

Research Article

Evaluating the Accuracy of Methods for Estimating the Coefficient of Pan to Calculate Daily Evapotranspiration in the East of Lake Urmia Basin

V Mouneskhah^{1*}, S Samadiafard²

Received: June 22, 2022

Accepted: September 5, 2022

Revised: September 4, 2022

Published online: December 22, 2023

1-Ph.D. student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

2-Assoc. Prof., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz

* Corresponding Author, Email: vahid.mounesxah@yahoo.com

Abstract

Background and Objectives

One of the first steps for optimal management of water consumption in the agricultural sector is to estimate water needs by determining evapotranspiration. There are several direct and indirect methods for estimating evapotranspiration; each one has advantages and disadvantages. Due to the importance of measuring evapotranspiration in most hydrological studies and estimating the water requirement of plants and due to the limitation of the possibility of direct measurement, there is a serious need for experimental methods to estimate evapotranspiration. In the present study, reference evapotranspiration was initially estimated at selected stations in the east of Lake Urmia. Then, experimental methods of calculating the pan coefficient were used to calculate the reference evapotranspiration using evaporation pan data considering the FAO standard method.

Methodology

The aim of this study was to evaluate the accuracy of pan coefficient estimation methods to calculate daily evapotranspiration in the east of Lake Urmia basin. There are several direct and indirect methods for estimating evapotranspiration; each one has advantages and disadvantages. The evaporation pan method has been used to estimate evapotranspiration values. For this purpose, data from Tabriz, Sarab, Maragheh, Bostanabad and HERRIS synoptic stations located in the east of Urmia Lake basin were used. The meteorological data utilized in the current study are minimum, average and maximum temperature, sunny hours, minimum, average and maximum relative humidity, wind speed, and evaporation from the pan. It is worth mentioning that due to the limitation of recording evaporation pan data, the present study was carried out using data for 6 months of the year (May to October) in which continuous data are available. The values of the pan coefficient were estimated using six experimental methods including Konica, Allen and Parvit, Snyder, modified Snyder, Orang and Mohammad et al. To determine the best method for estimating the pan coefficient, the evapotranspiration values obtained from the application of each method were compared with the evapotranspiration values obtained from the standard FAO-Penman-Monteith method. Furthermore, statistical meters of R, RMSE, MAE and box and violin plot diagrams were used to evaluate the obtained results.



Findings

In this study, six experimental models were used to estimate the pan coefficient. Based on the obtained results, the highest range of average monthly changes of the pan coefficient is related to the Orang method. Also, considering the average monthly values obtained for the pan coefficient, the Orang method estimates the reference evapotranspiration to a considerable amount. The results showed that in Bostanabad and Harris modified Snyder method, in Sarab and Maragheh method of Mohammad et al. and in Tabriz Allen and Parvit method are the best methods for estimating pan coefficient. Also, in general, in all stations, the Orang method has the highest error in estimating pan coefficient. In order to use experimental models for estimating the pan coefficient to calculate evapotranspiration, it is necessary to determine the appropriate model for each region based on the climatic conditions.

Conclusion

Due to the importance of estimating reference evapotranspiration in most hydrological studies as well as estimating the water requirement of plants, several direct and indirect methods have been developed. In the present study, six models of estimating the pan coefficient were evaluated in order to calculate the daily reference evapotranspiration using evaporation pan data. The obtained results showed that in general, the models for estimating the coefficient of the pan with acceptable accuracy can be used to calculate evapotranspiration. Meanwhile, due to the effect of climatic factors in these models, it is necessary to evaluate the efficiency of each model in different climatic conditions and determine the appropriate model for each region. For example, the results of the present study showed that the Orang method for the study area (east of Lake Urmia) does not provide suitable results and if this model is used for the east of Lake Urmia, it is necessary to calibrate the model. Also, based on the obtained results, the accuracy of other methods is close to each other. In Bostanabad and Herris, the modified Snyder method, in Sarab and Maragheh, the method of Mohammad et al., and in Tabriz, the method of Allen and Parvit, are the best methods in estimating daily reference evapotranspiration.

Keywords: East of Lake Urmia, Evapotranspiration, Experimental methods, FAO-Penman-Monteith method, Pan coefficient.

مقاله پژوهشی

ارزیابی دقت روش‌های برآورد ضریب تشت به منظور محاسبه تبخیر-تعرق روزانه در شرق حوضه دریاچه ارومیه

وحید مونس خواه^{*}، سعید صمدیان فرد^۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

تاریخ انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

۲- دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

*مسئول مکاتبات؛ پست الکترونیکی: vahid.mounesxah@yahoo.com

چکیده

یکی از اقدامات اولیه در راستای مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی، برآورد نیاز آبی از طریق محاسبه تبخیر-تعرق می‌باشد. در مطالعه حاضر برای برآورد تبخیر-تعرق در شرق حوضه دریاچه ارومیه، از روش تشت تبخیر استفاده شده است. برای این منظور از داده‌های ایستگاه‌های سینوپنیک تبریز، سراب، مراغه، بستان‌آباد و هریس واقع در شرق حوضه دریاچه ارومیه استفاده گردید. مقادیر ضریب تشت با استفاده از شش روش تجربی شامل کونیکا، آلن و پرویت، اشنایدر، اشنایدر اصلاح شده، اورنگ و محمد و همکاران برآورد گردید. برای تعیین بهترین روش برآورد ضریب تشت نیز، مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از هر روش با مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت مقایسه شد. به منظور ارزیابی نتایج نیز از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف مطلق (MAD) و دیاگرام‌های باکس و ویولن پلات استفاده شد. نتایج نشان داد که در بستان-آباد روش اشنایدر اصلاح شده، در تبریز روش آلن و پرویت، در سراب روش محمد و همکاران، در مراغه روش محمد و همکاران و در هریس روش اشنایدر اصلاح شده به ترتیب با مقادیر RMSE معادل ۱/۳۳، ۲/۰۲، ۱/۴۷، ۱/۴۹ و ۱/۳۷ میلی‌متر بر روز بهترین روش برآورد ضریب تشت می‌باشند. همچنین به‌طور کلی در تمام ایستگاه‌ها، روش اورنگ بیشترین خطا را در برآورد تبخیر-تعرق مرجع روزانه دارد. به‌منظور کاربرد دقیق‌تر مدل‌های تجربی برآورد ضریب تشت برای محاسبه تبخیر-تعرق، لازم است مدل مناسب برای هر منطقه تعیین شده و در صورت لزوم بر اساس شرایط اقلیمی منطقه مورد نظر واسنجی شود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق، روش فائو-پنمن-مانتیت، روش‌های تجربی، شرق دریاچه ارومیه، ضریب تشت

مقدمه

یکی از مسائل مهم در مطالعات هیدرولوژیکی، اندازه‌گیری دقیق مقادیر تبخیر-تعرق به‌منظور برآورد نیاز آبی گیاهان است. با توجه به اهمیت مسأله، روش‌های مستقیم و غیر مستقیم مختلفی برای برآورد تبخیر-تعرق در مناطق مختلف اقلیمی مورد استفاده پژوهشگران قرار گرفته است. روش لایسیمتر، روش تشت تبخیر، استفاده از روابط تجربی، روش‌های داده-کاوی و هوش مصنوعی و استفاده از تکنیک سنجش از دور از جمله این موارد هستند (سبزی‌پرور و همکاران ۲۰۱۰؛ مجیدی و همکاران ۲۰۱۴؛ نجفوند دریکوند و اسلامی ۲۰۱۶؛ مونس‌خواه و همکاران ۲۰۲۰). روش پنمن مانیتث فائو، به‌عنوان بهترین روش برآورد تبخیر-تعرق پیشنهاد شده است؛ همچنین بر استفاده از روش تشت تبخیر کلاس A در ایستگاه‌های با محدودیت داده‌های مورد نیاز روش پنمن مانیتث فائو برای برآورد تبخیر-تعرق تأکید شده است (آلن و همکاران ۱۹۹۸). روش تشت تبخیر جزء روش‌های مستقیم و یکی از راه‌های مرسوم به‌منظور اندازه‌گیری تبخیر می‌باشد که تبخیر را به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند و نتایج حاصل از آن قابل تعمیم به تبخیر از سطوح آزاد آبی، مخازن و تبخیر و تعرق در کشاورزی است (ایرماک و همکاران ۲۰۰۲). گریسمر و همکاران (۲۰۰۲) با استفاده از معادلات تجربی، مقادیر ضریب تشت را برای منطقه کالیفرنیا محاسبه نموده و مقادیر ET_0 را محاسبه نمود. ایشان مقادیر به‌دست آمده را با مقادیر ET_0 محاسباتی با استفاده از روش استاندارد پنمن مانیتث فائو مقایسه کردند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که روش آلن و پروت و روش اشنایدر از دقت بالاتری برای برآورد ضریب تشت برخوردار است. گاندکر (۲۰۰۴) نیز در پژوهشی که در منطقه ماهاراشتاور هند انجام داد، گزارش کرد که مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل به‌دست آمده با ضریب اشنایدر با مقادیر به‌دست آمده از روش

استاندارد فائو بیشترین همبستگی را داشته است. سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) به ارزیابی هفت روش برآورد ضریب تشت در دو ناحیه اقلیمی در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که در شرایط اقلیمی سرد نیمه‌خشک به‌ترتیب روش‌های اورنگ و راگوانشی-والندر و در شرایط اقلیمی گرم و خشک به‌ترتیب روش‌های اشنایدر و اورنگ بهترین برآورد را داشتند. کابوسی (۲۰۱۲) در مطالعه‌ای به‌منظور برآورد ضریب تشت در منطقه گرگان، مقادیر ضریب تشت به‌دست آمده از روش اشنایدر را نسبت به سایر روش‌ها دقیق‌تر ارزیابی کردند. شریفیان و قهرمان (۲۰۰۶) در مطالعه‌ای به مقایسه تبخیر-تعرق برآورد شده از تشت تبخیر با مقادیر حاصل از روش استاندارد در منطقه گرگان پرداختند. بررسی‌های رگرسیونی و آماری نشان داد که روش‌های اورنگ و اشنایدر اصلاح‌شده برای برآورد مقادیر تبخیر-تعرق روزانه، روش‌های کونیکا و اشنایدر اصلاح‌شده و آلن-پروت برای تخمین مقادیر تبخیر-تعرق ۱۰ روزه و روش‌های اشنایدر اصلاح‌شده و کونیکا برای محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق ماهانه در منطقه مورد مطالعه مناسب هستند. اکبری‌نودهی (۲۰۱۰) با استفاده از داده‌های روزانه ایستگاه سینوپتیک ساری، مقادیر ET_0 روزانه را با استفاده از روش استاندارد پنمن مانیتث فائو محاسبه نمود. ایشان همچنین مقادیر ET_0 را با استفاده از داده‌های تشت تبخیر محاسبه کرده و با نتایج روش استاندارد مقایسه نمود. بررسی‌های رگرسیونی و آماری نشان داد که در بین چهار روش مورد استفاده برای محاسبه ضریب تشت شامل آلن و پروت، اشنایدر، کونیکا و اورنگ، روش اورنگ برای محاسبه مقادیر ET_0 روزانه و ماهانه در ایستگاه ساری دقت بیشتری دارد. حسین‌آبادی و خاشعی سیوکی (۲۰۱۹) به‌منظور ارائه رابطه‌ای نوین برای برآورد ضریب روزانه تشت تبخیر با استفاده از برنامه‌ریزی بیان ژن، مقادیر روزانه ضریب تشت را با استفاده از چهار روش تجربی و مدل برنامه‌ریزی بیان

ایستگاه‌های هواشناسی و نیز نیاز اغلب روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تعرق به داده‌های متنوع هواشناسی، در مطالعه حاضر ابتدا تبخیر-تعرق مرجع در ایستگاه‌های منتخب در شرق حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از روش استاندارد فائو ۵۶ برآورد گردید. در ادامه از روش‌های تجربی محاسبه ضریب تشت به-منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های تشت تبخیر استفاده شد تا با در نظر گرفتن روش استاندارد فائو ۵۶ برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع، بهترین روش برآورد ضریب تشت برای ایستگاه‌های منتخب در شرق حوضه دریاچه ارومیه تعیین گردد.

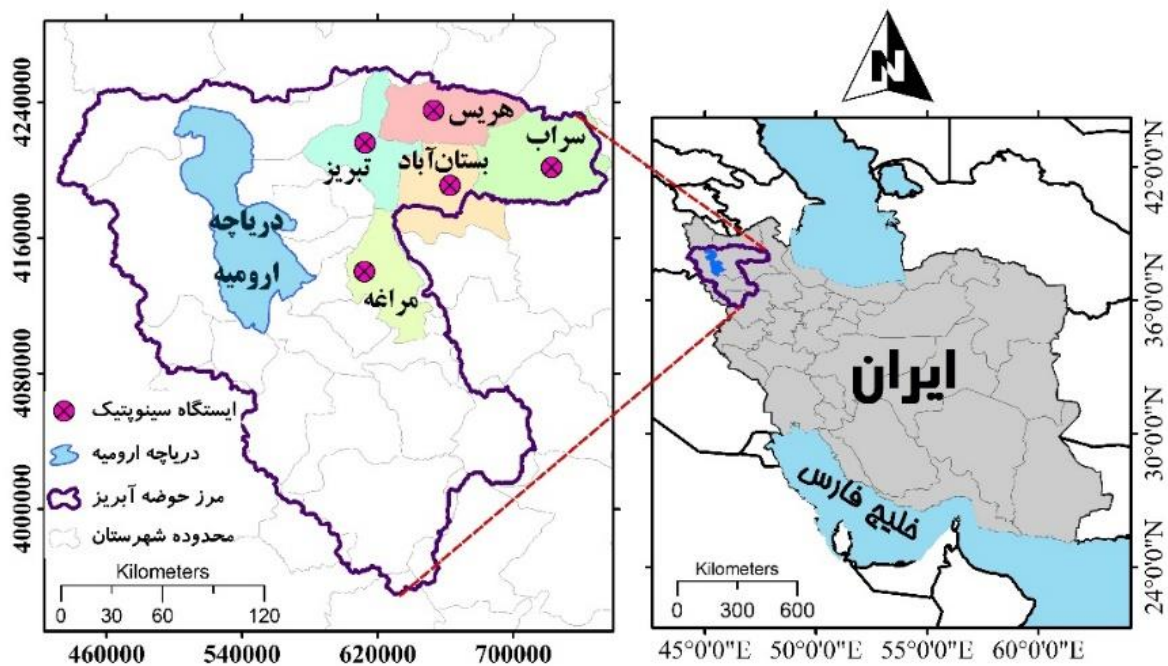
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده

تحقیق حاضر با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب در شرق حوضه دریاچه ارومیه شامل بستان‌آباد، تبریز، سراب، مراغه و هریس انجام گرفت. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه نشان داده شده است.

ژن محاسبه کردند. نتایج نشان داد که رابطه نوین پیشنهادی توسط مدل برنامه‌ریزی بیان ژن دارای دقت بالا و کاربرد مؤثر در برآورد روزانه ضریب تشت در دشت بیرجند است. روش کونیکا نیز پس از رابطه پیشنهادی، جهت برآورد تبخیر-تعرق بر پایه ضریب تشت تبخیر می‌تواند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتاً پیچیده پنمن-ماتیث-فائو باشد. زارع ایبانه و اسمعیلی (۲۰۲۱) نیز در مطالعه‌ای با استفاده از ۲۰ سال داده‌های هواشناسی، به ارزیابی دقت روش‌های برآورد ضریب تشت برای محاسبه مقادیر تبخیر-تعرق در استان کردستان پرداختند. ایشان برای محاسبه مقدار ضریب تشت از ۱۰ روش استفاده کردند و مقادیر ET_0 به دست آمده از روش تشت را با مقادیر حاصل از روش استاندارد پنمن مانتیث فائو مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در مقیاس روزانه، ماهانه و فصلی، روش‌های فائو-۲۴ و کریستین‌سن بهترین عملکرد و روش‌های رگوانشی و والندر و نیز آلن و پروت، بدترین عملکرد را داشتند.

با توجه به اهمیت اندازه‌گیری تبخیر-تعرق در اغلب مطالعات هیدرولوژیکی و برآورد نیاز آبی گیاهان و با توجه به محدودیت امکان اندازه‌گیری مستقیم آن در



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.

یخبندان و جمع‌آوری تشت‌های تبخیر، مطالعه حاضر با استفاده از داده‌های ۶ ماه سال (اردیبهشت تا مهر) که داده‌های پیوسته تشت موجود است، انجام شده است. در جدول ۱، متوسط سالانه پارامترهای اقلیمی و هواشناسی در هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه ارائه شده است.

داده‌های هواشناسی مورد استفاده برای انجام پژوهش شامل دمای کمینه، دمای متوسط، دمای بیشینه، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی متوسط، رطوبت نسبی بیشینه، سرعت باد، و تبخیر از تشت بود که مقادیر آن‌ها از سازمان هواشناسی اخذ شد. شایان ذکر است با توجه به محدودیت ثبت داده‌های تشت تبخیر به دلایلی مانند

جدول ۱- مقادیر متوسط پارامترهای هواشناسی در هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه.

ایستگاه	دوره آماری	دما (°C)	بارش (mm)	تبخیر-تعرق مرجع (mm day ⁻¹)	اقلیم (طبقه‌بندی دومارتن)
بستان‌آباد	۱۳۸۵-۱۳۹۹	۱۱/۳	۳۳۲	۳/۱	نیمه‌خشک
تبریز	۱۳۷۲-۱۳۹۹	۱۳/۳	۲۵۵	۳/۴	نیمه‌خشک
سراب	۱۳۷۲-۱۳۹۹	۸/۹	۲۴۱	۲/۸	نیمه‌خشک
مراغه	۱۳۷۲-۱۳۹۹	۱۳/۶	۲۷۲	۳/۴	نیمه‌خشک
هریس	۱۳۸۷-۱۳۹۹	۱۳/۹	۲۹۲	۲/۹	نیمه‌خشک

برآورد ضریب تشت

در مطالعه حاضر به‌منظور برآورد ضریب تشت، از شش رابطه تجربی استفاده شده است. اسامی و روابط روش‌های مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- روشهای تجربی محاسبه ضریب تشت.

رابطه	روش
$K_{pan} = 0.475 - (0.000245 \times U_2) + (0.00516 \times RH) + (0.00118 \times F) - (0.000016 \times RH) - (0.00000101 \times F^2) - (0.000000008 \times RH^2 \times U_2) - (0.00000001 \times RH^2 \times F)$	Cuenca (1989)
$K_{pan} = 0.108 - (0.000331 \times U_2) + (0.0422 \times \ln(F)) + (0.1434 \times \ln(RH)) - (0.000631 \times \ln(F)^2 \times \ln(RH))$	Allen and Pruitt (1991)
$K_{pan} = 0.482 + (0.024 \times \ln(F)) - (0.000376 \times U_2) + (0.0045 \times RH)$	Snyder (1992)
$K_{pan} = 0.51206 - (0.000321 \times U_2) + (0.02889 \times RH) + (0.03188 \times \ln(F)) - (0.000107 \times RH \times \ln(F))$	Orang (1998)
$K_{pan} = 0.5321 - (0.0003 \times U_2) + (0.0249 \times \ln(F)) + (0.0025 \times RH)$	Modified Snyder
$K_{pan} = 0.62407 - (0.0266 \times \ln(F)) - (0.00028 \times U_2^2) + (0.0026 \times RH)$	Mohamed et al. (2008)

رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (درجه سانتی‌گراد)، $e_s - e_a$ کمبود فشار بخار از حالت اشباع در ارتفاع ۲ متری (کیلوپاسکال) و U_2 سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (متر بر ثانیه) می‌باشد.

به منظور ارزیابی دقت تخمین تبخیر-تعرق حاصل از اعمال ضرایب تشت در روش تشت تبخیر با مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش استاندارد فائو ۵۶، از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف مطلق (MAD) استفاده شد (روابط ۹ تا ۱۱).

$$r = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \right) \quad [9]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad [10]$$

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \quad [11]$$

در این روابط x_i و y_i به ترتیب i امین داده واقعی و برآورد شده، \bar{x} و \bar{y} به ترتیب میانگین داده‌های واقعی و برآورد شده و n تعداد گام‌های زمانی هستند. علاوه بر معیارهای فوق، از نمودارهای باکس و ویولن پلات

در این روابط U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری (متر بر ثانیه)، RH رطوبت نسبی (درصد) و F فاصله سبزی‌نگی که باد به سمت تشت می‌وزد (متر) می‌باشند.

مقادیر تبخیر-تعرق مرجع بر پایه تشت تبخیر، با اعمال ضرایب تشت حاصل از هر یک از روابط تجربی ارائه شده در جدول ۲، با استفاده از رابطه ۷ برآورد گردید.

$$ET_0 = k_{pan} \times E_{pan} \quad [7]$$

که در آن k_{pan} ضریب تشت و E_{pan} تبخیر از تشت می‌باشد. به منظور مقایسه نتایج حاصل از رابطه ۷ به-ازای ضرایب تشت به دست آمده از هر یک از روابط تجربی، مقادیر تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از روش استاندارد فائو ۵۶ محاسبه گردید (رابطه ۸) و نتایج به-دست آمده از آن مبنای مقایسه قرار گرفت.

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad [8]$$

که در آن Δ شیب منحنی فشار بخار (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد)، R_n تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگاژول بر مترمربع بر روز)، G شار گرما به داخل خاک (مگاژول بر مترمربع بر روز)، γ ضریب

اورنگ است. همچنین با توجه به مقادیر توصیه شده برای ضریب تشمت که عموماً بین ۰/۳۵ تا ۰/۸۵ گزارش شده است (آلن و همکاران ۱۹۹۸؛ کاپوسی ۲۰۱۲)، روش اورنگ مقدار تبخیر-تعرق را بیشتر از مقدار واقعی برآورد خواهد کرد. مقدار تبخیر-تعرق به دست آمده از سایر روش‌ها نیز با توجه به مقادیر محاسبه شده برای ضریب تشمت، با مقادیر حاصل از روش استاندارد مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

مقادیر ضرایب تشمت در روش تشمت تبخیر با مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش استاندارد فائو ۵۶ استفاده گردید.

نتایج و بحث

نتایج به دست آمده از هر یک از روابط تجربی برآورد ضریب تشمت در جدول ۳ به صورت متوسط ماهانه ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین دامنه تغییرات متوسط ماهانه ضریب تشمت مربوط به روش

جدول ۳- مقادیر متوسط ماهانه ضریب تشمت در ایستگاه‌های مورد مطالعه.

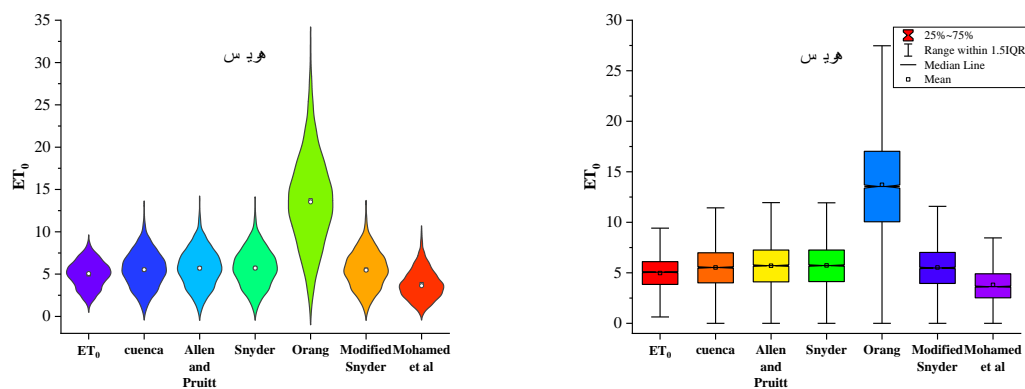
مهر	شهریور	مرداد	تیر	خرداد	اردیبهشت	مدل	
۰/۷۳	۰/۷۰	۰/۶۷	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۴	Cuenca (1989)	بستان‌آباد
۰/۷۴	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۷۵	Allen and Pruitt (1991)	
۰/۷۵	۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۶	Snyder (1992)	
۱/۹۴	۱/۷۷	۱/۶۴	۱/۷۴	۱/۷۵	۲/۰۴	Orang (1998)	
۰/۷۱	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۶۹	۰/۷۱	Modified Snyder	
۰/۴۵	۰/۴۶	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۷	۰/۴۵	Mohamed et al (2008)	
۰/۷۰	۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۷۵	Cuenca (1989)	تبریز
۰/۷۲	۰/۷۰	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۵	Allen and Pruitt (1991)	
۰/۷۳	۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۷۱	۰/۷۶	Snyder (1992)	
۱/۸۱	۱/۶۰	۱/۴۹	۱/۵۸	۱/۶۸	۲/۰۴	Orang (1998)	
۰/۶۹	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۱	Modified Snyder	
۰/۴۶	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۴۹	۰/۴۷	۰/۴۴	Mohamed et al (2008)	
۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۵	Cuenca (1989)	سراب
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۷	۰/۸۰	Allen and Pruitt (1991)	
۰/۷۶	۰/۷۷	۰/۷۹	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۸۵	Snyder (1992)	
۲/۰۳	۲/۰۷	۲/۱۹	۲/۲۷	۲/۳۲	۲/۶۲	Orang (1998)	
۰/۷۱	۰/۷۲	۰/۷۳	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۷	Modified Snyder	
۰/۴۴	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۳۸	Mohamed et al (2008)	
۰/۶۹	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۶۷	۰/۷۴	Cuenca (1989)	مراغه
۰/۷۱	۰/۶۸	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۷۴	Allen and Pruitt (1991)	
۰/۷۲	۰/۶۸	۰/۶۶	۰/۶۸	۰/۶۹	۰/۷۶	Snyder (1992)	
۱/۷۲	۱/۴۹	۱/۴۱	۱/۵۰	۱/۵۹	۲/۰۱	Orang (1998)	
۰/۶۹	۰/۶۷	۰/۶۶	۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۱	Modified Snyder	
۰/۴۷	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۴۹	۰/۴۸	۰/۴۴	Mohamed et al (2008)	
۰/۶۷	۰/۶۷	۰/۷۲	۰/۷۴	۰/۷۴	۰/۸۰	Cuenca (1989)	هریس
۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۷۳	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۷۷	Allen and Pruitt (1991)	
۰/۶۹	۰/۷۰	۰/۷۴	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۸۱	Snyder (1992)	
۱/۵۹	۱/۶۴	۱/۸۹	۲/۰۰	۲/۰۳	۲/۳۲	Orang (1998)	
۰/۶۷	۰/۶۸	۰/۷۰	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۷۴	Modified Snyder	
۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۴	۰/۴۲	Mohamed et al (2008)	

برای ارزیابی مدل‌های تجربی برآورد ضریب تشت، مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از اعمال ضرایب تشت به-دست آمده از هر مدل در مقادیر تبخیر از تشت با مقادیر تبخیر-تعرق مرجع محاسباتی با استفاده از روش استاندارد فائو مورد مقایسه قرار گرفت. در جدول ۴، مقادیر شاخص‌های خطای برآورد هریک از روش‌های تجربی ارائه شده است. بر این اساس در بستان‌آباد روش اشنایدر اصلاح شده با ضریب همبستگی $0/69$ ، RMSE معادل $1/33$ میلی‌متر بر روز و MAD معادل $1/03$ میلی‌متر بر روز، در تبریز روش آلن و پرویت با ضریب همبستگی $0/50$ ، RMSE معادل $2/02$ میلی‌متر بر روز و MAD معادل $1/71$ میلی‌متر بر روز، در سراب روش محمد و همکاران با ضریب همبستگی $0/67$ ، RMSE معادل $1/47$ میلی‌متر بر روز و MAD معادل $1/23$ میلی‌متر بر روز، در مراغه روش محمد و همکاران با ضریب همبستگی $0/73$ ، RMSE معادل $1/49$ میلی‌متر بر روز و MAD معادل $1/19$ میلی‌متر بر روز و در هریس روش اشنایدر اصلاح شده با ضریب همبستگی $0/72$ ، RMSE معادل $1/37$ میلی‌متر بر روز و MAD معادل $1/04$ میلی‌متر بر روز، بالاترین دقت را در برآورد ضریب تشت و تبخیر-تعرق مرجع دارند. همچنین در تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه روش اورنگ با اختلاف چشمگیری به‌عنوان ضعیف‌ترین روش معرفی شد و استفاده از آن برای برآورد ضریب تشت در منطقه شرق حوضه دریاچه ارومیه توصیه نمی‌شود. همچنین علی‌رغم برتری نسبی یک روش در هر ایستگاه که به‌عنوان روش منتخب معرفی شده است، تفاوت محسوسی بین نتایج روش‌های مختلف (به‌جز اورنگ که مقادیر خطای فاحشی دارد) مشاهده نمی‌شود. این در حالی است که سبزی‌پرور و همکاران (۲۰۱۰) گزارش کردند که روش اورنگ در شرایط اقلیمی سرد نیمه-

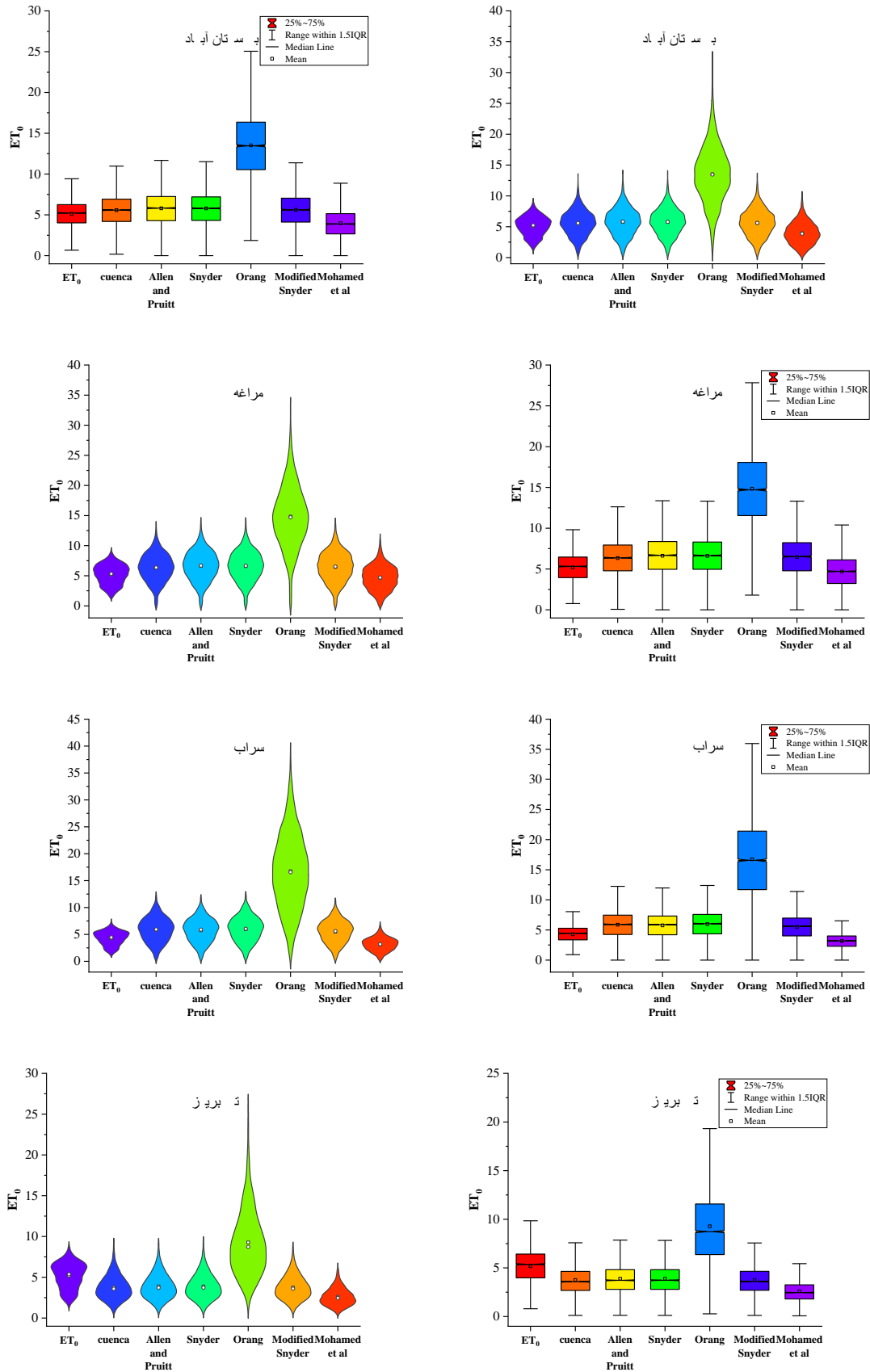
خشک بهترین برازش را در برآورد ضریب تشت دارد که با نتایج مطالعه حاضر مغایرت دارد. شریفیان و قهرمان (۲۰۰۶) نیز برای برآورد تبخیر-تعرق روزانه در منطقه گرگان استفاده از روش‌های کونیکا و اشنایدر اصلاح شده را توصیه نمودند. در مطالعه‌ای دیگر، قیامی و همکاران (۲۰۰۸) گزارش کردند که در منطقه ارومیه، ضرایب تشت حاصل از روش اشنایدر، نزدیکی بیشتری با مقادیر حاصل از تشت تبخیر دارد. حسین-آبادی و خاشعی سیوکی (۲۰۱۹) نیز در بین مدل‌های تجربی، روش کونیکا را در دشت بیرجند برای برآورد تبخیر-تعرق مرجع به‌عنوان بهترین روش معرفی نمودند. مقایسه نتایج حاصل از مطالعات پژوهشگران در مناطق اقلیمی مختلف نشان می‌دهد که میزان دقت کارایی هر مدل به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی مناطق مختلف قرار دارد و لازم است به‌منظور کاربرد و نیز افزایش دقت مدل‌ها، واسنجی معادلات مربوط به هر مدل بر اساس شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه صورت پذیرد. نمودارهای جعبه‌ای مدل‌های مورد بررسی جهت برآورد تبخیر-تعرق مرجع در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مذکور قابل مشاهده است، روش اشنایدر اصلاح شده در ایستگاه‌های بستان‌آباد و هریس، روش محمد و همکاران در ایستگاه‌های سراب و مراغه و روش آلن و پرویت در ایستگاه تبریز بیشترین تطابق را با مقادیر تبخیر-تعرق حاصل از روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت دارا می‌باشند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، میانه مدل‌های مذکور با میانه تبخیر و تعرق مرجع محاسبه شده از روش استاندارد فائو-پنمن-مانتیت مطابق باهم بوده و تقریباً در یک خط می‌باشند. پس می‌توان تفسیر کرد که بین مدل‌های مذکور تفاوت چندانی وجود ندارد.

جدول ۴- مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق مرجع.

MAD (mm day ⁻¹)	RMSE (mm day ⁻¹)	r	مدل	
۱/۰۶	۱/۳۹	۰/۶۴	Cuenca (1989)	بستان‌آباد
۱/۱۲	۱/۴۴	۰/۶۸	Allen and Pruitt (1991)	
۱/۱۳	۱/۴۷	۰/۶۶	Snyder (1992)	
۸/۰۴	۸/۸۶	۰/۴۶	Orang (1998)	
۱/۰۳	۱/۳۳	۰/۶۹	Modified Snyder	
۱/۳۷	۱/۶۱	۰/۷۷	Mohamed et al (2008)	
۱/۸۴	۲/۱۵	۰/۴۵	Cuenca (1989)	تبریز
۱/۷۱	۲/۰۲	۰/۵۰	Allen and Pruitt (1991)	
۱/۷۵	۲/۰۵	۰/۴۷	Snyder (1992)	
۴/۳۰	۵/۶۷	۰/۲۵	Orang (1998)	
۱/۷۶	۲/۰۵	۰/۵۳	Modified Snyder	
۲/۶۰	۲/۸۳	۰/۶۷	Mohamed et al (2008)	
۱/۹۴	۲/۳۶	۰/۶۹	Cuenca (1989)	سراب
۱/۸۴	۲/۲۳	۰/۷۰	Allen and Pruitt (1991)	
۲/۰۳	۲/۴۵	۰/۶۹	Snyder (1992)	
۱۲/۷۹	۱۴/۱۷	۰/۶۴	Orang (1998)	
۱/۶۲	۱/۹۸	۰/۷۰	Modified Snyder	
۱/۲۳	۱/۴۷	۰/۶۷	Mohamed et al (2008)	
۱/۵۷	۲/۰۳	۰/۶۸	Cuenca (1989)	مراغه
۲/۲۷	۱/۷۹	۰/۶۹	Allen and Pruitt (1991)	
۱/۷۷	۲/۲۵	۰/۶۸	Snyder (1992)	
۹/۷۲	۱۰/۶۰	۰/۵۷	Orang (1998)	
۱/۶۹	۲/۱۶	۰/۷۰	Modified Snyder	
۱/۱۹	۱/۴۹	۰/۷۳	Mohamed et al (2008)	
۱/۱۳	۱/۵۱	۰/۷۱	Cuenca (1989)	هریس
۱/۱۴	۱/۴۹	۰/۷۲	Allen and Pruitt (1991)	
۱/۱۹	۱/۵۸	۰/۷۲	Snyder (1992)	
۸/۷۰	۱۰/۱۴	۰/۶۶	Orang (1998)	
۱/۰۴	۱/۳۷	۰/۷۲	Modified Snyder	
۱/۴۴	۱/۷۰	۰/۶۹	Mohamed et al (2008)	



شکل ۲- نمودار باکس و ویولن پلات مدل‌های مورد بررسی.



شکل ۲- ادامه.

نتیجه‌گیری کلی

به‌عنوان مثال نتایج حاصل از پژوهش حاضر نشان داد که روش اورنگ برای منطقه مورد مطالعه (شرق حوضه دریاچه ارومیه) نتایج مطلوبی ارائه نمی‌دهد و در صورت استفاده از این مدل برای شرق حوضه دریاچه ارومیه، لازم است مدل واسنجی شود. همچنین بر اساس نتایج به‌دست آمده به‌طور کلی دقت سایر روش‌ها نزدیک به هم است. در بستان‌آباد و هریس روش‌ها شنایدر اصلاح شده، در سراب و مراغه روش محمد و همکاران و در تبریز روش آلن و پرویت، بهترین روش‌ها در برآورد ضریب تشتت به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع روزانه می‌باشند.

با توجه به اهمیت برآورد تبخیر-تعرق مرجع در اغلب مطالعات هیدرولوژیکی و نیز برآورد نیاز آبی گیاهان، روش‌های مستقیم و غیر مستقیم متعددی توسعه یافته‌اند. در مطالعه حاضر شش مدل برآورد ضریب تشتت به‌منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع روزانه با استفاده از داده‌های تشتت تبخیر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان داد که به‌طور کلی مدل‌های برآورد ضریب تشتت با دقت قابل‌قبولی قابلیت استفاده برای محاسبه تبخیر-تعرق را دارند. در این بین با توجه به تأثیر عوامل اقلیمی در این مدل‌ها، پیشنهاد می‌شود کارآیی هر مدل در شرایط اقلیمی مختلف ارزیابی شده و مدل مناسب برای هر منطقه تعیین گردد.

منابع مورد استفاده

- Akbari-Nodehi D, 2010. Estimation of evaporation pan coefficient in order to calculate evapotranspiration (Case study: Sari Synoptic Station). *Journal of Research in Crop Sciences* 2 (7):65-75?. (in Persian with English abstract).
- Allen RG and Pruitt WO, 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal Irrigation and Drainage Engineering* 117 (5):758-773.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D and Smith M, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper No. 56. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome.
- Cuenca RH, 1989. *Irrigation system design: an engineering approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 133P.
- Grismer ME, Orang M, Snyder R and Matyac R, 2002. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal Irrigation and Drainage Engineering* 128:180-184.
- Gundekar HG, 2004. Evapotranspiration estimation methods and development of crop coefficients for some crops in semi- arid region. An unpublished MTech Dissertation Submitted to Marathwada Agricultural University Parbhani, Maharashtra, India.
- Hosseinabadi S and Khashei-Siouki A, 2019. Presenting a new relationship between estimating the coefficient of daily evaporation pan using gene expression programming and comparing it with experimental methods to calculate evapotranspiration of the reference plant (Case study: Birjand plain). *Journal of Rainwater Catchment Systems* 7 (2): 57-67. (in Persian with English abstract).
- Irmak S, Haman DZ and Jones JW, 2002. Evaluation of class A pan coefficients for estimating reference evapotranspiration in humid location. *Journal Irrigation and Drainage Engineering* 128 (3):153-159.
- Kaboosi K, 2011. Estimation of evaporation pan coefficient using pan data and comparison with experimental relationships. National Conference on Meteorology and Agricultural Water Management., Campus of Agriculture and Natural Resources, December, University of Tehran. Iran. (in Persian with English abstract).
- Kaboosi K, 2012. The investigation of error of pan evaporation data, estimation of pan evaporation coefficient by pan data and its comparison with empirical equation. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences* 4 (19):1458-1465.
- Majidi M, Alizadeh A, Farid-Hosseini AR and Vazifedoust M, 2014. Evaporation from lakes and dam reservoirs: energy balance estimates, evaluation of temperature radiation methods and hybrid

- relationships. Iranian Journal of Irrigation and Drainage 8 (3): 602-615. (in Persian with English abstract).
- Mounskhah W, Samadianfard S and Hadi M, 2020. Evaluation of data mining methods and experimental models based on temperature-radiation in estimating evaporation from the pan (Case study: East of Urmia Lake). Iranian Soil and Water Research 51 (9): 2337-2348. (in Persian with English abstract).
- Najafvand-Drikundi M and Islamic H, 2016. Comparison of experimental methods for estimating evaporation from free water surface (Case study: Dez regulatory dam). Two Scientific and Specialized Journals of Water Engineering. 4 (2): 65-73. (in Persian with English abstract).
- Orang M, 1998. Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 tables. Unpublished California Department of Water Resources Report, Sacramento, California, USA.
- Qiyami F, Mirmasoudi SS, Tanian S and Zareabyaneh H, 2008. Evaluation and comparison of evapotranspiration estimated from evaporation pan with evapotranspiration values measured by lysimeter in Urmia region. Proceedings of the 2nd National Conference on Irrigation and Drainage Networks Management. February, Shahid Chamran University of Ahvaz. Iran. (in Persian with English abstract).
- Sabziparvar AA, Tabari H, Aeini A and Ghafouri M, 2010. Evaluation of class A pan coefficient models for estimation of reference crop evapotranspiration in cold semi-arid and warm arid climates. Water Resources Management 24:909-920.
- Sharifian H and Hero B, 2006. Evaluation and comparison of evapotranspiration estimated from evaporation pan with ET₀ values of standard method in Gorgan region. Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources 13 (5): 18-28. (in Persian with English abstract).
- Snyder RL, 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. Journal Irrigation and Drainage Engineering 1186: 977- 980.
- Zare-Abyaneh H and Ismaili S, 2021. Evaluation of methods for estimating the coefficient of the pan to calculate the amount of evapotranspiration (Case study: Kurdistan province). Iranian Journal of Soil and Water Research 52 (2): 329-344. (in Persian with English abstract).