penman, Hargreaves, Priestley-Taylor and Makkink models in Sanandaj with cold semi-arid climate. Then, by selecting of the model with higher accuracy, the calibration was done. Moreover, to evaluate the accuracy of different models, lysimetric data were used from Sanandaj research station. The results showed that the modified Penman method can predict reference evapotranspiration with higher accuracy in all periods and calibration of the equation and has no effects on its accuracy. Also, the results showed that the computational periods have no significant effects on the accuracy of different models prediction.

**Keywords:** Calculating period, Calibration, Evapotranspiration, Hargreaves, Modified penman

---

1 - Associate Professor, Department of Water Engineering, College of Agriculture and Natural Resources, Razi University, Kermanshah - Iran

(Corresponding Author \*)

2 - Former M.Sc. Student, Department of Irrigation and Water Resource Engineering, College of Agriculture, Kurdistan University, Sanandaj - Iran

3 - Assistant Professor, Department of Irrigation and Water Resource Engineering, College of Agriculture, Kurdistan University, Sanandaj - Iran