



Evaluating the Efficiency of Empirical Estimation of Reference Evapotranspiration (Pan Based Method) in Different Climate Conditions of Iran

H. Ghamarnia^{1*} and N. Soultani²

Abstract

In this research, daily meteorological data for 15 years (1999-2013) were used in 153 synoptic stations throughout Iran to determine the best method among pan evaporation methods to determine the reference evapotranspiration for different climate conditions. For all synoptic stations of the country, evapotranspiration was calculated from 12 different evaporation pan methods, and the FAO-Penman-Monteith method was used as the standard method for evaluation. Different statistics tests as RMSE, MBE, R² and t tests were used to evaluate the accuracy of different methods. The final results showed that in two arid and semi-arid climates, Mohammad et al. (2008), FAO-24 (in dry conditions) (Doorenbos and Pruitt, 1997) and Christensen methods were the most suitable methods and Schneider (1992), Allen and Prout (1991), Raghuwanshi and Wallender (1998) were the most inappropriate methods. For the Mediterranean climate condition, Mohammed et al., Konica (1989) and Schneider were the most suitable and Pereira's, FAO-24 (in dry conditions), Raghuwanshi and Wallender were identified as the most unsuitable methods. In the semi-humid climate, the modified Schneider method, Allen and Pruitt (Allen & Pruitt, 1991), and Pereira (Pereira et al., 1995) were the most suitable methods and Mohamad et al., FAO-24 (in dry condition), Ragvanshi and Waldner and were the most unsuitable methods. In the wet and humid climates conditions, modified Schneider method, (Allen et al., 1998) were the best and Pryira, FAO-24 (in dry conditions) and Mohammed et al. (2008), Raghuwanshi and Wallender methods were the worst methods. Moreover, the results which obtained and reported in this study did not match with the other results reported by the other researchers. Finally, comparing the results of lysimetric studies in semi-arid climate confirmed the selected methods.

Keywords: Reference Plant Evapotranspiration, Pan Based Method, Statistical Tests, Lysimetric Studies.

Received: October 29, 2017

Accepted: June 8, 2018

بررسی کارایی روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق مرجع (بر پایه تست تبخیر) در اقلیم‌های مختلف (مطالعه موردی ایران)

هوشنگ قمرنیا^{۱*} و نرگس سلطانی^۲

چکیده

در این تحقیق جهت تعیین بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع در بین روش‌های بر پایه تست تبخیر برای اقلیم‌های مختلف از آمار و اطلاعات هواشناسی روزانه طی ۱۵ سال (۱۹۹۹-۲۰۱۳) در ۱۵۳ ایستگاه سینوپتیک ایران استفاده شد. تبخیر-تعرق مرجع برای تمام ایستگاه‌های سینوپتیک کشور، از روش بر پایه تست تبخیر محاسبه شد، همچنین از روش فائو-پنمن-مانتیت به عنوان روش استاندارد برای ارزیابی دیگر روش‌ها استفاده گردید. برای ارزیابی دقت مدل‌ها از آزمون‌های آماری RMSE، MBE، R² و t استفاده بعمل آمد. نتایج نهایی نشان داد که در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور، روش‌های محمد و همکاران (Mohamed et al., 2008)، فائو-۲۴ شرایط خشک (Doorenbos and Pruitt, 1997) و کریستیانسن مناسب‌ترین و روش‌های اشنايدر (Snyder, 1992)، آلن و پروت (Allen & Pruitt, 1991)، راگوانشی و والندر (Raghuwanshi & Wallender, 1998)، نامناسب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر-تعرق بودند. برای اقلیم مدیترانه‌ای روش‌های محمد و همکاران، کونیکا (Cuenca, 1989) و اشنايدر، مناسب‌ترین و روش‌های پرییرا (Pereira et al., 1995)، فائو-۲۴ در شرایط خشک و راگوانشی و والندر به عنوان نامناسب‌ترین روش‌ها شناخته شدند. در اقلیم نیمه مرطوب روش‌های اشنايدر اصلاح شده، آلن پروت و پرییرا مناسب‌ترین و روش‌های محمد و همکاران، فائو-۲۴ در شرایط خشک و راگوانشی و والندر نامناسب‌ترین روش‌ها بودند. در اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب به ترتیب روش‌های اشنايدر اصلاح شده و فائو-۵۶ بهترین و روش‌های پرییرا، فائو-۲۴ در شرایط بدون پوشش، محمد و همکاران و فائو-۲۴ در شرایط خشک و روش‌های راگوانشی و والندر بدترین روش‌ها بودند. در نهایت مقایسه نتایج حاصل از مطالعات لایسیمتری در اقلیم نیمه خشک صحت روش‌های انتخابی را تأیید نمود.

کلمات کلیدی: تبخیر-تعرق گیاه مرجع، بر پایه تست، آزمون‌های آماری، مطالعات لایسیمتری.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۸/۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۳/۱۸

1- Professor, Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran. Email: hghamarnia@razi.ac.ir

2- Former M.Sc. Student at the Department of Water Resources Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

*- Corresponding Author

۱- استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

بار توسط Jensen (1974) بیان گردید. همچنین از آن سال به بعد توسط محققان مختلف دیگری نظیر (Cuenca 1989)، (Snyder 1992)، (Allen and Pruitt 1991) و (Pereira et al. 1995) و (Orang 1998) در حدود ۶ روش دیگر جهت بر آورد ضریب تشت ارائه شدند که در اقصی نقاط ایران و جهان این ضرایب به صورت موردی و پراکنده مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند و اما ارزیابی این معادلات در سطح وسیع و در اقلیم‌های مختلف با آمار دراز مدت تا کنون مورد بررسی و ارزیابی دقیق واقع نشده است. (Ameri et al. 2008) در طی تحقیقی در اصفهان با اقلیم (خشک) به این نتیجه رسیدند که بهترین روش ضریب تشت در تخمین تبخیر- تعرق روزانه به ترتیب معادله‌های پیریرا و همکاران و دورنوسو پرویت می‌باشند. (Grismer et al. 2002). (Sabziparvar and Shademani, Bayatvarkeshi et al. 2014) و (Zare abyane et al. 2011) و (2012) در تحقیقاتی جهت یافتن بهترین روش‌های برآورد ضریب تشت تبخیر در نقاط مختلف کشور، گزارش نمودند که روش اشنایدر بهترین برآورد را در بین روش‌های مورد بررسی دارد. (Ghamarnia et al. 2012) برای ایستگاه زنجان (اقلیم نیمه خشک) روش اورنگ را به عنوان بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق معرفی نمودند. (Sharifian & Ghahraman 2007) با بررسی‌های رگرسیونی و آماری برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل روزانه در منطقه گرگان (اقلیم نیمه خشک) روش‌های اورنگ و اشنایدر را به عنوان روش‌های برتر پیشنهاد کردند. (Akbari 2010) با انجام تحقیقی در ساری (اقلیم مرطوب) با استفاده از چهار روش آلن و پروت، اشنایدر، کونیکا و اورنگ مقادیر ضریب تشت را به صورت روزانه و ماهانه محاسبه نمودند. بعد از بررسی‌های رگرسیونی و آماری آنها روش اورنگ را جهت محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه و ماهانه در ایستگاه مورد نظر مناسب‌تر از بقیه روشها گزارش نمودند. (Yazdani et al. 2011) ضرایب تشت با استفاده از معادله‌های کونیکا، آلن و پروت، اشنایدر در منطقه آمل (با اقلیم مرطوب) را بررسی و نشان دادند که برای محاسبه تبخیر- تعرق پتانسیل روزانه از داده‌های تشت تبخیر به ترتیب روش‌های کونیکا، اشنایدر، آلن و پروت و اورنگ در دوره‌های ۱۰ روزه و ماهانه روش‌های کونیکا، اشنایدر و آلن و پروت مناسب‌تر هستند. (Irmak et al. 2002) با استفاده از داده‌های ۲۶ ساله به بررسی دو معادله اشنایدر و فریورت در منطقه فلوریدا (اقلیم مرطوب) پرداخته و در نهایت نتیجه گرفتند که معادله فریورت برای محاسبه روزانه ضریب تشت تبخیر تخمین دقیق‌تری نسبت به معادله اشنایدر و فائو ۵۶ را در بر دارد. (Grismer et al. 2002) در تحقیقی برای منطقه کالیفرنیا (در اقلیم نیمه خشک) نتیجه گرفتند که مقادیر ضریب تشت به دست آمده از روش آلن و پروت نسبت به سایر مدل‌های دیگر از دقت بالاتری برخوردار است. (Gandekar 2004)

یکی از راه‌های کاهش بحران آب در کشاورزی به واسطه پایین بودن راندمان مصرف آن و استفاده بیش از حد منابع آب موجود، مدیریت آب در تأمین نیاز آبی گیاهان زراعی است. در این زمینه تبخیر- تعرق، در واقع شاخص تعیین کننده‌ای در فرآیند رشد است که معادل آب مورد نیاز گیاهان زراعی قلمداد می‌شود. تبخیر- تعرق پدیده‌ی هیدرولوژیکی چند بعدی است که تحت تأثیر چندین متغیر عمل می‌کند. به طور کلی، متغیرهایی که در فرآیند تبخیر- تعرق اثر گذار هستند بارندگی، سرعت باد، تابش خورشیدی، فشار هوا، رطوبت، ساعات آفتابی، ابرناکی، همرفت (انتقال افقی گرمای محسوس و رطوبت)، پوشش زمین، خصوصیات خاک و گیاه و مقدار آب می‌باشند (Seifi et al., 2011). بنابراین میزان تبخیر- تعرق و نیاز آبی در مناطق مختلف با توجه به شرایط اقلیمی متفاوت می‌باشد.

کمیت منابع طبیعی ایالات متحده آمریکا در سال ۱۹۷۳ تبخیر- تعرق سطوح کشت گیاهان را به ارتفاع آبی اطلاق کرد که صرف تعرق گیاه و تبخیر از سطح خاک شود، این مقدار تبخیر- تعرق را اصطلاحاً تبخیر- تعرق واقعی می‌نامند.

بطور کلی روش‌های بر آورد تبخیر- تعرق مرجع به دو روش مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد (Alizadeh, 2009) در روش مستقیم معمولاً بخش کوچک و همچنین کنترل شده‌ای از منطقه در نظر گرفته شده و اما در روش‌های غیر مستقیم معمولاً از مدل‌های مختلف استفاده می‌گردد (Mousavi Baygi et al., 2009). بر اساس اظهارات (Grismer et al. 2002) تا کنون بیش از ۵۰ روش مختلف جهت بر آورد تبخیر- تعرق پتانسیل توسط محققان مختلف وضع شده است که نتایج حاصله از هر کدام با دیگری در اقلیم‌های مختلف متفاوت می‌باشد.

یکی از روش‌های غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق مرجع، روش تبخیر از تشت است که می‌تواند به عنوان شاخصی مناسب، برای برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع و در نهایت گیاه اصلی قلمداد شود. (Irmak et al. 2002) اظهار داشته که تبخیر از یک تشت، نشانگر شاخصی از اثر توأم پارامترهای مختلف جوی نظیر دمای هوا، تابش و باد است. بطور کلی باید نتایج حاصل از تبخیر تشت را در ضریبی بنام ضریب تشت ضرب نمود تا در نتیجه آن تبخیر- تعرق پتانسیل حاصل گردد. به منظور کاربرد عملی مقادیر تبخیر از تشت می‌باید نتایج حاصله با روش‌های مختلفی نظیر روش لایسمتری و یا روش استاندارد فائو- پنمن - مانیت مورد ارزیابی قرار گیرد (Allen and Pruitt, 1998). از طرفی بر آورد تبخیر- تعرق مرجع با استفاده از تشت تبخیر اولین

حدود ۹۰ درصد از خاک کشور در محدوده فلات ایران واقع شده است. سرزمین ایران بطور کلی کوهستانی و نیمه خشک بوده و میانگین ارتفاع آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. برای مطالعه و پهنه‌بندی تبخیر- تعرق گیاه مرجع با استفاده از روشهای بر پایه تشت تبخیر، ابتدا آمار هواشناسی تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک از سازمان هواشناسی کل کشور با طول دوره آماری از بدو تأسیس تا تاریخ ۲۰۱۵/۳/۱۶ اخذ گردید. با توجه به انتخاب یکسان آماری برای تمام ایستگاه‌ها بازه زمانی ۱۹۹۹/۱/۱ تا ۲۰۱۳/۱۲/۳۱ (۲۰۱۳-۱۹۹۹) در ۱۵ سال آماری انتخاب شد. سپس خلأ آماری هر ایستگاه مشخص و بازسازی آماری آن‌ها با رگرسیون‌گیری، نسبت به موقعیت ایستگاه‌های مجاور، انجام گرفته و در نهایت ۱۵۳ ایستگاه به عنوان ایستگاه‌های نهایی انتخاب شدند. شکل ۱ موقعیت و پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد.

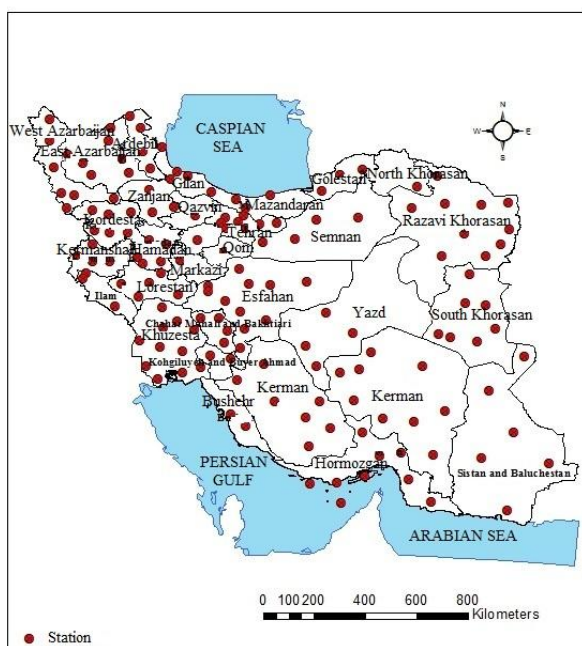


Fig. 1- Geographic location of synoptic stations
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک کشور

پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این مطالعه عبارت بودند از حداکثر، حداقل و متوسط دما بر حسب درجه سانتی‌گراد، میزان بارش (mm)، متوسط رطوبت نسبی (%)، متوسط سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری، شدت تابش خالص خورشیدی که تمام پارامترها به صورت روزانه می‌باشند. همچنین جهت برداشت داده‌های لایسیمیتری به صورت روزانه از، میزان تبخیر- تعرق چمن طی یک سال به طور مستقیم از ایستگاه لایسیمیتری مورد نظر با استفاده از سه دستگاه لایسیمتر زهکش‌دار استوانه‌ای با قطر ۱/۲۰ متر و ارتفاع ۱/۴۰ متر که در هر کدام از این سه لایسیمتر گیاه مرجع (چمن) کشت شده بود،

در طی تحقیقی در استان مازندران (اقلیم مرطوب) هند نشان داد که مقادیر تبخیر- تعرق پتانسیل به دست آمده با ضریب اشنایدر در مقایسه با مقادیر به دست آمده از روش فائو- پنمن بهترین همبستگی را داشته است. (Rahimi Khoob (2008) در طی تحقیقی در نوشهر (با اقلیم بسیار مرطوب) روش اورنگ را بهترین روش برای اقلیم مورد نظر اعلام کرده است. (Kaboosi (2012) انجام تحقیقی در گرگان (با اقلیم نیمه خشک) ضریب تشت را با استفاده از معادله‌های تجربی محاسبه نموده و در طی محاسبه مقادیر به دست آمده از روش تشت و مقایسه آنها با روش فائو- پنمن- مانیتیت در نهایت به این نتیجه رسید که روش اشنایدر نسبت به سایر معادله‌ها از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. (Shokri et al. (2016) در اهواز (اقلیم خشک)، ضرایب تشت تبخیر با معادله‌های آلن و پروت، اورنگ، اشنایدر و کونیکا را محاسبه و پس از تجزیه و تحلیل‌های آماری مربوطه و مقایسه آنها با روش فائو- پنمن- مانیتیت به این نتیجه رسیدند که برای محاسبه ضریب تشت به صورت روزانه و فصلی بهتر است از روش آلن و پروت و در بازه ده روزه از روش اشنایدر استفاده شود. (Estahbani and Bakhtiari (2016) ضمن ارزیابی چهار مدل مختلف برآورد ضریب تشت از معادلات کونیکا، آلن و پروت، اشنایدر و اورنگ در اقلیم خشک کرمان با استفاده از داده‌های روزانه تبخیر از تشت در بازه زمانی پنج ماهه (Agu-Dec 2013) گزارش نمودند که از بین چهار مدل مورد مطالعه، روش آلن و پروت به منظور برآورد تبخیر- تعرق با استفاده از تشت تبخیر برای این منطقه بهتر از سایر روش‌ها می‌باشد.

بطور خلاصه اهداف این تحقیق عبارتند از: ۱- تعیین بهترین روشهای بر آورد مقادیر ضریب تشت، از میان دوازده روش بنیان گذاشته شده تا کنون. ۲- تعیین بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق گیاه مرجع برای اقلیم‌های مختلف سراسر کشور بر پایه تشت تبخیر و تهیه نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق و مشخص نمودن نقاط هم تبخیر- تعرق برای اقلیم‌های متفاوت مربوطه بر اساس آخرین داده‌ها و پارامترهای ایستگاه‌های هواشناسی. ۳- برداشت روزانه داده‌های لایسیمیتری در شهر کرمانشاه با (اقلیم نیمه خشک) و مقایسه آن با مدل‌های وضع شده بر پایه تشت تبخیر جهت تعیین و بررسی صحت بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع و ضرایب مربوطه.

۲- مواد و روش‌ها

کشور ایران با وسعت ۱۶۴۰،۱۹۵ کیلومترمربع در نیمه جنوبی منطقه معتدل شمالی بین ۲۵°،۰۳' و ۳۹°،۴۷' عرض شمالی از خط استوا و ۱۴°، ۲۰' و ۴۴°، ۳۰' طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد.

می‌گیرند و با استفاده از این روش و بر پایه مقادیر مختلفی که برای شاخص I بدست آمده در معادله (۲) نوع اقلیم تعیین گردید (Alizadeh, 2006):

$$I = P / (T + 10) \quad (2)$$

در معادله ۲، I، محدوده ضریب خشکی، P، متوسط بارندگی سالانه بر حسب میلی‌متر و T متوسط دمای سالانه بر حسب درجه سانتیگراد می‌باشد.

۲-۲- روش فائو-پنمن-مانتیت

در این تحقیق روش پنمن-مانتیت-فائو بعنوان روش مرجع و مقایسه (معادله ۳) در نظر گرفته شد.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

که در آن، ET_0 تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع (mm)، Δ شیب منحنی فشار بخار نسبت به درجه حرارت (Kpa. °C⁻¹)، R_n تابش خالص (MJ.m⁻².d⁻¹)، G شار گرما به داخل خاک است که معمولاً صفر در نظر گرفته می‌شود، γ ضریب رطوبتی (Kpa. °C⁻¹)، T متوسط دمای روزانه (°C) و e_s و e_a به ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب (mbar)، U_2 سرعت باد در روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین به (m/s) می‌باشد (Allen and Pruitt, 1991).

۲-۳- روش‌های غیر مستقیم برآورد تبخیر-تعرق (بر پایه تشت تبخیر)

در این تحقیق از کلبه روش‌های بر پایه تشت تبخیر جهت محاسبه ضریب تشت (kp) و نهایتاً محاسبه تبخیر-تعرق گیاه مرجع استفاده شد. معادلات بکار رفته عبارت بودند از آن و پروت (رابطه ۳) در جدول ۱، کونیکا (رابطه ۴)، اورنگ (رابطه ۵)، اشنایدر (رابطه ۶)، اشنایدر اصلاح شده (رابطه ۷)، فائو-۵۶ (Allen et al., 1998) (رابطه ۸)،

اندازه‌گیری شد. جهت اندازه‌گیری دقیق محتوای آب خاک، هر سه لایسیمتر به سنسورهای سنجنده رطوبت TDR مجهز شدند. در داخل پروفیل خاک هر لایسیمتر نیز در سه عمق مختلف ۲۰، ۴۰ و ۶۰ سانتی‌متری، سه عدد پروب دستگاه TDR و سه عدد بلوک گچی تعبیه شدند. در عمل قبل از هر آبیاری میزان آب موجود در خاک به وسیله دستگاه TDR اندازه‌گیری شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این ارزیابی شامل دمای حداکثر، دمای حداقل، میانگین دما، میانگین رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد، ساعات آفتابی و تشعشع خورشید به صورت روزانه از تاریخ ۲۰۱۴/۵/۱۶ الی ۲۰۱۵/۵/۱۶ از ایستگاه هواشناسی مستقر در فاصله یکصد متری لایسیمترها اخذ گردیدند. برای اندازه‌گیری تبخیر-تعرق گیاهی توسط لایسیمتر زهکش‌دار برای دوره زمانی معین، از رابطه بیلان آبی خاک (رابطه ۱) استفاده شد. برای محاسبات بیلان آبی پارامترهای عمق آبیاری (I)، بارندگی (P)، تغییرات رطوبت خاک (ΔS) و میزان آب زهکشی شده (D) اندازه‌گیری شدند. میزان آب خروجی از لایسیمترها نیز از طریق جمع‌آوری آب اضافی که از طریق لوله‌های زهکش به محل جمع‌آوری زه‌آب هدایت شده به دست آمد. برای اندازه‌گیری آب زهکش شده، ظروف مدرجی در محل خروجی هر لایسیمتر قرار داده شد و بعد از هر مرتبه آبیاری یا بارندگی، میزان حجم زهکش برحسب لیتر اندازه‌گیری و سپس با تقسیم آن بر سطح مقطع لایسیمتر به عمق آب تبدیل گردید:

$$ET = I + P - RO - DP + CR \pm \Delta SF \pm \Delta S \quad (1)$$

که در آن: ET = مقدار تبخیر-تعرق، I = مقدار آبیاری، P = مقدار بارندگی، RO = رواناب سطحی، DP = مقدار آب زهکش شده، ΔSF = نرخ جریان زیر سطحی و ΔS = تغییرات رطوبت خاک در دوره معین می‌باشند.

۲-۱- پهنه‌بندی اقلیمی کشور بر اساس روش دومارتن

در این روش، دما و بارش سالیانه اساس محاسبه شاخص رطوبت قرار



Fig. 2- Lysimeter cultivated with grass, Water drain chamber

شکل ۲- نمایی از لایسیمترهای کشت شده چمن و شماتیک اجزا و اتاقک دسترسی مربوطه (جمع‌آوری زه‌آب)

Table 1- Methods of calculating reference evapotranspiration (based on evaporation pan)

جدول ۱- روش‌های برآورد تبخیر- تعرق (بر پایه تشت تبخیر)

| Method | Equation |
|--|--|
| Allen & Pruitt (3) | $K_{pan}=0.108 - (0.000331 \times U_2) + (0.0422 \times \ln(F)) + (0.1434 \times (\ln(RH))) - [0.000631 \times (\ln(F))^2 \times \ln(RH)]$ |
| Cuenca (4) | $K_{pan} = 0.475 - (0.000245 \times U_2) + (0.00516 \times RH) + 0.00118 \times F - (0.000016 \times RH) - (0.00000101 \times F^2) - (0.000000008 \times RH^2 \times U_2) - (0.00000001 \times (RH^2) \times F)$ |
| Orang (5) | $K_{pan} = 0.51206 - (0.000321 \times U_2) + (0.02889 \times RH) + 0.03188 \times (\ln(F)) - (0.000107 \times RH \times \ln(F))$ |
| Snyder (6) | $K_{pan} = 0.482 + [0.024 \times \ln(F)] - 0.000376 \times U_2 + (0.0045 \times RH)$ |
| Modified Snyder (7) | $K_{pan} = 0.5321 - (0.0003 \times U_2) + (0.0249 \times \ln(F)) + (0.0025 \times RH)$ |
| FAO-56 (Allen et al., 1998) (8) | $K_{pan} = 0.108 - (0.0286 \times U_2) + (0.0422 \times \ln(F)) + 0.1434 \times (\ln(RH)) - (0.000631 \times (\ln(F))^2 \times \ln(RH))$ |
| Pereira (9) | $K_{pan} = 0.85 \times (\Delta + \gamma) / ((\Delta + \gamma) \times (1 + 0.33 \times U_2))$ |
| Raghuwanshi & wallender (10) | $K_{pan} = 0.5944 + 0.0242 \times X_1 - 0.0583 \times X_2 - 0.1333 \times X_3 - 0.2083 \times X_4 + 0.0812 \times X_5 + 0.1344 \times X_6$ |
| $X_1 = \ln(F); X_2, X_3, X_4 = 0$ if $U_2 < 175$; $X_2 = 1$ if $175 \leq U_2 < 425$; $X_3 = 1$ if $425 \leq U_2 < 700$; $X_4 = 1$ if $U_2 > 700$ (Km.day^{-1}); $X_5, X_6 = 0$ if $RH < 40\%$; $X_5 = 1$ if $40\% \leq RH < 70\%$; $X_6 = 1$ if $RH \geq 70\%$. | |
| FAO-24 (Class A pan surrounded in dry) (11) | $K_{pan} = 0.61 + (0.00341 \times RH) - (0.000162 \times U_2 \times RH) - (0.00000959 \times U_2 \times F) + (0.00327 \times U_2 \times \ln(F)) - (0.00289 \times U_2 \times \ln(86.4 \times U_2)) - ((0.0106 \times \ln(86.4 \times U_2) \times \ln(F)) + (0.00063 \times (\ln(F))^2 \times \ln(86.4 \times U_2)))$ |
| FAO-24 (Class A pan surrounded with low growing (12) vegetation) | $K_{pan} = 0.108 - (0.0286 \times U_2) + (0.0422 \times \ln(F)) + (0.1434 \times \ln(RH)) - (0.000631 \times (\ln(F))^2 \times \ln(RH))$ |
| Mohamed et al. (2008) (13) | $K_{pan} = 0.62407 - (0.0266 \times \ln(F)) - (0.00028 \times U_2) + (0.0026 \times RH)$ |
| Christiansen (based on Jensen et al.'s method, 1990) (14) | $ET_o = 0.755 \times E_{pan} \times C_t \times C_u \times C_h \times C_s$ |
| $C_t = 0.862 + 0.179 \times (T/TO) - 0.041 \times (T/TO)^2$; $C_u = 1.189 + 0.240 \times (U/U_o) - 0.051 \times (U/U_o)^2$; $C_h = 0.499 + 0.620 \times (RH/RH_o) - 0.119 \times (RH/RH_o)^2$; $C_s = 0.904 + 0.008 \times (S/S_o) - 0.088 \times (S/S_o)^2$ | |

۲-۴- شاخص‌های آماری تعیین بهترین روش برآورد تبخیر- تعرق مرجع

تبخیر- تعرق پتانسیل توسط روش‌های غیرمستقیم بر پایه تشتک تبخیر محاسبه شد و نتایج با استفاده از چهار شاخص آماری با نتایج حاصل از روش فائو- پنمن- مانیتیت مقایسه شد. این معیارها عبارت بودند از جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، متوسط خطای تخمین‌ها (MBE)، ضریب رگرسیونی (R^2) و معیار جاکوویز (t). جاکوویز اعتقاد داشت که شاخص‌های RMSE و MBE به تنهایی برای انتخاب بهترین مدل ETO کافی نمی‌باشند. بنا به توصیه او، علاوه بر دو معیار RMSE و MBE که عموماً برای مقایسه مدل‌های تبخیر- تعرق استفاده می‌شود، می‌بایست از معیار سومی به نام t (معادله ۱۸) با ترکیبی از دو معیار MBE و RMSE استفاده شود.

پیریرا (رابطه ۹)، راگوانشی و والندر (رابطه ۱۰)، فائو- ۲۴ که خود شامل دو معادله با عنوان تشت تبخیر کلاس A احاطه شده با محیط خشک (رابطه ۱۱) و تشت تبخیر کلاس A در محیط با پوشش سبز کوتاه (رابطه ۱۲)، محمد و همکاران (Mohamed et al., 2008)، رابطه ۱۳، که این فرمول نیز براساس معادله اشنايدر (Snyder, 1992) برای تشت‌های محصور در محیط خشک ارائه شده و همچنین معادله کریستیانسن (رابطه ۱۴)، اشاره کرد.

U_2 = سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (km.day^{-1}); U_o = $6/70$ کیلومتر بر ساعت (km.h^{-1}); RH = رطوبت نسبی متوسط روزانه (%); $RHO = 0.6$; F = فاصله از پوشش گیاهی (m); Δ = شیب منحنی فشار بخار ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$); γ = ضریب رطوبت ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$); T = متوسط دمای هوا ($^\circ\text{C}$); $To = 20$ سانتی‌گراد.

مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب به ترتیب در حدود ۶۲، ۳۵، ۰/۳/۳، ۰/۹ و ۱/۵۰ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهند. با توجه به این دسته‌بندی می‌توان نتیجه گرفت، که بیش از نیمی از ایستگاه‌های کشور در شرایط اقلیمی خشک قرار دارند، که نرخ تبخیر- تعرق در آن‌ها نیز متوسط تا زیاد است. پس از آن بیش‌ترین سهم از ایستگاه‌ها متعلق به اقلیم نیمه‌خشک است، که وضعیت آن‌ها از لحاظ تبخیر- تعرق تقریباً مشابه اقلیم خشک است. این نتایج، خشک و نیمه خشک بودن اکثر مناطق کشور را تأیید می‌کنند. بر اساس شکل ۳، نواحی جنوب، شرق و جنوب شرقی کشور دارای اقلیم خشک، نواحی مرکز، جنوب غربی و شمال غربی کشور دارای اقلیم نیمه‌خشک و نواحی شمال، قسمتی از مناطق شمال غربی و قسمتی از مرکز (مربوط به استان‌های چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد) دارای اقلیم‌های مدیترانه‌ای، نیمه‌مرطوب، مرطوب و بسیار مرطوب می‌باشند.

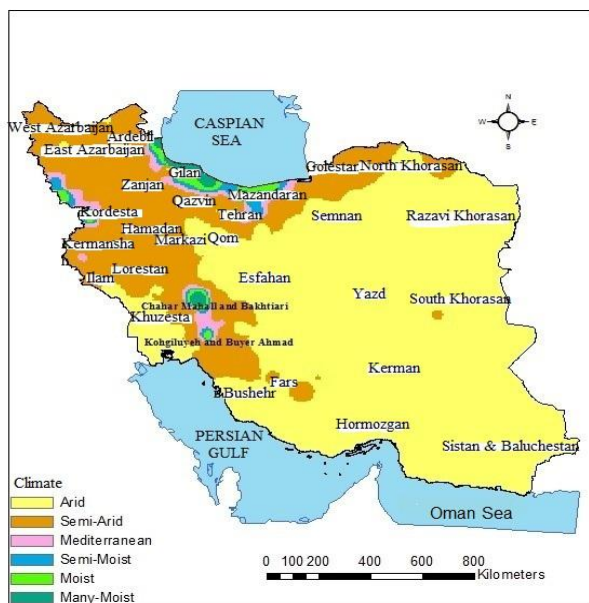


Fig. 3- Zoning map of the country using Domartion method

شکل ۳- پهنه‌بندی اقلیمی کشور به روش دومارتون

۳-۱- ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر- تعرق بر پایه تشت تبخیر

برآورد تبخیر- تعرق برای تمام ایستگاه‌های سینوپتیک کشور در همه اقلیم‌ها انجام شد. بعد از جمع‌بندی کلی نتایج و با توجه به بالا بودن تعداد ایستگاه‌های بررسی شده ترجیح داده شد که از هر اقلیم یک ایستگاه به طور تصادفی انتخاب و نتایج آن تفسیر گردد. ایستگاه‌های انتخابی برای اقلیم‌های خشک، نیمه خشک، مدیترانه‌ای، نیمه مرطوب،

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i)^2}{n}} \quad (15)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (d_i) \quad (16)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (17)$$

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

در این رابطه، t معیار جاکوویز و n تعداد مشاهدات می‌باشد. مقدار t کمتر بیانگر دقت بهتر مدل می‌باشد. با توجه به این موضوع که در برخی موارد ممکن است نتایج یک مدل دارای ضریب R^2 بالا بوده، اما نمایه‌های MBE و $RMSE$ خطای زیادی را نشان دهند، و برای مدل دیگری، برعکس، R^2 کمتر ولی خطاهای MBE و $RMSE$ یا قابل قبول باشند، لذا، تصمیم‌گیری در انتخاب مدل بهینه دشوار می‌باشد. بدین منظور معیار ترکیبی جدید که حاصل نسبت R^2 به t می‌باشد (R^2/t)، معرفی شده است. با بکارگیری معیار خطای جدید (R^2/t) مشکل انتخاب مدل‌های بهینه بطور قابل ملاحظه‌ای بهبود بخشیده شد. مقادیر (R^2/t) بالاتر، بیانگر سازگاری بهتر مدل با واقعیت می‌باشد (Sabziparvar et al., 2008). در این تحقیق تبخیر- تعرق توسط روش‌های مختلف بر پایه تشت تبخیر برای تمام اقلیم‌ها محاسبه شد. بر اساس معیارهای آماری ذکر شده مناسب‌ترین روش در هر اقلیم پیشنهاد گردید. پهنه‌بندی تبخیر- تعرق و ترسیم نقشه‌های هم تبخیر- تعرق پس از وارد کردن مشخصات ایستگاه‌ها شامل طول و عرض جغرافیایی و مناسب‌ترین تبخیر- تعرق محاسبه شده به محیط نرم‌افزار GIS و با بهره‌گیری از روش کریجینگ انجام گرفت. جدول ۱ برخی روش‌های غیرمستقیم برآورد تبخیر- تعرق (بر پایه تشت تبخیر) را نشان می‌دهد.

بررسیها نشانگر آن است که در اکثر تحقیقات انجام شده، مقدار ضریب سبزینگی (F) براساس مشاهدات میدانی ایستگاه مورد نظر تعیین گردیده است. بر همین اساس در این تحقیق، از آنجا که تعداد ایستگاه‌های مورد بررسی بسیار زیاد و محدوده مورد مطالعه گسترده و امکان دسترسی به تمام آنها ناممکن بود و با توجه به سینوپتیک بودن همه ایستگاه‌های مورد بررسی، ضریب سبزینگی برای همه یکسان و معادل ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.

۳- نتایج

شکل ۳ نشان می‌دهد که مساحت اقلیم‌های خشک، نیمه خشک،

بدرتین روش محاسبه تبخیر- تعرق انتخاب گردید. همچنین روش فائو- ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (پوشش سبز)، بالاترین R^2 را در بین تمام روش‌ها را بود لذا، بدلیل مقدار خطای بالای آن ($t = 31/843$) روش مناسبی برای برآورد تبخیر- تعرق نمی‌باشد. شکل ۴ نتایج برآورد تبخیر- تعرق حاصل روش‌های مختلف را در مقابل روش فائو- پنمن- مانیت به عنوان روش مرجع نشان داده است. همانطور که در شکل ۴ پیداست، روش فائو- ۲۴ در شرایط (بدون پوشش) برآورد نزدیکتری به روش مرجع و روش راگوانشی و والندر کمترین میزان برآورد را در بین تمام روش‌ها داشته‌اند. شکل ۵ مقادیر ضریب تشت برآورد شده توسط ۱۲ روش برآورد تبخیر- تعرق بر اساس تشت تبخیر در اقلیم خشک را نشان می‌دهد. در این شکل بیشترین و کمترین میزان ضریب تشت برآوردی به ترتیب مربوط به روش اشنایدر و روش راگوانشی و والندر می‌باشند.

مرطوب و بسیار مرطوب به ترتیب ایستگاههای بافت، داران، لردگان، آبعلی، بابلسر و بندرانزلی بودند. نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های آماری در جداول ۲ تا ۸ و نمودار مقایسه روش‌های انتخابی در مقابل روش مرجع و مقادیر ضریب تشت برآورد شده توسط ۱۲ روش برآورد تبخیر- تعرق براساس تشت تبخیر ترسیم شد. همانطور که از برآوردهای آماری جدول ۲ پیداست، روش فائو- ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (محیط خشک) با داشتن بالاترین مقدار ضریب (R^2/t) معادل ۰/۱۰۱ و کمترین مقدار معیار جاکوویز (t) معادل ۷/۰۸۶ در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق مرجع برای این ایستگاه انتخاب شد. درحالی‌که روش راگوانشی و والندر با داشتن کمترین میزان ضریب (R^2/t) معادل ۰/۱۰۱ و مقدار معیار جاکوویز (t) معادل ۳۰/۰۲۰ به عنوان

Table 2- Estimating results of evapotranspiration models in Baft station (dry climate)

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه بافت (اقلیم خشک)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R^2 | R | t | R^2/t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|---------|
| Cuenca (1989) | 4.711 | 2.526 | 1.218 | 0.752 | 0.867 | 40.745 | 0.018 |
| Allen & pruit (1991) | 4.802 | 2.629 | 1.309 | 0.749 | 0.865 | 42.506 | 0.018 |
| Snyder (1992) | 4.753 | 2.571 | 1.260 | 0.747 | 0.864 | 41.623 | 0.018 |
| Modified Snyder | 4.744 | 2.567 | 1.251 | 0.765 | 0.875 | 41.315 | 0.019 |
| Pereira (1995) | 4.725 | 2.613 | 1.233 | 0.763 | 0.874 | 39.602 | 0.019 |
| Orang (1998) | 4.804 | 2.635 | 1.312 | 0.766 | 0.875 | 42.491 | 0.018 |
| FAO-56 (Allen,1998) | 4.341 | 2.159 | 0.849 | 0.718 | 0.847 | 31.644 | 0.023 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 2.678 | 2.167 | -0.815 | 0.323 | 0.569 | 30.020 | 0.011 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 3.360 | 1.390 | -0.132 | 0.715 | 0.846 | 7.086 | 0.101 |
| FAO-24 (Green-veg) | 4.403 | 2.303 | 0.910 | 0.791 | 0.889 | 31.843 | 0.025 |
| Mohamed et al. | 3.737 | 1.580 | 0.245 | 0.762 | 0.873 | 11.606 | 0.066 |
| Christiansen Method | 3.962 | 1.862 | 0.470 | 0.715 | 0.846 | 19.288 | 0.037 |

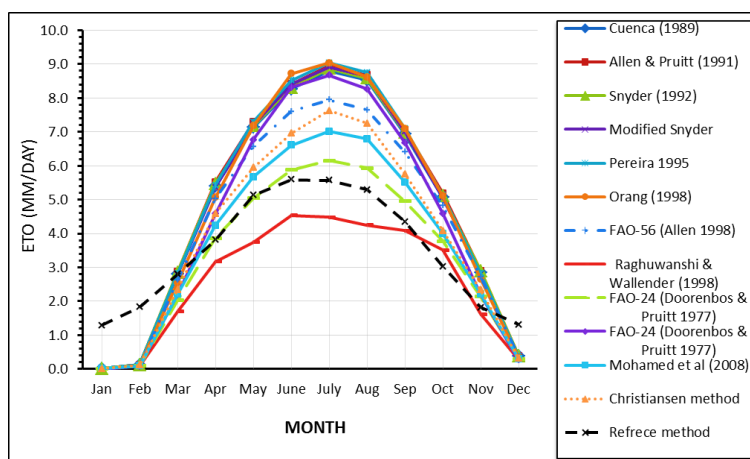


Fig. 8- Evapotranspiration estimated by different methods in Baft station

شکل ۴- تبخیر- تعرق برآوردی از روش‌های مختلف ایستگاه بافت

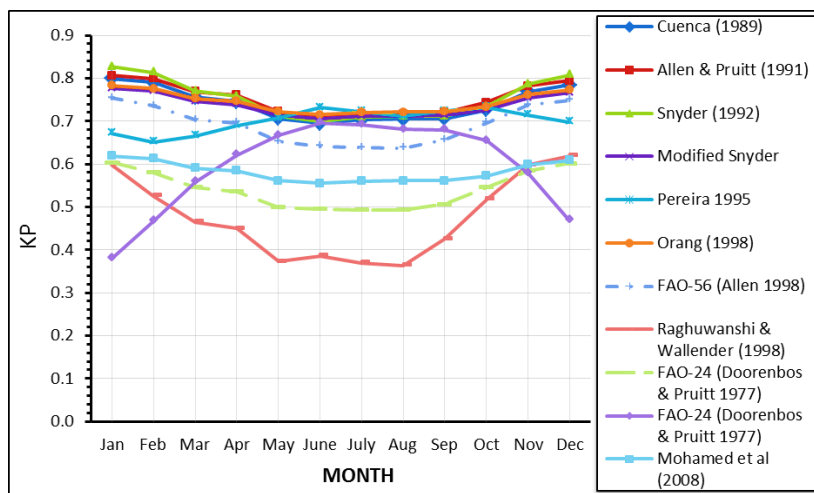


Fig. 9- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Baft station

شکل ۵- ضریب تشتت برآوردی از روش‌های مختلف تبخیر بر پایه تشتت تبخیر ایستگاه بافت

در جدول ۳ برای ایستگاه داران (اقلیم نیمه خشک)، روش کریستیانس با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل $4/838$ و کمترین مقدار جاکوویز (t) معادل $0/159$ بیشترین سازگاری در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق برای این ایستگاه انتخاب شد. درحالی‌که روش پرییرا با داشتن ضریب رگرسیونی (R^2) معادل $0/814$ و کمترین میزان ضریب (R^2/t) معادل $0/026$ به عنوان بدترین روش محاسبه تبخیر- تعرق در نظر گرفته شد. همچنین روش فائو - ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (پوشش سبز)، بالاترین R^2 را در بین تمام روش‌ها دارد. اما دلیل خطای بالا $(t = 29/528)$ روش مناسبی برای برآورد تبخیر- تعرق تشخیص داده نشد. شکل ۸ نیز نتایج برآورد تبخیر- تعرق حاصل از روش‌های مختلف را به صورت نمودار در مقابل روش فائو- پنمن- مانیت به عنوان روش مرجع نشان داده است. همانطور که در شکل ۸ دیده می‌شود، روش‌های محمد و همکاران و کریستیانس برآورد نزدیکتری به روش مرجع و روش اورنگ نامناسب‌ترین میزان برآورد را در بین تمام روش‌ها داشته‌اند. در شکل ۹ نیز بیشترین میزان ضریب تشتت برآوردی مربوط به روش اشنایدر و پرییرا و کمترین میزان برآورد ضریب تشتت مربوط به روش محمد و همکاران بوده است.

برای ایستگاه آبدلی (اقلیم نیمه مرطوب)، در جدول ۵ روش آلن و پروت (Allen & Pruitt, 1991) با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل $0/140$ و کمترین مقدار جاکوویز (t) معادل $4/896$ بیشترین سازگاری در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق برای این ایستگاه انتخاب شد. درحالی‌که روش راگوانشی و والندر با داشتن ضریب رگرسیونی (R^2) معادل $0/467$ و بیشترین مقدار جاکوویز (t) معادل $59/123$ به عنوان بدترین روش محاسبه تبخیر- تعرق انتخاب شد. ضمناً روش فائو-۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (پوشش سبز)، بالاترین R^2 را در بین تمام روش‌ها دارا بوده و اما بدلیل مقدار خطای بالا $(t = 20/845)$ روش مناسبی برای برآورد تبخیر- تعرق نظر گرفته نشد.

در جدول ۴ برای ایستگاه لردگان با اقلیم مدیترانه‌ای در جدول ۴، روش محمد و همکاران با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل $0/373$ و کمترین مقدار جاکوویز (t) معادل $2/074$ بیشترین سازگاری در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق روزانه برای این ایستگاه انتخاب شد. در حالی‌که روش پرییرا با داشتن ضریب

برای ایستگاه لردگان با اقلیم مدیترانه‌ای در جدول ۴، روش محمد و همکاران با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل $0/373$ و کمترین مقدار جاکوویز (t) معادل $2/074$ بیشترین سازگاری در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق روزانه برای این ایستگاه انتخاب شد. در حالی‌که روش پرییرا با داشتن ضریب

Table 3- Results of evapotranspiration models evaluation in Daran station (semi arid climate)
جدول ۳ - نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه داران (اقلیم نیمه خشک)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R ² | R | t | R ² /t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|----------------|-------|--------|-------------------|
| Cuena (1989) | 3.607 | 1.866 | 0.657 | 0.803 | 0.896 | 27.844 | 0.029 |
| Allen & pruit (1991) | 3.684 | 1.952 | 0.734 | 0.803 | 0.896 | 30.047 | 0.027 |
| Snyder (1992) | 3.641 | 1.903 | 0.691 | 0.798 | 0.893 | 28.854 | 0.028 |
| Modified Snyder | 3.628 | 1.894 | 0.678 | 0.811 | 0.900 | 28.364 | 0.029 |
| Pereira (1995) | 3.783 | 2.155 | 0.833 | 0.814 | 0.902 | 31.004 | 0.026 |
| Orang (1998) | 3.674 | 1.945 | 0.724 | 0.812 | 0.901 | 29.664 | 0.027 |
| FAO-56 (Allen, 1998) | 3.461 | 1.723 | 0.511 | 0.796 | 0.892 | 22.978 | 0.035 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 2.653 | 1.626 | -0.297 | 0.615 | 0.784 | 13.752 | 0.045 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 2.720 | 1.215 | -0.230 | 0.768 | 0.876 | 14.269 | 0.054 |
| FAO-24 (Green-veg) | 3.405 | 1.777 | 0.455 | 0.833 | 0.913 | 19.583 | 0.043 |
| Mohamed et al. | 2.859 | 1.202 | -0.091 | 0.809 | 0.899 | 5.607 | 0.144 |
| Christiansen Method | 2.947 | 1.336 | -0.003 | 0.767 | 0.876 | 0.159 | 4.838 |

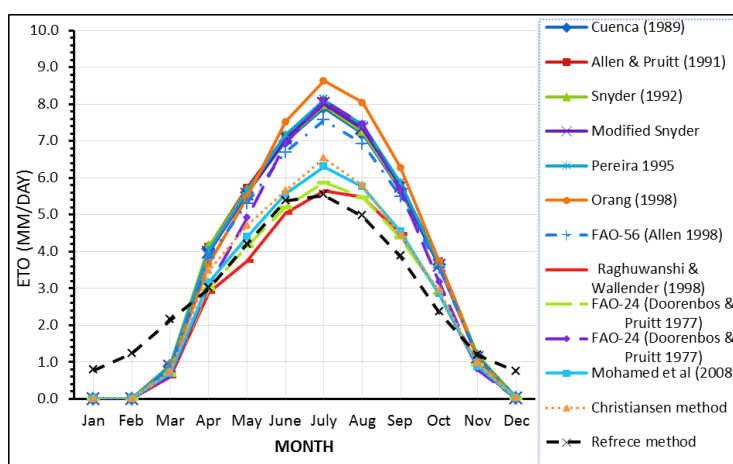


Fig. 10- Evapotranspiration estimated by different methods in Daran station
شکل ۶- تبخیر- تعرق برآوردی از روش‌های مختلف ایستگاه داران

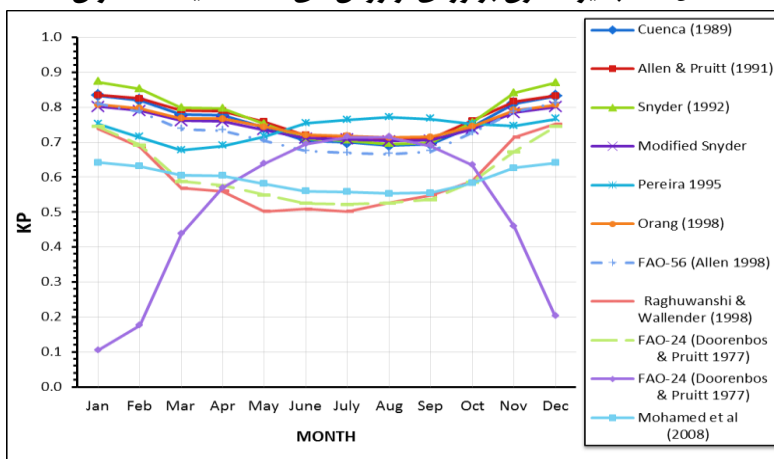


Fig. 11- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Daran station
شکل ۷- ضریب تشتت برآوردی از روش‌های مختلف تبخیر بر پایه تشتت تبخیر ایستگاه داران

Table 4- Results of evapotranspiration models evaluation in Lordegan station (Mediterranean climate)

جدول ۴ - نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه لردگان (اقلیم مدیترانه‌ای)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R ² | R | t | R ² /t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|----------------|-------|--------|-------------------|
| Cuena (1989) | 4.049 | 2.171 | 0.800 | 0.768 | 0.877 | 29.329 | 0.026 |
| Allen & pruit (1991) | 4.136 | 2.271 | 0.887 | 0.768 | 0.876 | 31.400 | 0.024 |
| Snyder (1992) | 4.089 | 2.208 | 0.839 | 0.764 | 0.874 | 30.406 | 0.025 |
| Modified Snyder | 4.072 | 2.208 | 0.823 | 0.776 | 0.881 | 29.711 | 0.026 |
| Pereira (1995) | 4.496 | 2.789 | 1.246 | 0.764 | 0.874 | 36.970 | 0.021 |
| Orang (1998) | 4.124 | 2.266 | 0.874 | 0.777 | 0.881 | 30.946 | 0.025 |
| FAO-56 (Allen,1998) | 3.984 | 2.129 | 0.735 | 0.752 | 0.867 | 27.204 | 0.028 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 3.349 | 1.776 | 0.100 | 0.657 | 0.810 | 4.153 | 0.158 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 3.323 | 1.741 | 0.073 | 0.665 | 0.815 | 3.119 | 0.213 |
| FAO-24 (Green-veg) | 4.106 | 2.380 | 0.856 | 0.788 | 0.888 | 28.529 | 0.028 |
| Mohamed et al. | 3.210 | 1.418 | -0.040 | 0.774 | 0.880 | 2.074 | 0.373 |
| Christiansen Method | 3.303 | 1.506 | 0.054 | 0.749 | 0.866 | 2.649 | 0.283 |

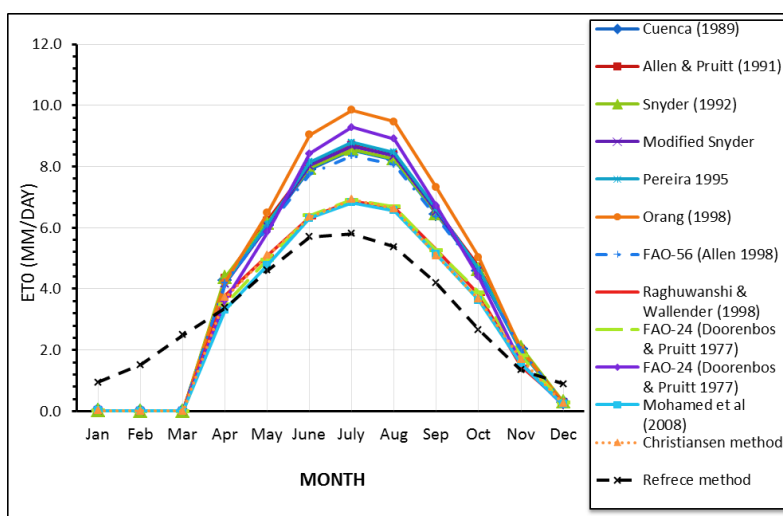


Fig. 12- Evapotranspiration estimated by different methods in Lordegan station

شکل ۸- تبخیر- تعرق برآوردی از روش‌های مختلف ایستگاه لردگان

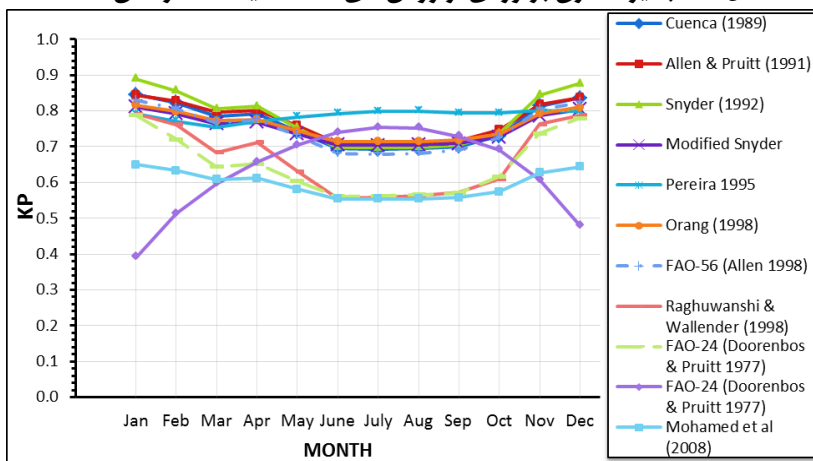


Fig. 13- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Lordegan station

شکل ۹- ضریب تشتت برآوردی از روش‌های مختلف تبخیر بر پایه تشتت تبخیر ایستگاه لردگان

در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر-تعرق برای این ایستگاه انتخاب شد. همچنین روش محمد و همکاران با داشتن ضریب رگرسیونی (R^2) معادل ۰/۵۷۲ و بیشترین مقدار جاکوویدز (t) معادل ۵۴/۷۰۲ به عنوان بدترین روش محاسبه تبخیر-تعرق انتخاب شد. ضمناً بر اساس نتایج بدست آمده و مندرج در جدول ۶ روش فائو-۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (پوشش سبز)، بالاترین R^2 را در بین تمام روش‌ها بوده و اما بدلیل میزان خطای بالا ($t = ۵۲ / ۰.۳۱$) روش مناسبی برای برآورد تبخیر-تعرق نمی‌باشد.

همانطور که در شکل ۱۰ دیده می‌شود، روش آلن و پرویت برآورد نزدیکتری به روش مرجع و روش راگوانشی و والندر کمترین میزان برآورد در بین تمام روش‌ها داشته‌اند. در شکل ۱۱ نیز بیشترین میزان ضریب تشت برآوردی مربوط به روش اشنایدر و کمترین میزان برآورد ضریب تشت مربوط به روش محمد و همکاران بوده است.

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۶ برای ایستگاه بابلسر (اقلیم مرطوب)، روش اشنایدر با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل ۰/۰۷۳ و کمترین مقدار جاکوویدز (t) معادل ۷/۸۱۴ بیشترین سازگاری

Table 5- Results of estimating evapotranspiration models evaluation in Ab Ali station (semi humid climate)

جدول ۵- نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق در ایستگاه ابعلی (اقلیم نیمه مرطوب)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R^2 | R | t | R^2/t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|---------|
| Cuenca (1989) | 2.560 | 1.698 | -0.170 | 0.686 | 0.828 | 7.431 | 0.092 |
| Allen & pruit (1991) | 2.615 | 1.741 | -0.115 | 0.687 | 0.829 | 4.896 | 0.140 |
| Snyder (1992) | 2.588 | 1.723 | -0.142 | 0.683 | 0.826 | 6.112 | 0.112 |
| Modified Snyder | 2.559 | 1.692 | -0.171 | 0.693 | 0.833 | 7.513 | 0.092 |
| Pereira (1995) | 2.511 | 1.672 | -0.219 | 0.706 | 0.841 | 9.765 | 0.072 |
| Orang (1998) | 2.590 | 1.717 | -0.140 | 0.694 | 0.833 | 6.045 | 0.115 |
| FAO-56 (Allen,1998) | 2.384 | 1.572 | -0.346 | 0.685 | 0.828 | 16.683 | 0.041 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 1.535 | 1.914 | -1.195 | 0.467 | 0.683 | 59.123 | 0.008 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 1.840 | 1.471 | -0.890 | 0.677 | 0.823 | 56.293 | 0.012 |
| FAO-24 (Green-veg) | 2.312 | 1.540 | -0.418 | 0.719 | 0.848 | 20.845 | 0.034 |
| Mohamed et al. | 2.020 | 1.443 | -0.710 | 0.691 | 0.832 | 41.861 | 0.017 |
| Christiansen Method | 2.172 | 1.541 | -0.558 | 0.656 | 0.810 | 28.778 | 0.023 |

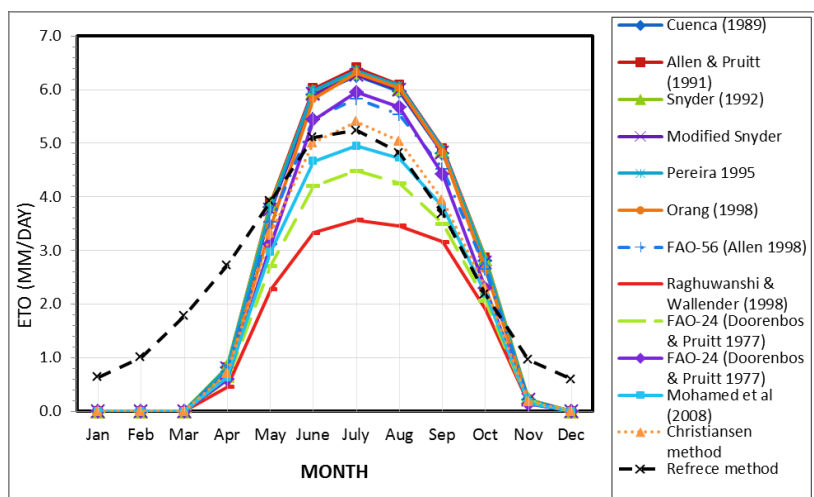


Fig. 14- Evapotranspiration estimated by different methods in Ab Ali station

شکل ۱۰- تبخیر-تعرق برآوردی از روش‌های مختلف ایستگاه ابعلی

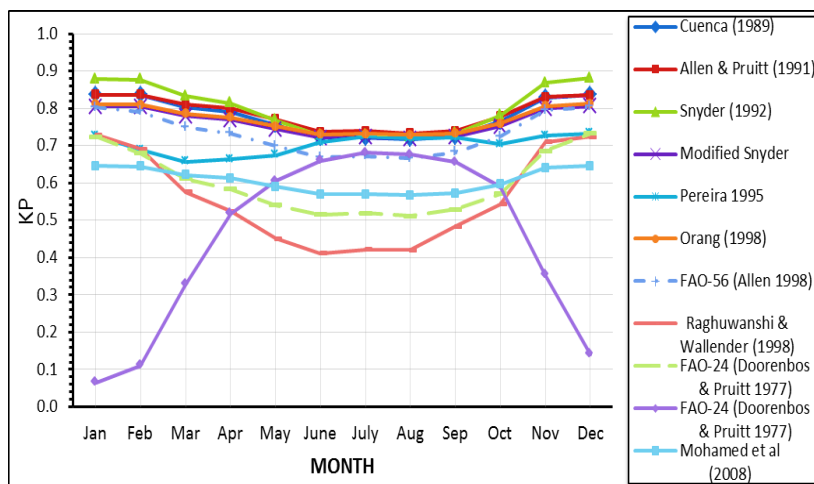


Fig. 15- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Ab Ali station

شکل ۱۱- ضریب تشتت برآوردی از روش‌های مختلف برپایه تشتت تبخیر ایستگاه ابعلی

در جدول ۷ برای ایستگاه بندرانزلی (اقلیم بسیار مرطوب)، روش اشنایدر با داشتن بالاترین ضریب (R^2/t) معادل 0.140 و کمترین مقدار جاکوویدز (t) معادل $4/255$ با بیشترین سازگاری در بین تمام معادلات به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تبخیر- تعرق برای این ایستگاه انتخاب شد. درحالی‌که روش راگووانشی و والندر با داشتن ضریب رگرسیون (R^2) معادل 0.592 و مقدار جاکوویدز (t) معادل $46/506$ به عنوان بدترین روش محاسبه تبخیر- تعرق انتخاب گردید. همچنین روش فائو- ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) در شرایط (پوشش سبز)، بالاترین R^2 را در بین تمام روش‌ها داشته و اما بدلیل خطای بالا $(t= 47/392)$ روش مناسبی برای برآورد تبخیر- تعرق نمی‌باشد.

شکل ۱۲ نتایج برآورد تبخیر- تعرق حاصل از روش‌های مختلف را به صورت نمودار در مقابل روش فائو- پنمن- مانیتث به عنوان روش مرجع نشان داده است. همانگونه که در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود روش اشنایدر برآورد نزدیکتری به روش مرجع و روش‌های محمد و همکاران و فائو- ۲۴ در شرایط (بدون پوشش) کمترین میزان برآورد را در بین تمام روش‌ها داشتند. شکل ۱۳ نیز مقادیر ضریب تشتت برآورد شده توسط ۱۲ روش برآورد تبخیر- تعرق بر اساس تشتت تبخیر را نشان می‌دهد. در این شکل بیشترین میزان ضریب تشتت برآوردی مربوط به روش اشنایدر و کمترین میزان برآورد ضریب تشتت مربوط به روش محمد و همکاران بوده است.

Table 6- Results of evapotranspiration models evaluation in Babolsar station (humid climate)

جدول ۶- نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه بابلسر (اقلیم مرطوب)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R^2 | R | t | R^2/t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|---------|
| Cuena (1989) | 2.199 | 1.305 | -0.292 | 0.573 | 0.757 | 17.012 | 0.034 |
| Allen & pruit (1991) | 2.169 | 1.296 | -0.323 | 0.576 | 0.759 | 19.022 | 0.030 |
| Snyder (1992) | 2.349 | 1.360 | -0.143 | 0.568 | 0.754 | 7.814 | 0.073 |
| Modified Snyder | 2.100 | 1.285 | -0.392 | 0.573 | 0.757 | 23.670 | 0.024 |
| Pereira (1995) | 1.854 | 1.275 | -0.638 | 0.598 | 0.773 | 42.793 | 0.014 |
| Orang (1998) | 2.110 | 1.287 | -0.381 | 0.573 | 0.757 | 22.966 | 0.025 |
| FAO-56 (Allen1998) | 2.057 | 1.273 | -0.435 | 0.579 | 0.761 | 26.917 | 0.021 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 1.806 | 1.370 | -0.685 | 0.551 | 0.742 | 42.777 | 0.013 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 1.710 | 1.340 | -0.781 | 0.570 | 0.755 | 53.153 | 0.011 |
| FAO-24 (Green-veg) | 1.744 | 1.299 | -0.747 | 0.613 | 0.783 | 52.031 | 0.012 |
| Mohamed et al. | 1.690 | 1.348 | -0.801 | 0.572 | 0.756 | 54.702 | 0.010 |
| Christiansen Method | 2.220 | 1.361 | -0.272 | 0.547 | 0.740 | 15.071 | 0.036 |

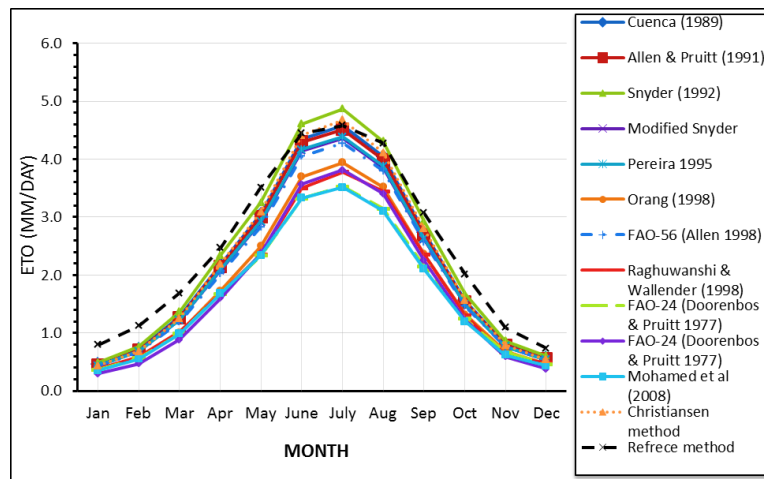


Fig. 16- Evapotranspiration estimated by different methods in Babolsar station

شکل ۱۲- تبخیر- تعرق برآوردی از روش های مختلف ایستگاه بابلسر

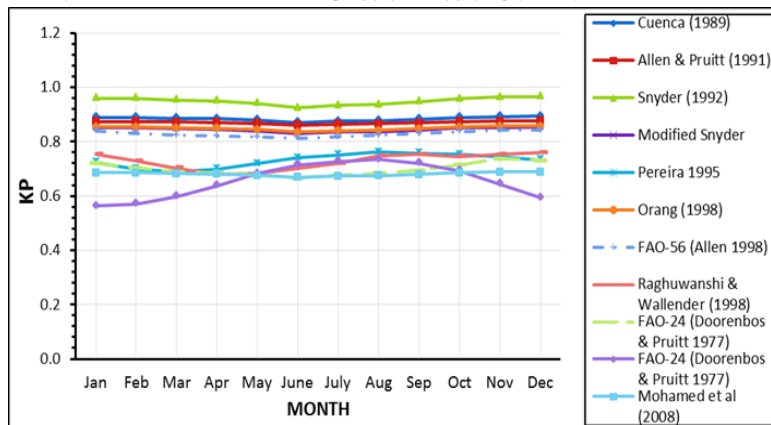


Fig. 17- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Babolsar station

شکل ۱۳- ضریب تشتت برآوردی از روش های مختلف برپایه تشتت تبخیر ایستگاه بابلسر

است. همچنین در این تحقیق، نرخ سالانه تبخیر- تعرق به دو روش فائو- پنمن- مانیتیت و روش های منتخب محاسبه شد. نتایج بدست آمده از محاسبات به روش فائو- پنمن- مانیتیت و نقشه های پهنه بندی تبخیر- تعرق سالانه با استفاده از نرم افزار GIS در شکل های ۱۶ و ۱۷ ارائه شده اند. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که تبخیر- تعرق در طول سال در مناطق شمال کشور در حدود ۹۰۰ تا ۱۱۲۵ میلی متر و مناطق جنوب شرقی و جنوب غربی که بیشترین تبخیر- تعرق در آنها در طول سال رخ می دهد تبخیری معادل ۲۰۰۰ میلی متر در سال است. در پهنه بندی انجام شده توسط روش فائو- پنمن- مانیتیت کمترین میزان تبخیر- تعرق در نوار شمالی و شمال غربی کشور رخ داده و با کاهش ارتفاع و میزان رطوبت نسبی و همچنین افزایش دمای هوا با روندی صعودی به سمت جنوب شرقی افزایش یافته است و بیشترین میزان تبخیر- تعرق در طی دوره ۱۵ ساله آماری در ایران در استان های سیستان و بلوچستان و خوزستان رخ داده است.

بطوری که در شکل ۱۴ دیده می شود روش اشنایدر برآورد نزدیکتری به روش مرجع و روش های محمد و همکاران و فائو- ۲۴ در شرایط (پوشش سبز) کمترین میزان برآورد را در بین تمام روش ها داشتند. شکل ۱۵ مقادیر ضریب تشتت برآورد شده توسط ۱۲ روش برآورد تبخیر- تعرق براساس تشتت تبخیر در ایستگاه بندرانزلی را نشان می دهند. در این شکل بیشترین میزان ضریب تشتت برآوردی مربوط به روش اشنایدر و کمترین میزان برآورد ضریب تشتت مربوط به روش محمد و همکاران بوده است. پس از بررسی و انجام محاسبات آماری مورد نیاز کل ایستگاه های کشور، روش های منتخب برای هر اقلیم بر اساس بالاترین میزان سازگاری (R^2/t) آن روش با روش استاندارد که حاصل از بهترین میزان ضریب همبستگی (R^2) و کمترین میزان معیار خطای جاکویدز (t) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تمام ایستگاه های قرار گرفته در آن اقلیم بودند، انتخاب شدند. برای هر اقلیم سه روش به ترتیب اولیت به عنوان بهترین و بدترین روش های محاسبه ضریب تشتت تبخیر و تبخیر- تعرق در جدول ۸ ارائه شده

رقومی این دو روش در مقابل هم در رسم گردید که در شکل‌های ۱۸ الی ۲۱ نشان داده شده‌اند.

با بررسی و مقایسه اشکال مشاهده می‌گردد که در اکثر نقاط کشور مقادیر برآوردی روش‌های منتخب با مقادیر حاصله از روش مرجع تقریباً مطابقت دارد. با بررسی نقشه‌های بدست آمده از پهنه‌بندی تبخیر- تعرق سالانه به دو روش فائو- پنمن- مانیتث و روش‌های منتخب این نتیجه حاصل می‌شود که بیشترین مساحت کشور دارای تبخیر- تعرق پتانسیلی معادل ۱۸۰۰-۱۱۲۵ میلی‌متر در سال بوده و مساحت کمی از کشور دارای تبخیر- تعرق پتانسیلی بالاتر از ۲۰۰۰ میلی‌متر در سال می‌باشند.

با بررسی نقشه هم تبخیر- تعرق سالانه به روش‌های منتخب (بر پایه تبخیر از تشت) در سطح کشور مشاهده میشود که بیشترین میزان تبخیر- تعرق مربوط به نواحی جنوب غرب کشور و در استان خوزستان به میزان حدوداً ۲۹۰۰-۲۲۵۰ میلی‌متر در سال بوده و بیشتر متعلق به نواحی جنوب شرقی و جنوب غربی بویژه در استان خوزستان و بخش‌هایی از استان ایلام شامل دهلران بوده است. همچنین از مناطق جنوب شرقی و غربی به سمت مرکز کشور این مقدار اندکی کاهش یافته و به ۱۵۰۰-۱۲۰۰ میلی‌متر در رسیده است. این روند کاهشی از مرکز به سمت شمال و ارتفاعات شمال غربی کشور تا میزان ۶۷۵ میلی‌تر ادامه می‌یابد. ضمناً، نتایج حاصل از دو روش فائو- پنمن- مانیتث به عنوان روش استاندارد و روش‌های منتخب، به صورت نقشه

Table 7- Results of evapotranspiration models evaluation in Bandar Anzali station (high humid climate)
جدول ۷- نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه بندرانزلی (اقلیم بسیار مرطوب)

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R ² | R | t | R ² /t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|----------------|-------|--------|-------------------|
| Cuenca (1989) | 2.268 | 1.202 | -0.096 | 0.602 | 0.776 | 5.920 | 0.102 |
| Allen & pruit (1991) | 2.231 | 1.189 | -0.132 | 0.605 | 0.778 | 8.297 | 0.073 |
| Snyder (1992) | 2.437 | 1.280 | 0.073 | 0.596 | 0.772 | 4.255 | 0.140 |
| Modified Snyder | 2.168 | 1.172 | -0.196 | 0.602 | 0.776 | 12.531 | 0.048 |
| Pereira (1995) | 1.840 | 1.125 | -0.524 | 0.651 | 0.807 | 38.926 | 0.017 |
| Orang (1998) | 2.178 | 1.174 | -0.186 | 0.602 | 0.776 | 11.868 | 0.051 |
| FAO-56 (Allen,1998) | 2.090 | 1.133 | -0.273 | 0.620 | 0.787 | 18.406 | 0.034 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 1.694 | 1.259 | -0.670 | 0.592 | 0.769 | 46.506 | 0.013 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 1.745 | 1.184 | -0.619 | 0.615 | 0.785 | 45.341 | 0.014 |
| FAO-24 (Green-veg) | 1.742 | 1.153 | -0.622 | 0.660 | 0.812 | 47.392 | 0.014 |
| Mohamed et al. | 1.747 | 1.204 | -0.617 | 0.601 | 0.775 | 44.168 | 0.014 |
| Christiansen Method | 2.307 | 1.298 | -0.056 | 0.557 | 0.746 | 3.220 | 0.173 |

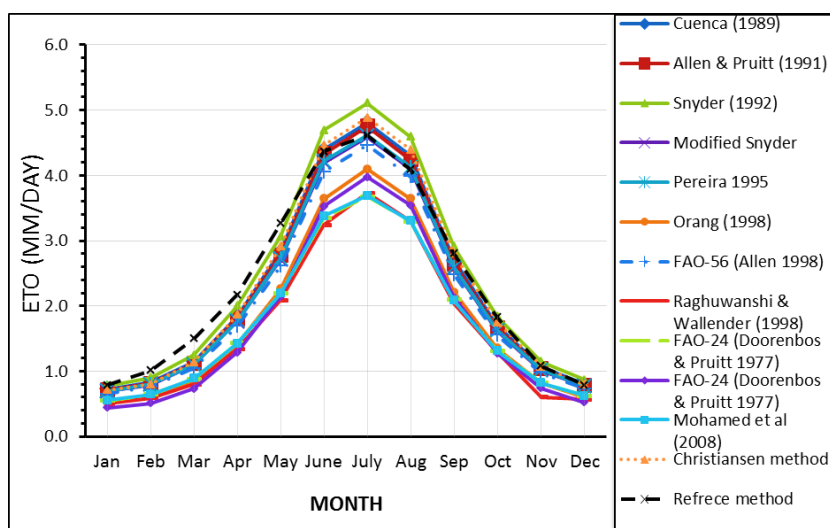


Fig. 18- Evapotranspiration estimated by different methods in Bandar Anzali station
شکل ۱۴- تبخیر- تعرق برآوردی از روش‌های مختلف ایستگاه بندرانزلی

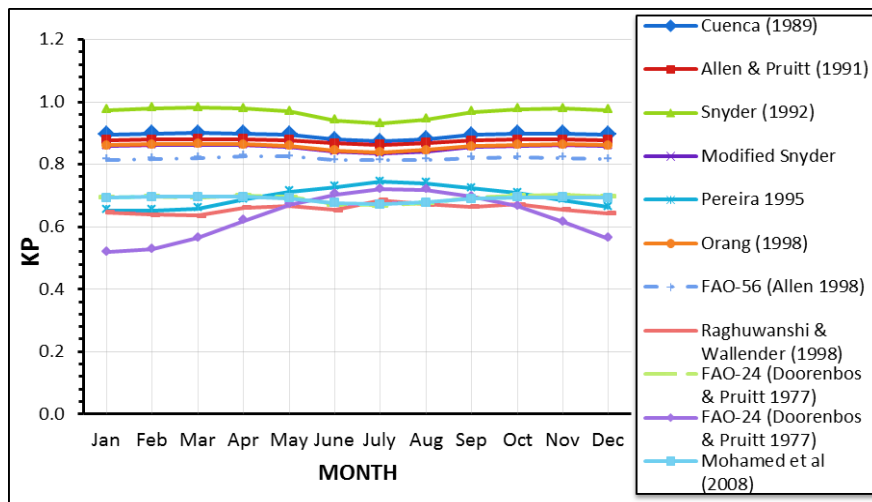


Fig. 19- Estimated Pan Coefficient by using different evaporation pan methods in Bandar Anzali station

شکل ۱۵- ضریب تشت برآوردی از روش‌های مختلف برپایه تشت تبخیر ایستگاه بندرانزلی

Table 8- The best and the worst methods for calculating pan coefficient and evapotranspiration

جدول ۸- بهترین و بدترین روش‌های محاسبه ضریب تشت و تبخیر- تعرق

| | Best Method | Worst Method |
|------------------|--|--|
| Arid | Snyder (1992) | Mohamed et al. (2008) |
| | Allen & Pruitt (1991) | FAO-24 DRY |
| | Raghuwanshi&Wallender/Cuenca (1989) | Christiansen method / FAO-56 (Allen, 1998) |
| Semi-Arid | Raghuwanshi&Wallender | Mohamed et al. (2008) |
| | Snyder (1992) | FAO-24 DRY |
| | Allen & Pruitt (1991) / Pereira (1995) | FAO-24 Green Vegetation |
| Mediterranean | Pereira (1995) | Mohamed et al. (2008) |
| | FAO-24 DRY | Cuenca (1998) |
| | Raghuwanshi&Wallender | Snyder (1992) |
| Semi-Humid | Mohamed et al. (2008) | Modified Snyder |
| | FAO-24 DRY | Allen & Pruitt (1991) |
| | Raghuwanshi & Wallender | Pereira (1995) |
| Humid | Pereira (1995) | Snyder (1992) |
| | FAO-24 DRY | Mohamed et al. (2008) |
| | Raghuwanshi & Wallender | FAO-56 (Allen, 1998) |
| High Humid (Wet) | Mohamed et al. (2008) | Snyder (1992) |
| | FAO-24 DRY | FAO-56 (Allen, 1998) |
| | FAO-24 Green Vegetation | |

تعرق مربوط به ماه تیر با مقدار ۲۱۸/۲ میلی‌متر بدست آمد. کمترین میزان تبخیر- تعرق در ماه دی با مقدار ۲۷/۲ میلی‌متر اتفاق افتاد. مجموع کل تبخیر- تعرق گیاه چمن در طی یک سال داده برداری برابر با ۱۳۵۷/۲۴ میلی‌متر بود. پس از محاسبه تبخیر- تعرق به روش مستقیم، نتایج به دست آمده از لایسیمتری با نتایج محاسبه شده از طریق ۱۲ روش محاسباتی بر پایه تشت تبخیر معرفی شده با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج ارزیابی روش‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری در جدول ۹ ارائه شده و همچنین نتایج مندرج در شکل ۲۲ قابل مشاهده

۳-۱- نتایج لایسیمتری حاصل از برآورد تبخیر- تعرق گیاه

مرجع

میزان تبخیر- تعرق چمن طی یک سال از May 2014 تا 2015 May به طور مستقیم و روزانه از ایستگاه لایسیمتری اندازه‌گیری شد. پارامترهای هواشناسی مورد استفاده در این ارزیابی از تاریخ ۲۰۱۴/۵/۱۶ الی ۲۰۱۵/۵/۱۶ از ایستگاه هواشناسی مستقر در فاصله یکصد متری ایستگاه لایسیمتری اخذ شدند. بالاترین میزان تبخیر-

روش‌های محاسباتی تبخیر- تعرق در ایستگاه کرمانشاه با اقلیم نیمه خشک بودند. نتایج بدست آمده از آزمایشات لایسیمیتری و محاسبات انجام شده برای اقلیم‌های نیمه خشک کشور مطابقت داشت. روش فائو- پنمن- مانتیث با داشتن بیشترین ضریب همبستگی ($R^2=0/81$) و کمترین میزان مربعات خطا ($RMSE=1/00$) در بین تمام روش‌ها مطابقت بالاتری با داده‌های لایسیمیتری داشته و نشان دهنده آن است که انتخاب روش فائو- پنمن- مانتیث به عنوان روش استاندارد صحیح بوده و با نتیجه تحقیق شهابی فر و همکاران (Shahabifar et al., 2010) مطابقت دارد.

است. بر اساس این نتایج روش‌های پرییرا، اورنگ، فائو- ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) پوشش سبز) به دلیل داشتن بالاترین میزان ضریب همبستگی، شاخص R^2/t و کمترین میزان ضریب جاکوویز (t) به ترتیب نزدیک ترین نتیجه را با نتایج لایسیمیتری داشته‌اند و همچنین روش‌های راگوانشی و والندر (Raghuwansi & Wallender, 1998)، فائو- ۲۴ (Doorenbos and Pruitt, 1997) بدون پوشش) و روش کریستیانسن، به دلیل داشتن پایین‌ترین میزان ضریب همبستگی، شاخص R^2/t و بیشترین میزان ضریب جاکوویز (t) نامناسب‌ترین

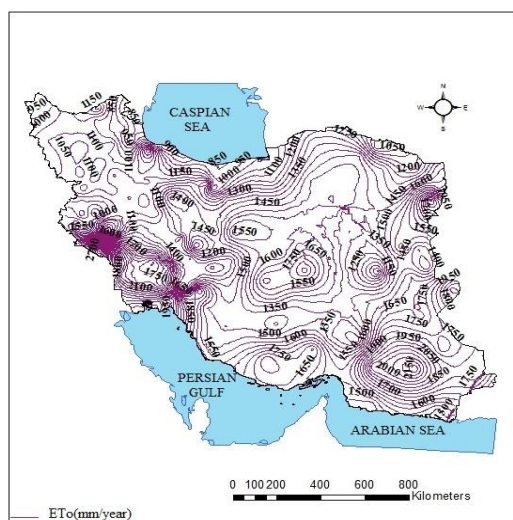


Fig. 21- Unique evapotranspiration points map using the reference method

شکل ۱۷- نقشه نقاط هم تبخیر- تعرق سالانه به روش مرجع

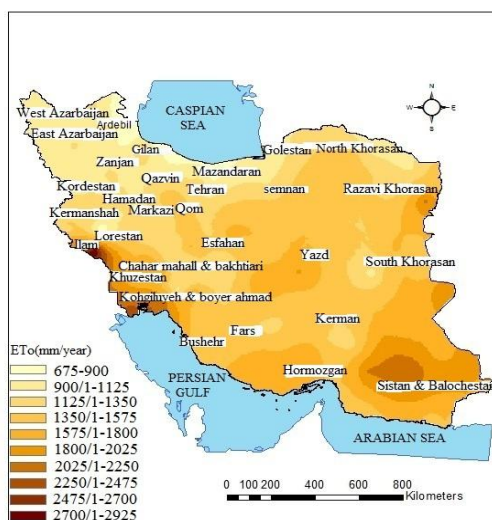


Fig. 20- Evapotranspiration zoning map using the reference method

شکل ۱۶- نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق سالانه به روش مرجع

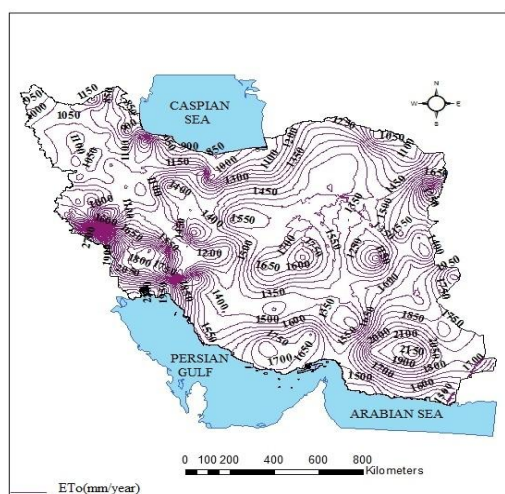


Fig. 23- Annual evapotranspiration unique points using selected method

شکل ۱۹- نقشه نقاط هم تبخیر- تعرق سالانه به روش‌های منتخب

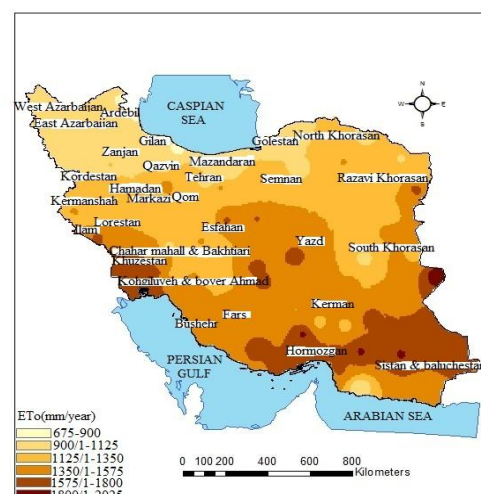


Fig. 22- Evapotranspiration zoning map using selected method

شکل ۱۸- نقشه پهنه‌بندی تبخیر- تعرق سالانه به روش‌های منتخب

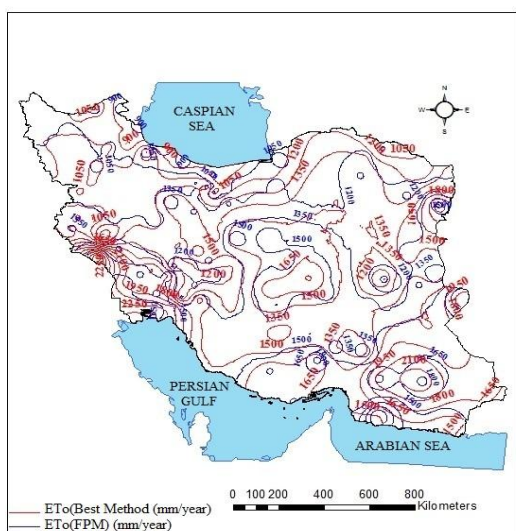


Fig. 25-Map of the comparing reference method with the selected method (mm/year)
 شکل ۲۱- نقشه مقایسه نقاط هم تبخیر- تعرق سالانه به دو روش فائو- پنمن- مانیتث و روشهای منتخب

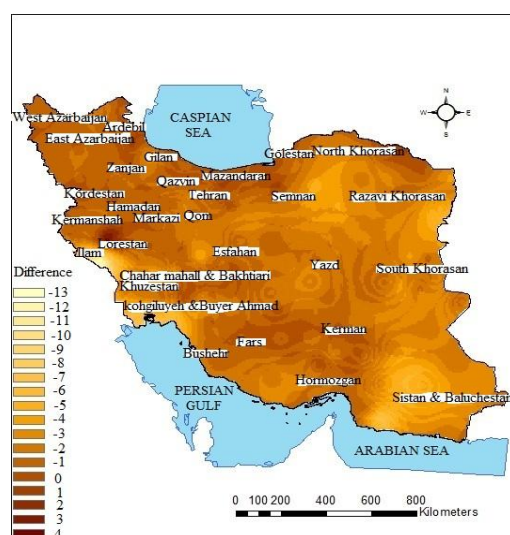


Fig. 24- Map of difference evapotranspiration values using the reference and selected method
 شکل ۲۰- نقشه اختلاف تبخیر- تعرق سالانه برآوردی به دو روش فائو- پنمن- مانیتث و روشهای منتخب

Table 9- The results of evapotranspiration models evaluation in Kermanshah station
 جدول ۹- نتایج ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر- تعرق در ایستگاه کرمانشاه

| Index Method | MEAN | RMSE | MBE | R ² | R | t | R ² /t |
|--------------------------------|-------|-------|--------|----------------|-------|--------|-------------------|
| Cuena (1989) | 3.238 | 2.391 | -0.159 | 0.704 | 0.839 | 1.267 | 0.187 |
| Allen & pruit (1991) | 3.266 | 1.855 | -0.132 | 0.699 | 0.836 | 1.351 | 0.151 |
| Snyder (1992) | 3.262 | 1.845 | -0.136 | 0.703 | 0.838 | 1.400 | 0.150 |
| Modified Snyder | 3.312 | 1.869 | -0.085 | 0.712 | 0.844 | 0.868 | 0.175 |
| Pereira (1995) | 3.385 | 1.930 | -0.013 | 0.729 | 0.854 | 0.126 | 0.229 |
| Orang (1998) | 3.358 | 1.894 | -0.039 | 0.712 | 0.844 | 0.393 | 0.202 |
| FAO-56 (Allen,1998) | 2.945 | 1.759 | -0.453 | 0.699 | 0.836 | 5.056 | 0.077 |
| Raghuwanshi & wallender (1998) | 1.578 | 2.747 | -1.820 | 0.436 | 0.660 | 16.785 | 0.019 |
| FAO-24 (Dry-veg) | 2.293 | 1.907 | -1.105 | 0.705 | 0.840 | 13.488 | 0.034 |
| FAO-24 (Green-veg) | 3.260 | 1.872 | -0.138 | 0.734 | 0.857 | 1.404 | 0.158 |
| Mohamed et al. | 2.601 | 1.774 | -0.796 | 0.710 | 0.843 | 9.533 | 0.047 |
| Christiansen Method | 2.586 | 1.829 | -0.811 | 0.676 | 0.822 | 9.387 | 0.046 |
| FAO-Penman-Monteith | 3.623 | 0.001 | -0.082 | 0.81 | 0.90 | 1.552 | 0.524 |

لایسیمتری در لیست روش‌های منتخب برای ایستگاه کرمانشاه قرار نگرفت.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق تمامی ایستگاه‌های سینوپتیک ایران با استفاده از روش اقلیم‌بندی دوارتن به ۶ دسته اقلیمی خشک، نیمه خشک، مدیترانه ای، مرطوب، نیمه مرطوب و بسیار مرطوب دسته‌بندی شدند.

شکل ۲۲ نتایج برآورد تبخیر- تعرق حاصل از داده‌های برداشت شده از لایسیمتر و روش‌های مختلف را در مقابل روش فائو- پنمن- مانیتث به عنوان روش مرجع نشان داده است. همانطور که در شکل ۲۶ دیده می‌شود روش فائو- پنمن- مانیتث برآورد نزدیکتری به داده‌های لایسیمتری و روش راگوانشی و والندر نامناسب‌ترین میزان برآورد را در بین تمام روش‌ها داشته‌اند. روش فائو- ۵۶ نیز مطابقت خوبی با داده‌های لایسیمتری داشته ولی به دلیل پایین بودن میزان ضریب همبستگی این روش با داده‌های

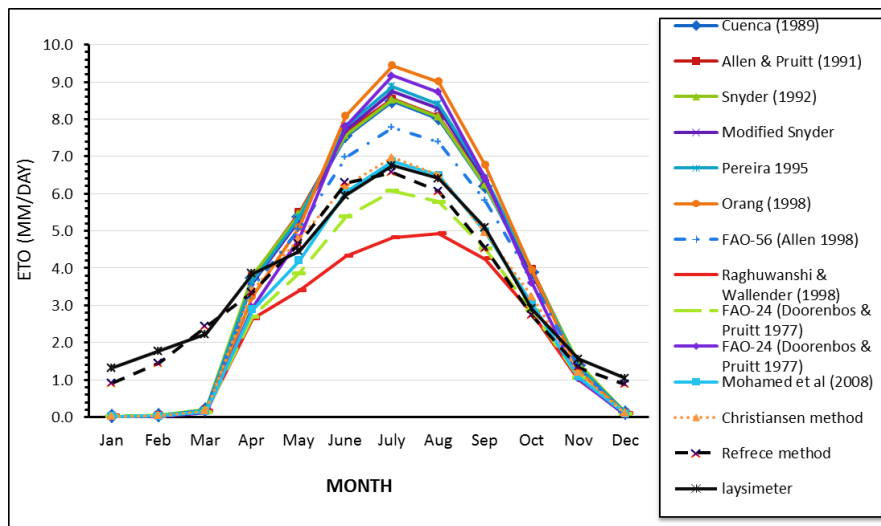


Fig. 26- Measurement and estimate evapotranspiration diagrams by different methods in Kermanshah station (semi arid climate)

شکل ۲۲- نمودار تبخیر- تعرق اندازه‌گیری شده و برآورد شده از روش‌های مختلف در کرمانشاه (اقلیم نیمه خشک)

و همکاران و فائو- ۵۶ (Allen et al., 1998) بهترین و روش‌های راگوانشی و والندر و فائو- ۲۴ در شرایط خشک در شرایط پوشش سبز بدترین روش‌ها بدست آمدند. در ایستگاه کرمانشاه نیز با اقلیم نیمه خشک، داده‌های لایسیمتری به مدت یک سال برای گیاه چمن برداشت شد. پس از ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر- تعرق گیاه مرجع با نتایج بدست آمده از لایسیمترها در ایستگاه کرمانشاه، مشخص شد که روش فائو- پنمن- مانیتث با بالاترین مقدار شاخص سازگاری R^2/t و ضریب همبستگی R^2 و کمترین میزان RMSE را نسبت به تمام روش‌ها را داشت که نشان‌دهنده انتخاب این روش به عنوان روش مرجع جهت ارزیابی سایر روش‌ها در سایر ایستگاه‌ها کاملاً صحیح بوده است. در رده‌های بعدی روش‌های فائو- ۲۴ در شرایط پوشش سبز به دلیل داشتن بالاترین مقدار R^2 ، اورنگ (Orang, 1998) و پیریا نیز با داشتن کمترین مقادیر ضریب (t) مناسب‌ترین و روش راگوانشی و والندر نامناسب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر/تعرق گیاه مرجع بودند. همچنین نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر- تعرق و مناطق هم تبخیر- تعرق رسم شده برای ایران نشان‌دهنده انطباق مقادیر برآورد شده توسط روش‌های منتخب (تشت تبخیر) با مقادیر روش مرجع بود. ضمناً مقایسه نتایج حاصل از مطالعات لایسیمتری در اقلیم نیمه خشک صحت روش‌های انتخابی را تایید نمود. نتایج حاصله از این تحقیق نشانگر تبخیر- تعرق پتانسیل سالیانه‌ای معادل ۹۰۰ تا ۱۱۲۵ میلی‌متر و ۲۰۰۰ میلی‌متر به ترتیب در مناطق شمالی و مناطق جنوب‌شرقی و جنوب غربی کشور میباشد. در این تحقیق نتایج بدست آمده با نتایج منتشر شده توسط Ameri et al. (2008) و Estahbani and Bakhtiary (2016) که برای اصفهان و کرمان با اقلیم (خشک)

همچنین از ۱۲ مدل مختلف جهت محاسبه تبخیر- تعرق مرجع بر اساس تشت تبخیر با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه برای کل کشور استفاده شد. سپس مقادیر برآورد شده توسط این مدل‌ها با مقادیر برآورد شده توسط روش فائو- پنمن- مانیتث به عنوان روش استاندارد برای ایستگاه‌های مختلف، مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفتند. پس از انجام ارزیابی، روشی که بالاترین میزان شاخص سازگاری R^2/t ، میزان ضریب همبستگی، کمترین میزان RMSE و کمترین میزان ضریب خطای جاکوویز (t) را در بین تمام روش‌ها داشتند، به عنوان بهترین روش محاسبه تبخیر- تعرق در آن اقلیم معرفی شدند. نتایج بدست آمده نشانگر آن هستند که در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور روش‌های محمد و همکاران (Mohamed et al., 2008)، فائو- ۲۴ در شرایط بدون پوشش (Doorenbos and Pruitt, 1997) و کریستیانسن (بر اساس روش Jensen et al., 1990) مناسب‌ترین و روش‌های راگوانشی و والندر (Raghuwanshi & Wallender, 1998)، آلن و پروت (Allen & Pruitt, 1991) و اشنایدر (Snyder, 1992) نامناسب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق بودند. برای اقلیم مدیرانه‌ای روش‌های محمد و همکاران، کونیکا (Cuenca, 1989) و اشنایدر مناسب‌ترین و روش‌های پیریا (Pereira et al., 1995)، فائو- ۲۴ در شرایط خشک و راگوانشی و والندر به عنوان نامناسب‌ترین روش‌های برآورد تبخیر- تعرق شناخته شدند. در اقلیم‌های نیمه مرطوب روش‌های اشنایدر اصلاح شده، آلن و پروت و پیریا مناسب‌ترین و روش‌های محمد و همکاران، راگوانشی و والندر و فائو- ۲۴ در شرایط خشک نامناسب‌ترین روش‌ها بودند. برای اقلیم‌های مرطوب و بسیار مرطوب نیز روش‌های اشنایدر محمد

- Resources Management. Tabriz. 8p. https://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03_175.html (In Persian)
- Bayatvarkeshi M, and Abyaneh H Z (2014) Validating pan coefficient equations to estimate reference evapotranspiration in comparing with lysimeter data of grass crop. *Global Journal on Advances in Pure & Applied Sciences* [Online], 2: 9-18
- Cuenca R H (1989) *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, p 133
- Doorenbos J, Pruitt W O (1977) *Crop water requirements*. FAO, Rome, FAO Irrigation and Drainage. paper no. 24 (rev.)
- Estehbanati S and bakhtiari M (2016) Comparing evapotranspiration obtained from some of pan evaporation equations using ASCE Standard Penman-Monteith model in an arid climate. *Journal of Irrigation & Water Engineering* 6(24):90-102 (In Persian)
- Ghamarnia H, Daechin S, Jalili Z, Farmani M, Razdar B (2012) Comparing the coefficient estimates pan evaporation method s to calculate reference crop evapotranspiration (Case study: Synoptic station of Zanjan). In: Proc. Third National Conference on Integrated Water Resources Management. Tabriz. 10p. https://www.civilica.com/Paper-NCUIMWR03-NCUIMWR03_150.html (In Persian)
- Ghamarnia H, Mousabeygi F, Amiri S, Amirkhani D (2015) Evaluation of a few evapotranspiration models using lysimetric measurements in a semi arid climate region. *International Journal of Plant & Soil Science* 5(2):100-109 (In Persian)
- Grismer M, Orang Morteza and Matyac Scott (2002) Pan evaporation to evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 128(3):180-184
- Gundekar H G (2004) *Evapotranspiration estimation methods and development of crop coefficients for some crops in semi-arid region*. An unpublished M.Tech Dissertation submitted to Marathwada Agricultural university Parbhani, Maharashtra, India
- Irmak S, Haman D Z, and Jones J W (2002) Valuation of class pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE 128(3):153-159
- Jensen M E, Burman R D, and Allen R G (1990) *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. ASCE, Manual and Report on Engineering Practice. No.70. New York
- بهترین روش ضریب تشت در تخمین تبخیر و تعرق روزانه را به ترتیب روشهای (پریبرا و همکاران و دورنبوس و پرویت) و آلن و پروت اعلام نموده‌اند مطابقت ندارد. همچنین نتایج منتشر شده توسط (Kaboosi (2012) و Sharifian & Ghahraman (2007) که بهترین روشها برای گرگان و زنجان (با اقلیم نیمه خشک) را به ترتیب روشهای اشنایدر و اورنگ همچنین (Akbari (2010) و Yazdani et al. (2011) به ترتیب بهترین روشهای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل را برای ساری و امل با (اقلیم مرطوب) را روشهای اورنگ و اشنایدر و (Rahimi Khoob (2008) برای نوشهر (با اقلیم بسیار مرطوب) روش اورنگ را پیشنهاد کرده‌اند، مطابقت ندارد. بطور کلی، نتایج بدست آمده در این تحقیق با هیچکدام از نتایج گزارش شده توسط سایر محققین مطابقت نداشته است. علت عدم تطابق روشهای اعلام شده با نتایج منتشر شده را احتمالاً میتوان در وسعت بررسی لحاظ شده (کل کشور) و همچنین طولانی‌تر بودن مدت زمان بررسی روشهای مختلف دانست. ضمناً در این تحقیق کلیه معادلات پیشنهادی برآورد ضریب تشت شامل ۱۲ روش که تا کنون توسط محققان مختلف وضع و منعکس شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالی که بعضی از روشهای مد نظر قرار داده شده نظیر روشهای محمد و همکاران، فائو-۲۴ در شرایط پوشش سبز (Green Vegetation) و بدون پوشش (Dry Vegetation) در تحقیقات پیشین توسط سایر محققین در اقلیم‌های مختلف تا کنون مورد ارزیابی و مقایسه قرار نگرفته‌اند.

۵- مراجع

- Akbari D (2010) Estimation of pan coefficient for calculating evapotranspiration (Case Study: Sari Synoptic Station). *Journal of Research in Agricultural Sciences* 2(7):65-74 (In Persian)
- Alizadeh A (2006) *The principles of applied hydrology*. Astane Ghodse Razavi Publications. 872p (In Persian)
- Alizadeh A (2009) *Water, soil and plant relationship*. Kankash Pub. 415p (In Persian)
- Allen R, Pruitt W O (1991) FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE* 117(5):758-773
- Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M (1998) *Crop evapotranspiration*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO. Rome. Italy. 293 p
- Amiri M, Abedikoopaei J, Khazaei M (2008) Estimation best method of class A pan coefficient for estimating daily evapotranspiration in Esfahan province. In: Proc. Third National Conference on Integrated Water

- evapotranspiration. *Journal of The Earth and Space Physics* 38(1):229-240 (In Persian)
- Shokri S, Hooshmand A R, Ghorbani M (2016) The estimation evaporation pan coefficient for calculating reference evapotranspiration in Ahvaz. *Journal of Irrigation Science and Engineering*. 40(1):1-12 (In Persian)
- Seifi A, Mirlatifi S M, Riahi H (2011) Developing a combined model of multiple linear regression-principal component and factor analysis (MLR-PCA) for estimation of reference evapotranspiration (Case study: Kerman station). *Journal of Water and Soil* 24(6):1186-1196 (In Persian)
- Shahabifar M, Asari M, koochakzadeh M, Mirlatifi M (2010) Lysimetric evaluation of common methods of calculating standard grass reference crop evapotranspiration in greenhouse. *Iranin Journal of Water Research in Agriculture (Formerly Soil and Water Science)* 24(1B):13-19 (In Persian)
- Sharifian H, Ghahraman B, (2007) Evaluation and comparison estimated reference evapotranspiration from evaporation with ETo standard method in Gorgan. *Journal of Agricultur Science And Nature Resourse* 13(5):18-28 (In Persian)
- Snyder R L (1992) Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 118(6):977-980
- Snyder R L, Orang M, Matyac S, Mark E, Grismer M (2005) Simplified estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation data in california. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 131(3):249
- Yazdani V, Liaghat A, Noori H, Noori H, Zare Abianeh H (2011) A determination of the best model for calculation of pan coefficient in Amol as based on sensitivity analysis. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 42(1):9-17 (In Persian)
- Zare abayneh H, Bayat Varkeshi M, Sabziparvar A A, Marofi S, Ghasemi A (2010) Evaluation of different reference evapotranspiration methods and their zonings in Iran. *Journal of Physical Geography Research Quarterly* 42(74):95-109 (In Persian)
- Zare abayneh H, Noori H, Liaghat A, Noori H, Karimi V (2011) Comparison of Penman- Monteith FAO method and class A pan evaporation with lysimeter measurements in estimation of rice evapotranspiration in Amol region. *Journal of Physical Geography Research Quarterly* 43(76):71-83 (In Persian)
- Jensen M E (ed.) (1974) *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. Irrigation and Drainage. Div. Rep. ASCE. New York. 89:15-41
- Kaboosi K (2012) The investigation of error of pan evaporation data, estimation of pan evaporation coefficient by pan data and its comparison with empirical equations. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 4(19):1458-1465
- Mohamed H, Wahed A, Snyder R L (2008) Simple equation reference evapotranspiration from evaporation pans surrounded by fallow soil. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE* 134(4):425-429
- Mousavi Beygi M, Erfan M, Sarmad M (2009) Estimation of reference crop evapotranspiration using the least meteorological data (Study caes: khorasan Razavi province). *Journal of Water and Soil* 1:91-99 (In Persian)
- Orang M (1998) Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 Table. Unpublished Rep. Calif. Department of Water Resources, Sacramento
- Pereira A R, Villanova N, Pereira A S, Baebieri V A (1995) A model for the class-A pan coefficient. *Agric Water Manage* 76:75-82
- Raghuwanshi N S, Wallender W W (1998) Converting from pan evaporation to evapotranspiration. *Journal of Irrigation And Drainage Engineering* 124(5):275-277
- Rahimi Khoob A (2008) Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. *Journal of Irrigation Science* 27:35-39 (In Persian)
- Rosenberg N J and Powers W (1970) Potential for evapotranspiration and its manipulation in the plains region, Proc. Symp. Evapotranspiration Great Plains, Great Plains Agric. Council Publ. (50):275-300
- Sabziparvar A A, Bayatvarkeshi M, Ghasemi A (2008) Evaluation of different methods for estimating evapotranspiration in two different climates (Case study: Hamadan, Karaj, Gorgan). In: Proc. Third National Conference on Integrated Water Resources Management. Tabriz. 7p. https://www.civilica.com/Paper-WRM03-WRM03_178.html (In Persian)
- Sabziparvar A A, Shadmani M (2012) Evaluation of pan coefficients from ANN, ANFIS, and empirical methods, for estimation of daily reference