



Research Paper

Modification of the Coefficients of some Equations for Estimation of Evapotranspiration of the Reference Plant

Fateme Safari¹, Abbas Kaviani^{2*}, Asghar Azizian Ghatar³ and Hadi Ramezani Etedali²

¹PhD Scholar, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

²Assoc. Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

³Assist. Professor, Water Science and Engineering Department, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Article information

Received: July 02, 2021

Revised: August 21, 2021

Accepted: August 26, 2021

Keywords:

Blaney-Criddle
Evapotranspiration
FAO-56
Iran

*Corresponding author:

kaviani@eng.ikiu.ac.ir



Abstract

Iran is located in the arid and semi-arid belt of the world, which is characterized by low rainfall, thunderstorms, flood flows, and high evapotranspiration. Therefore, quantitative evaluation of evapotranspiration on a regional scale is necessary for water resources management, crop production, and environmental assessments in irrigated lands. In this study, to estimate ETo in four synoptic stations with arid, semi-arid, humid, and semi-humid climates, meteorological data such as temperature, net radiation, relative humidity, and wind speed were used for 1990-2010. Potential evapotranspiration was calculated using 5 different methods, including Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Priestly-Taylor, Turc, and Makkink, besides, the standard FAO-56 was used (because there was no Lysimetric regionally data) to evaluate the applied formulas. In order to evaluate these methods, were used the mean absolute error (MAE), root mean squared error (RMSE), mean bias error (MBE), correlation coefficient (r), Nash -Satclif index (N.S). Based on these indices, Blaney-Criddle method, after the FAO-56 method, which was used as the basis, was selected as the superior method for the four climates in Iran.

© Authors, Published by **Environment and Water Engineering** journal. This is an open-access article distributed under the CC BY (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



Introduction

One of the prerequisites for optimal water management in the watershed is an accurate estimation of water balance components and potential evapotranspiration is one of the factors affecting water balance. Accurate estimations of evapotranspiration perform an important role in studies such as global climate change,

environmental evolution, and control of water resources.

Evapotranspiration is an important parameter in hydrology and meteorology studies and also in irrigation planning. It is necessary to estimate plant water and irrigation systems design. Determining the exact amount of water used for evapotranspiration is one of the most important factors in planning for achieving a product. For



this reason, it has always been attempted to provide the researchers with the appropriate precision and need for the lowest available ground data. Since, Iran is located in the arid and semi-arid belt in world, which is characterized by low rainfall, thunderstorms, flood flows and high evapotranspiration. Therefore, quantitative evaluation of evapotranspiration on a regional scale is necessary for water resources management, crop production and environmental assessments in irrigated lands.

The researchers recommended the FAO-56 method as a valid method for estimating evapotranspiration. Despite the high accuracy of this method, dependence on various meteorological parameters is a weakness of this method and therefore, the use of this equation is

not possible at all times and places. Therefore, according to the climate of each region, used to an alternative method with the required minimum meteorological data is proposed. In this study, an equation from the group of experimental equations of temperature (Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle) and radiation (Priestly-Taylor, Turc and Makkink) for different climates of Iran is calibrated, evaluated and validated.

Materials and methods

In this study, to estimate ETo in four synoptic stations with arid, semi-arid, humid and semi-humid climate, meteorological data such as: temperature, net radiation, relative humidity and wide velocity were used for 1990-2010 (Table1).

Table1 Parameters used in research

Station	Parameters	Data Collection Duration
Urmia	min, max and mean temperature air, net radiation	1995-2010
Rasht	(Mj/m ² .d), min and max relative humidity, wind speed,	1990-2010
Mashhad	max sunny hours (N), real hours of sunny (n), rain	1995-2010
Yazd	(mm)	1994-2010

Potential evapotranspiration was calculated using five different methods, including Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle, Priestly-Taylor, Turc and Makkink, besides, the standard FAO-56 was used (because there was no Lysimetric data in the region, the available lysimetric data were

compared with the FAO-56 method data and after statistical analysis between the FAO-56 method data with the lysimetric data, FAO-56 It was considered as the base method for years without lysimetric data in each station.) to evaluate the applied formulas (Table 2).

Table 2 Equations used in research

Number	Name of Equation	Equation	Reference
1	FAO-56	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma(\frac{890}{T + 273})U_2(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	FAO-56 (1998)
2	Hargreaves-Samani	$ET_o = 0.0023R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} (T_{mean} + 17.8)$	Hargreaves and Samani (1985)
3	Blaney-Criddle	$ET_o = a + b(P(0.46T_{mean} + 8.13))$	Blaney and Criddle (1950)
4	Priestley-Taylor	$ET_o = 1.26(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma})(\frac{R_n - G}{\lambda})$	Priestley and Taylor (1972)
5	Makkink	$ET = 0.61(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma})(\frac{R_s}{2.45}) - 0.12$	Makkink (1957)
6	Turc	$ET = 0.013 \frac{(23.89R_s + 50)T_{avg}}{(T_{avg} + 15)}$	Turc (1961)

Refence evapotranspiration values were obtained using the mentioned methods for all stations with 70% of the available data. Then, the results of these calibrated equations, which are derived from the remaining 30% of the data, were

evaluated and validated with observational values (FAO-56).

To derive the calibration coefficients of the equations, the nonlinear optimization method was used based on the minimization of the sum of squares error, which was calculated using

Solver in Excel software. For evaluate these methods, MAE, RMSE, MBE, r , and Nash-Sutcliffe index (N.S) were used.

Results

For Urmia station with semi-humid climate, the use of Blaney-Criddle method calibrated with a correlation coefficient of 0.99 and RMSE equal with 0.14 is preferred and the Makkink equation (1957) with a correlation coefficient of 0.96 and RMSE equal to 0.43 is in the next priority. In Mashhad station with a semi-arid climate, the Blaney-Criddle equation calibrated with a correlation coefficient of 0.99 and RMSE equal with 0.11 and Hargreaves-Samani equation (1985) with a correlation coefficient of 0.97 and RMSE equal with 0.55, respectively. The first and second priorities are for estimating the evapotranspiration of the reference plant. For Rasht and Yazd stations with wet and dry climates, respectively, the priority is to use the Blaney-Criddle equation calibrated with correlation coefficient and RMSE 0.99 and 0.12, respectively, and the Turk equation calibrated with correlation coefficient and RMSE is next, 0.92, 0.93 and 0.11, 0.12, respectively.

Based on these indices, the Blaney-Criddle method, following the FAO-56 method as the basis, with correlation coefficient (0.99), RMSE (0.11-0.14), negative MBE, which represents less estimation than observational data, and the Nash-Sutcliffe equal to one as the first method for the four distinct climates in Iran (Rasht, Urmia, Yazd and Mashhad stations have climate wet, semi-humid, dry and semi-arid, respectively).

The results of this study are consistent with other studies conducted in Iran. In a study in Iran, the reference evapotranspiration was studied by Blaney-Criddle, Hargreaves, and Thornthwaite methods for different climates based on the UNESCO climograph in comparison with the standard FAO-56 method. Blaney-Criddle has the best estimate in arid, semi-arid and humid climates. The results of this study stated that in conditions where in the studied climates due to lack of access to the required data, it is not possible to estimate the reference evapotranspiration by the FAO-56 method, using calibrated equations can be statistically similar to estimates obtained by the FAO-56 method. Also, in another study that evaluated the appropriate model of potential evapotranspiration in Iran, four methods, Thornthwaite, Jensen-Hayes, Blaney-Criddle, and Hargreaves-Samani were

used and concluded that the Blaney-Criddle method is the best for Iran.

Conclusion

The main results showed:

1. For Urmia station with a semi-humid climate, using the Blaney-Criddle method calibrated with a correlation coefficient of 0.99 and RMSE equal to 0.14 is preferred and the Makkink equation with a correlation coefficient of 0.96 and RMSE equal to 0.43 is in the next priority.
2. For Mashhad station with a semi-arid climate, the Blaney-Criddle equation calibrated with a correlation coefficient of 0.99 and RMSE equal to 0.11 and the Hargreaves-Samani equation with a correlation coefficient of 0.97 and RMSE equal to 0.55 were selected, respectively, the first and second priority is the estimation of evapotranspiration of the reference plant.
3. For Rasht and Yazd stations with wet and dry climates, respectively, the priority is using the Blaney-Criddle equation calibrated with a correlation coefficient and RMSE are 0.99 and 0.12, respectively, and the Turk equation calibrated with r and RMSE are 0.92, 0.93, 0.11, and 0.12, respectively, in the next priority.
4. In general, the results showed that the Blaney-Criddle method was calibrated, after the FAO-56 method, which was the base method, with the highest correlation coefficient (r), the lowest root mean square error (RMSE) and the Nash-Sutcliffe index is about one, in the four stations studied gives a good estimate of evapotranspiration. Also, in situations where it is not possible to the estimation of evapotranspiration of the reference plant using the FAO-56 method in the studied climates due to lack of access to the required data, using the calibrated equations, similar estimates can be made from statistical opinion obtained by FAO-56 method.

Acknowledgment

The Iran Meteorological Organization is sincerely thanked for providing the required data.

Data Availability

The data used (or produced) in this research are presented in the text of the article.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.



ISSN: 2476-3683

محیط زیست و مهندسی آب

Homepage: www.jewe.ir

مقاله پژوهشی

اصلاح ضرایب تعدادی از معادلات برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع

فاطمه صفری^۱، عباس کاویانی^{۲*}، اصغر عزیزیان قطار^۳ و هادی رضانی اعتدالی^۲

^۱ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۲ دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

^۳ استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۴/۱۱]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۵/۳۰]

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۶/۰۴]

واژه‌های کلیدی:

راندمن کاربرد

زمان پسروری

زمان پیشروی

هیدرودینامیک

*نویسنده مسئول:

kaviani@eng.ikiu.ac.ir

ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک کره زمین قرار گرفته است که ریزش‌های کم جوی، رگبارهای شدید، وقوع جریان‌های سیلابی و تبخیر-تعرق زیاد از ویژگی‌های آن به شمار می‌آید. بنابراین، ارزیابی کمی تبخیر-تعرق در سطح منطقه‌ای، به منظور مدیریت منابع آب، تولید محصول و ارزیابی‌های زیست‌محیطی در مناطق تحت آبیاری، ضروری است. در این پژوهش برای تخمین تبخیر-تعرق گیاه مرجع (ET_0) در چهار ایستگاه سینوپتیک انتخابی با اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و نیمه‌مرطوب، از داده‌های هواشناسی همچون دما، تابش خالص، رطوبت نسبی و سرعت باد برای سال‌های ۱۳۶۸-۱۳۸۸ استفاده شد. تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های FAO-56، هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل، پرستلی-تیلور، تورک و مک‌کینک محاسبه و ضرایب آنها برای برآورد دقیق‌تر تبخیر-تعرق اصلاح شد. به منظور ارزیابی این روش‌ها از آماره‌های میانگین خطای مطلق، میانگین جذر مربعات خطا، میانگین خطای اریب، ضریب همبستگی، شاخص نش-ساتکلیف استفاده شد. بر اساس این شاخص‌ها، روش بلانی-کریدل، پس از روش FAO-56 که به‌عنوان مینا قرار گرفت، به‌عنوان روش برتر برای چهار اقلیم مشخص شده در ایران انتخاب شد.

۱- مقدمه

تعرق (ET)^۱ اطلاعات اساسی را برای درک و مدیریت سامانه‌های منابع آب در اختیار قرار می‌دهد. از سوی دیگر ET مصرف‌کننده اصلی آب در سامانه‌های هیدرولوژیکی است و به دلیل تنوع زیاد در پوشش گیاهی و نوع دسترسی به آب، همچنین از نظر زمانی و به علت تأثیرات اقلیمی بسیار متغیر می‌باشد (Allen et al. 2011). با توجه به اهمیت تبخیر-

یکی از پیش‌نیازهای مدیریت بهینه آب در حوزه آبخیز تخمین دقیق مؤلفه‌های بیلان آب می‌باشد و تبخیر-تعرق پتانسیل یکی از عوامل تأثیرگذار بر بیلان آب محسوب می‌گردد. برآوردهای دقیق تبخیر-تعرق در مطالعاتی از قبیل تغییر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و کنترل منابع آب نقش مهمی بازی می‌کند (Shahedi and Zarei 2012). تبخیر-

^۱Evapotranspiration

نتایج مقایسه معادله‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل (۲۰ معادله) با داده‌های لایسیمیتری در مناطق مختلف جهان (۱۱ منطقه با شرایط متفاوت آب‌وهوایی)، بیانگر دقت زیاد روش فائو-پنمن-مانتیت در مقایسه با سایر روش‌های تجربی است (Jensen et al. 1990). در یکسری مطالعات موازی، انجمن تحقیقاتی اروپا نیز برآورد را به روش‌های مختلف با استفاده از داده‌های هواشناسی انجام داد و عملکرد این روش‌ها را با داده‌های لایسیمیتری سنجید. نتیجه مطالعات نشان داد که معادله پنمن اصلاح شده مقدار تبخیر-تعرق را تا ۲۰ درصد بیشتر برآورد می‌نماید و سایر روش‌های پیشنهادی فائو نیز بسته به درجه انطباق آنها با شرایط محلی عکس-العمل متفاوتی را از خود نشان می‌دهند. در هر دو مطالعه روش پنمن-مانتیت به‌عنوان روشی که دارای دقت نسبی بالا و عملکرد ثابت بوده و با درجه احتمال بالا در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از تبخیر-تعرق را ارائه می‌کند، معرفی شده است (Smith Allen et al. 1998). محققان در مطالعه‌ای به مدل‌سازی تبخیر-تعرق پتانسیل در کارولینای شمالی آمریکا پرداختند. آنها از روش‌های فائو، مدل هامون و مدل پریستلی-تیلور استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که مدل پریستلی-تیلور نتایج بسیار دقیقی از میزان تبخیر-تعرق پتانسیل را ارائه می‌دهد (Rao et al. 2011).

در پژوهشی که در ترکیه انجام شد، روش هارگریوز-سامانی برای این منطقه اصلاح شد. آن‌ها میزان تبخیر-تعرق را برای ۲۷۵ ایستگاه هواشناسی و هفت منطقه جغرافیایی با استفاده از روش‌های FAO-56 و هارگریوز-سامانی به دست آوردند، سپس ضرایب معادله هارگریوز-سامانی را واسنجی و معادله واسنجی شده سرعت باد را به‌عنوان یک پارامتر ورودی اضافه کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که روش هارگریوز-سامانی اصلاح شده تخمین خوبی نسبت به داده‌های واقعی لایسیمتر دارد (Cobaner et al. 2017). محققان در پژوهشی روی یک چمنزار مرطوب در فلوریدای آمریکا نتیجه گرفتند که مدل پنمن-مانتیت کالیبره شده نتایج خوبی برای تبخیر-تعرق پتانسیل ارائه داده است ولی روش‌های پریستلی-تیلور و پنمن، مقدار تبخیر-تعرق را بیشتر تخمین زده‌اند و همچنین روش‌های تورک و مک‌کینک تقریباً به‌خوبی روش پنمن-مانتیت عمل کرده‌اند (Jacobs et al. 2004; Jacobs et al. 2002). در پژوهشی دیگر، سه روش (بلانی-کریدل، تورنت وایت و هارگریوز-سامانی) برای برآورد

تعرق و کاربردهای متنوع آن در علوم مختلف، محاسبه مقدار آن از اهمیت بالایی برخوردار است.

تبخیر-تعرق شامل تبخیر از سطح خاک مرطوب و تعرق از روزنه برگ‌های پوشش گیاهی موجود بر روی همان خاک است. به‌طور کلی، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. تبخیر-تعرق به‌طور مستقیم توسط لایسیمتر اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به صورت غیرمستقیم توسط روش‌های تجربی متعددی صورت می‌گیرد که عملکردشان بسته به شرایط اقلیمی مختلف تغییر می‌کند. این روش‌ها در پنج گروه ترکیبی، دمایی، تشعشعی، رطوبتی و تشت تبخیر طبقه‌بندی می‌شوند (Sharifian et al. 2006).

در روش‌های ترکیبی از دو جزء آئرودینامیکی و بیلان انرژی استفاده می‌شود. از نخستین معادلات ارائه شده می‌توان به روش پنمن اشاره کرد که در سال ۱۹۴۸ توسط پنمن معرفی شد (Penman 1948). محققان روش ترکیبی فائو-پنمن-مانتیت را به‌عنوان روشی معتبر برای تخمین تبخیر-تعرق توصیه کردند (Allen et al. 1998). با وجود دقت زیاد این روش، وابستگی به پارامترهای متعدد هواشناسی ضعف این روش محسوب می‌شود و بنابراین، استفاده از این معادله در همه زمان‌ها و مکان‌ها میسر نمی‌شود. در معادلات گروه دمایی پارامتر اصلی دمای هواست و معمولاً برای ایستگاه‌هایی که فاقد آمار کامل هواشناسی هستند، به‌کار می‌رود. در معادلات گروه تشعشعی از انرژی خورشید به‌عنوان عامل اصلی در تبخیر-تعرق استفاده می‌شود و در معادلات گروه رطوبتی هم عواملی نظیر رطوبت نسبی و دما مؤثرند. همچنین برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل می‌توان از داده‌های اندازه‌گیری شده تشت تبخیر به‌عنوان روش مقبول استفاده کرد (Nazari Ghamarnia and Soltani 2019; and Kaviani 2016). برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل از داده‌های تشت، باید از ضریب تشت استفاده کرد. به‌گونه‌ای که داده‌های به دست آمده تشت تبخیر در این ضریب ضرب می‌شوند و مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل را به دست می‌دهند. ضریب تشت (K_{pan}) به عواملی همچون سرعت باد، رطوبت و فاصله پوشش گیاهی^۱ از جهتی که باد به سمت تشت می‌وزد بستگی دارد (Doorenbos and Pruitt 1977).

^۱Greening distance

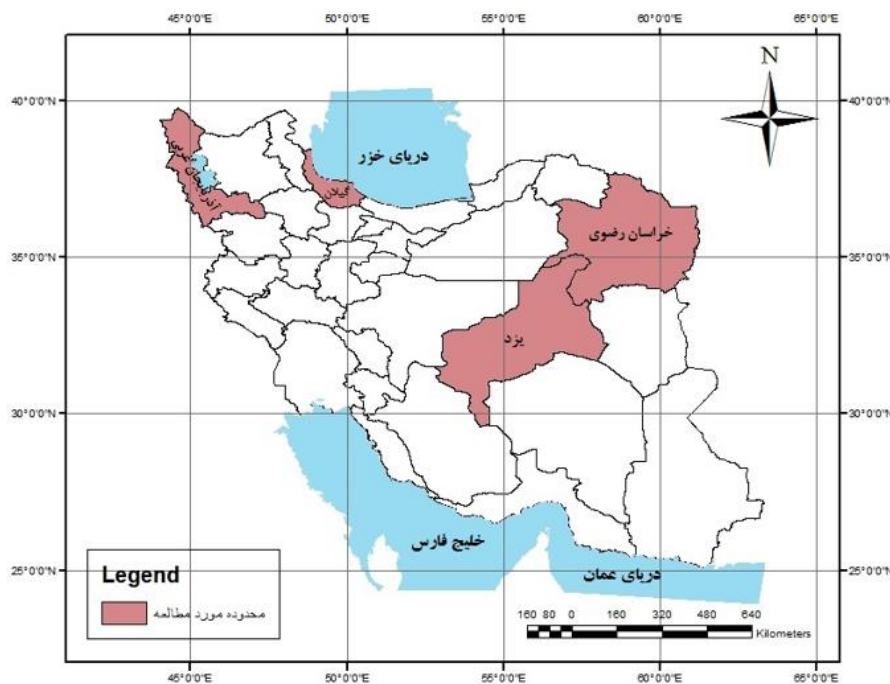
مناطق مختلف لازم است (Vanzyl et al. 1989). از آنجایی که لازم است قبل از استفاده از هر معادله یا مدلی در هر منطقه عملیات کالیبره و صحت‌سنجی انجام شود. لذا در این پژوهش تلاش شد تا یک معادله از هر گروه معادلات تجربی برای اقلیم‌های مختلف ایران، کالیبره و مورد ارزیابی و صحت‌سنجی قرار گیرد.

۲- مواد و روش کار

۲-۱- ایستگاه‌های مورد مطالعه

با استفاده از اقلیم‌نمای کوپن، چهار ایستگاه هواشناسی ارومیه در شمال غرب با اقلیم نیمه‌مرطوب، رشت در شمال با اقلیم مرطوب، مشهد در شمال شرق با اقلیم نیمه‌خشک و یزد در مرکز ایران با اقلیم خشک انتخاب شدند (شکل ۱). خصوصیات ایستگاه‌های هواشناسی در جدول (۱) ارائه شده‌اند.

ET پتانسیل در شهرستان امیدیه مورد مقایسه قرار گرفتند که بر اساس نتایج روش بلانی-کریدل نسبت به سایر روش‌ها با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین میزان خطای استاندارد با روش FAO-56 از دقت بیشتری برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل برخوردار بود (Asareh and Davoudi 2014). نتایج حاصل از مطالعه‌ای که در ایستگاه سینوپتیک زاهدان انجام شد نشان داد روش‌های بر پایه انتقال جرم از نظر آماری ضعیف‌ترین عملکرد را نسبت به سایر روش‌ها در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 نشان دادند؛ اما مدل‌های دمایی و تشعشعی مانند مدل تورک، جنسن-هیز، هارگریوز و بلانی-کریدل می‌توانند جایگزین مناسبی برای روش ترکیبی نسبتاً پیچیده FAO-56، برای اقلیم گرم و خشک شهرستان زاهدان باشند (Kahkhamoghadam 2017). بنابراین، با توجه به اینکه هر معادله در منطقه‌ای خاص و با شرایط آب و هوایی محل استخراج شده است، واسنجی روابط برآورد تبخیر-تعرق در



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و محدوده‌های مورد مطالعه

Fig. 1 Geographical location and studied areas

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Table 1 Details of meteorological stations studied

Station	Climate	Latitude	Longitude	Elevation (m)
Urmia	Semi-Humid	37° 40'	45° 3'	1328
Rasht	Humid	37° 19'	49° 37'	-8.6
Mashhad	Semi-Arid	36° 16'	59° 38'	999.2
Yazd	Arid	31° 54'	54° 17'	1237.2

معادلات مورد استفاده در این پژوهش از دو گروه دمایی شامل: هارگریوز-سامانی (H.S) و بلانی-کریدل (B.C) و گروه تشعشعی شامل: پریستلی-تیلور (P.T)، تورک (T) و مک‌کینک (Mak) انتخاب شدند. فرم اصلی معادلات در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول ۲- معادلات مورد استفاده در پژوهش
Table 2 Equations used in this research

Number	Name of Equation	Equation	Reference
1	FAO-56	$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{890}{T + 273}\right) U_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$	FAO-56 (1998)
2	Hargreaves-Samani	$ET_o = 0.0023R_a \sqrt{T_{max} - T_{min}} (T_{mean} + 17.8)$	Hargreaves and Samani (1985)
3	Blaney-Criddle	$ET_o = a + b(P(0.46T_{mean} + 8.13))$	Blaney and Criddle (1950)
4	Priestley-Taylor	$ET_o = 1.26 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \left(\frac{R_n - G}{\lambda}\right)$	Priestley and Taylor (1972)
5	Makkink	$ET = 0.61 \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}\right) \left(\frac{R_s}{2.45}\right) - 0.12$	Makkink (1957)
6	Turc	$ET = 0.013 \frac{(23.89R_s + 50)T_{avg}}{(T_{avg} + 15)}$	Turc (1961)

موجود با داده‌های روش FAO-56 مورد مقایسه قرار گرفته و پس از بررسی آماری بین داده‌های روش FAO-56 با داده‌های لایسیمتری، FAO-56 به‌عنوان روش مینا برای سال‌های فاقد داده لایسیمتری در هر ایستگاه در نظر گرفته شد.

جدول ۳- پارامترهای مورد استفاده در پژوهش
Table 3 Parameters used in research

Station	Parameters	Date of data collection
Urmia	min, max and mean temperature	1995-2010
Rasht	air, net radiation	1990-2010
Mashhad	(Mj/m ² .d), min and max relative humidity, wind speed, max sunny hours (N), real hours of sunny (n), rain (mm)	1995-2010
Yazd		1994-2010

به‌منظور استخراج ضرایب واسنجی معادلات از روش بهینه‌سازی غیرخطی بر پایه کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا استفاده شد. این روش بر اساس تغییر ضرایب انتخاب شده‌ی رابطه مربوطه، معادله را واسنجی می‌کند.

Solver که از ابزارهای اکسل است ابزاری قدرتمند برای بهینه‌سازی می‌باشد. Solver قدرت حل اکثر مسائل بهینه‌سازی از جمله برنامه‌ریزی خطی، برنامه‌ریزی غیرخطی و برنامه‌ریزی عدد صحیح را دارد. اکسل از الگوریتمی به نام کاهش گرادیان تعمیم‌یافته (GRG)^۱ برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی و الگوریتم سیمپلکس برای حل مسائل

۲-۲- روش پژوهش

روش FAO-56 یکی از معتبرترین روش‌ها برای تخمین ET₀ به‌شمار می‌رود و مورد توجه متخصصان قرار دارد. پژوهش‌های انجام گرفته در نقاط مختلف جهان، بیان‌کننده این نکته است که دقت مقادیر تبخیر-تعرق برآورد شده با معادله FAO-56 در مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده لایسیمتری از دیگر معادله‌های تخمین بهتر است (Allen et al. 1998). معادله FAO-56 میزان ET₀ را بر اساس تابش خالص خورشیدی، رطوبت نسبی، سرعت باد و دمای هوا محاسبه می‌کند. اما در ایران و بسیاری از کشورها، ایستگاه‌های هواشناسی که دمای هوا را اندازه می‌گیرند، مجهز به ابزار موردنیاز برای اندازه‌گیری سایر پارامترها نیستند (Cobaner et al. 2017). به علت پیچیدگی‌های معادله FAO-56 و کمبود داده در برخی مناطق، متخصصان سعی کرده‌اند، با استفاده از رابطه بین چند پارامتر اساسی با تبخیر-تعرق، یک سری روابط تجربی به دست آورند.

در این پژوهش از داده‌های هواشناسی موردنیاز برای کشاورزی از قبیل دما، سرعت باد، تابش خورشیدی، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و بارندگی ایستگاه‌های سینوپتیک برای هر چهار ایستگاه استفاده شد (جدول ۳). مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع با استفاده از روش‌های مذکور برای تمام ایستگاه‌ها با ۷۰٪ داده‌های موجود به دست آمد. سپس نتایج حاصل از این معادلات کالیبره شده که از ۳۰٪ باقیمانده داده‌ها حاصل شده است با مقادیر مشاهداتی ارزیابی و صحت‌سنجی شد. در پژوهش حاضر، به دلیل ناکافی بودن داده‌های لایسیمتری در مناطق مورد مطالعه، داده‌های لایسیمتری

¹Generalized Reduced Gradient

برنامه‌ریزی خطی استفاده می‌کند. روش GRG یک نسخه گسترش یافته از روش کاهش گرادیان است که در ابتدا فقط برای حل مسائل غیرخطی بهینه‌سازی با قیود خطی بسط پیدا کرد. ایده به کار رفته در این روش، کاهش تعداد متغیرهای بهینه‌سازی مستقل در تابع هدف اصلی به‌وسیله دستکاری در قیود مساوی است.

۲-۳- معیارهای آماری واسنجی

بعد از محاسبه تبخیر-تعرق روش‌های تجربی و ترکیبی در تحقیق حاضر به‌منظور ارزیابی دقت تخمین هر یک از روش‌ها، نتایج به‌دست‌آمده با ۳۰٪ داده‌ها به‌وسیله شش آماره خطاسنجی که در روابط (۱) تا (۵) اشاره شده مورد مقایسه قرار می‌گیرد. بدین منظور از میانگین خطای مطلق (MAE)^۱، ریشه جذر مربعات خطا (RMSE)^۲، میانگین خطای اریب (MBE)^۳، ضریب همبستگی (r)، شاخص نش-ساتکلیف (NS) استفاده شده است.

استفاده از روش FAO-56 محاسبه و سپس مقادیر به دست آمده با داده‌های لایسیمتری موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه آماری تبخیر-تعرق محاسبه شده با روش FAO-56 و داده‌های لایسیمتر (مطابق جدول ۴) نشان داد که این روش با کمترین مقدار RMSE (ریشه میانگین مربعات خطا) در سه ایستگاه ارومیه، رشت و یزد، روش برآورد مناسبی از تبخیر-تعرق بر مبنای داده‌های لایسیمتری را تولید می‌کند. همچنین دارای بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطای استاندارد (MAE) در این سه ایستگاه است. در ادامه جدول ۴، مقایسه آماری داده‌های حاصل از FAO-56 با داده‌های لایسیمتر برای ایستگاه مشهد بیانگر بیشترین مقدار RMSE، MAE و MBE است و با بیش برآورد نسبت به داده‌های لایسیمتر و زیاد بودن جذر میانگین مربعات خطا ارتباط ضعیفی با روش مرجع FAO-56 دارد، گرچه مقدار ضریب همبستگی در این ایستگاه بالاست که یکی از علل آن را داده‌های ناکافی لایسیمتر در این منطقه می‌توان مطرح کرد. اما به‌طور کلی این مقادیر با داده‌های مشاهداتی موجود تطابق خوبی داشتند و از آنها به عنوان داده مشاهداتی در این پژوهش استفاده گردید.

جدول ۴- مقایسه آماری روش FAO-56 و داده‌های لایسیمتری

Table 4 Statistical comparison of FAO-56 method and lysimetric data

Station	RMSE	MAE	MBE	r
Urmia	1.507	1.22	-0.02	0.66
Rasht	1.537	1.42	-1.33	-0.14
Mashhad	5.05	4.08	-3.99	0.94
Yazd	1.201	0.98	0.06	0.86

از این رو در شرایطی که داده‌های کامل در اختیار نباشد، استخراج معادلات ساده و قابل استفاده با حداقل داده‌های هواشناسی با دقت قابل قبول، ضروری است. از طرفی معادلات حاصله ممکن است در اقلیم‌های مختلف دارای عملکردی متفاوت باشند. بنابراین لازم است معادلات مستخرج قبل از توصیه، برای اقلیم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. در این راستا، در مطالعه حاضر سعی در واسنجی و ارزیابی پنج معادله بلانی-کریدل، هارگریوز-سامانی، پرستلی-تیلور، مک‌کینک و تورک در چهار ایستگاه، بر پایه روش FAO-56 گردید. در رابطه با ایستگاه مشهد مقادیر آماره‌ها خطای بالایی را نمایش می‌دهند که این امر به دلیل کمبود داده‌های لایسیمتری در این ایستگاه می‌باشد. اما از آنجایی که در مطالعات دیگر پژوهشگران (Shahedi and Zarei 2012;

که، $\overline{ET(Sim)}$ تبخیر-تعرق برآورد شده با روش‌های تجربی و ترکیبی و $ET(Obs)$ تبخیر-تعرق بدست آمده از روش FAO-56 در منطقه مطالعاتی و $ET(Obs)$ میانگین تبخیر-تعرق بدست آمده از روش FAO-56 در منطقه مطالعاتی، میانگین تبخیر-تعرق برآورد شده با روش‌های تجربی و ترکیبی و N: تعداد داده‌ها.

$$MAE = N^{-1} \sum_{i=1}^N |ET(Sim)_i - ET(Obs)_i| \quad (1)$$

$$MBE = N^{-1} \sum_{i=1}^N (ET(Sim)_i - ET(Obs)_i) \quad (2)$$

$$RMSE = \left[N^{-1} \sum_{i=1}^N (ET(Sim)_i - ET(Obs)_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})(ET(Sim) - \overline{ET(Sim)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2 \sum_{i=1}^N (ET(Sim) - \overline{ET(Sim)})^2}} \quad (4)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (ET(Sim) - ET(Obs))^2}{\sum_{i=1}^N (ET(Obs) - \overline{ET(Obs)})^2} \quad (5)$$

۳- یافته‌ها و بحث

۳-۱- ارزیابی روش FAO-56 با داده‌های لایسیمتر

در پژوهش حاضر به جهت ناکافی بودن داده‌های لایسیمتری در ایستگاه‌های موردنظر، میزان تبخیر-تعرق در این نقاط با

¹Mean Absolute Error

²Root Mean Squared Error

³Mean Bias Error

با تغییر ضرایب آنها اصلاح گردید. به منظور استخراج ضرایب واسنجی، از روش بهینه‌سازی غیرخطی بر پایه کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا که محاسبات این روش با استفاده از Solver در نرم‌افزار Excel انجام شد. این روش بر اساس تغییر ضرایب انتخاب شده رابطه مربوطه، معادله را واسنجی می‌کند. ضرایب واسنجی شده معادلات محاسبه تبخیر-تعرق برای ایستگاه‌های مختلف با استفاده از ۷۰٪ اطلاعات هواشناسی در جدول (۵) ارائه شده است.

(Kahkhamoghadam 2017) و همچنین انجام پروژه‌های آبیاری و زهکشی در حال حاضر از داده‌های مستخرج از روش FAO-56 استفاده می‌شود، لذا در این پژوهش نیز ضمن اشاره به احتمال بروز خطا در ارزیابی‌ها، اما با این وجود از نتایج روش FAO-56 برای ارزیابی استفاده شده است.

۳-۲- واسنجی ضرایب معادلات

با استفاده از داده‌های مشاهداتی تبخیر-تعرق به دست آمده از داده‌های لایسیمتری مقدار تبخیر-تعرق معادلات مختلف

جدول ۵- ضرایب معادلات واسنجی شده

Table 5 Coefficients of calibrated equations

Eq.	Station	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
H.S	Urmia	0.0038	20	0.4	-	-	-	-	-	-	-
	Rasht	0.0020	20	0.56	-	-	-	-	-	-	-
	Mashhad	0.0044	20	0.4	-	-	-	-	-	-	-
	Yazd	0.0040	20	0.4	-	-	-	-	-	-	-
B.C	Urmia	0.009	2.37	1.12	0.001	0.32	0.34	0.0003	0.0001	0.17	9.99
	Rasht	0.013	3.52	1.32	0.001	0.92	0.53	0.008	0.0001	0.09	9.91
	Mashhad	0.0054	1.29	0.82	0.001	0.22	0.21	0.001	0.0003	0.24	9.99
	Yazd	0.0041	2.11	0.95	0.0007	0.039	0.22	0.001	0.0002	0.22	13.3
P.T	Urmia	1.40	0.62	17.55	1.63	98.86	0.0065	5.28	-	-	-
	Rasht	2.84	0.49	0.1	1.91	118.71	0.0064	5.25	-	-	-
	Mashhad	1.9	0.66	18.84	0.1	92.14	0.0065	5.31	-	-	-
	Yazd	0.86	0.61	11.32	2.10	101.4	0.0064	5.25	-	-	-
T	Urmia	0.012	0.71	0.1	41.15	8.40	-	-	-	-	-
	Rasht	0.008	0.43	0.35	15.22	0.73	-	-	-	-	-
	Mashhad	0.011	0.54	0.35	10	2.68	-	-	-	-	-
	Yazd	0.012	0.5	0.5	10	6.66	-	-	-	-	-
Mak	Urmia	0.57	0.61	17.49	1.81	100.33	0.0065	5.27	0.49	0.42	0.82
	Rasht	0.57	0.66	18.24	0.1	91.95	0.0064	5.25	0.35	0.29	0.062
	Mashhad	0.70	0.66	19.78	0.1	92.38	0.0065	5.31	0.48	0.47	1
	Yazd	0.69	0.66	19.81	0.1	92.15	0.0065	5.32	0.23	0.77	1

مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه‌ای تطابق بهتری با مقدار تبخیر-تعرق معادله FAO-56 دارند.

ضرایب اصلی معادله بلانی-کریدل در جدول (۶) و نتایج ضرایب اصلاحی در جدول (۵) ارائه شده است. براساس جدول (۵) استنباط می‌شود که مقدار این ضرایب تقریباً به مقادیر اصلی آن نزدیک بوده و همخوانی دارند. بر اساس بررسی مقادیر تبخیر-تعرق پس از اعمال ضرایب اصلاحی در معادله، مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه‌ای نسبت به مقادیر مشاهده‌ای تبخیر-تعرق از تطابق خوبی برخوردار است.

ضرایب معادله اصلی هارگریوز-سامانی طبق جدول (۶) و از آنجا که تنها پارامتر مؤثر در این معادله دمای هوا می‌باشد باید ضرایب این معادله بر اساس شرایط منطقه موردنظر واسنجی شود تا برآوردها از دقت مناسبی نسبت به معادله FAO-56 برخوردار باشد. با توجه به اینکه بین مقادیر به دست آمده (جدول ۵) و ارائه شده توسط سایر پژوهش‌ها اختلاف چندانی مشاهده نمی‌شود (Xu and Singh 2001; Martinez-Cob et al. 2004; Berti et al. 2014). می‌توان نتیجه گرفت که واسنجی ضرایب این معادله برای این مناطق قابل قبول است. با اعمال مقدار ضرایب اصلاحی،

از بررسی ضرایب اصلی و واسنجی شده معادله تورک نیز نتیجه می‌شود که مقدار این ضرایب در ایستگاه‌های ارومیه و یزد تقریباً به مقادیر اصلی آن نزدیک است. بر اساس بررسی مقادیر تبخیر-تعرق پس از اعمال ضرایب اصلاحی در معادله، تطابق خوبی بین مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه‌ای و مقدار تبخیر-تعرق معادله FAO-56 برقرار است.

ضرایب معادله اصلی مک‌کینک در جدول (۶) ذکر شده است. بر اساس پژوهشی که در منطقه واد سوئیس انجام شد، مقدار به دست آمده برای ضریب a در معادله مک‌کینک برابر با ۰/۷۰ بود که تفاوت چندانی بین برآورد تبخیر-تعرق با معادله اصلاحی و تبخیر-تعرق معادله اصلی گزارش نشد (Xu and Singh 2002).

براساس پژوهشی که در منطقه Vaud در سوئیس انجام دادند مقدار به دست آمده برای ضریب a در معادله پرستلی-تیلور به جای ۱/۲۶ برابر با ۰/۹ بود که با نتایج سایر پژوهش‌ها در مناطق مرطوب تطابق دارد (Xu and Singh 2002). البته با توجه به اینکه ایستگاه رشت دارای اقلیم مرطوب است، مقدار واسنجی شده این ضریب طبق پژوهش‌های قبل برای این نوع اقلیم مقدار مناسبی نیست. زیرا مقدار ضرایب در این منطقه بالاتر از حد مجاز (۱۸/۲۶-۱/۱) در این فرمول بود. مقدار این ضریب طبق جدول (۵) برای ۳ اقلیم دیگر به مقدار اصلی نزدیک بوده و با اعمال آن در معادله و برآورد میزان تبخیر-تعرق، این مقادیر با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارد.

جدول ۶- مقادیر اصلی ضرایب معادلات برآورد تبخیر-تعرق

Table 6 The main values of the coefficients of the equations for estimating evapotranspiration

Eq.	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
H.S	0.0023	17.8	0.5	-	-	-	-	-	-	-
B.C	0.0043	1.41	0.82	0.0041	1.07	0.066	0.006	0.0006	0.46	8.13
P.T	1.26	0.6108	17.27	2	101.3	0.0065	5.26	-	-	-
Mak	0.61	0.6108	17.27	2	101.3	0.0065	5.26	0.25	0.5	0.12
T	0.013	0.25	0.5	50	15	-	-	-	-	-

جدول ۷- مقایسه روش‌های مختلف واسنجی شده برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با مقادیر مشاهده‌ای توسط شاخص‌های آماری

Table 7 Comparison of different calibrated methods for estimating the evapotranspiration of reference plant with the observed values by statistical indexes

Station	Eq.	r	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	N.S
Urmia	H.S	0.96	0.53	0.0058	0.0095	0.90
	B.C	0.99	0.14	-0.0093	0.0012	1
	P.T	0.94	0.77	-0.34	0.0098	0.80
	T	0.93	0.90	-0.36	0.0081	0.72
	Mak	0.96	0.43	-0.0023	0.000000023	0.94
Rasht	H.S	0.90	0.54	-0.17	0.0038	0.67
	B.C	0.99	0.11	-0.0024	0.00065	0.99
	P.T	0.91	0.68	-0.29	0.0053	0.47
	T	0.92	0.36	-0.04	0.0015	0.85
	Mak	0.92	0.37	-0.05	-0.0019	0.85
Mashhad	H.S	0.97	0.55	0.0052	0.0039	0.94
	B.C	0.99	0.11	-0.0039	0.0022	1
	P.T	0.92	1.09	-0.277	0.0040	0.78
	T	0.96	0.68	-0.14	0.010	0.91
	Mak	0.96	0.61	-0.10	0.012	0.93
Yazd	H.S	0.92	0.82	0.0036	0.0096	0.85
	B.C	0.99	0.12	-0.0095	0.0023	1
	P.T	0.93	0.77	0.19	0.014	0.87
	T	0.92	0.79	-0.035	0.00000003	0.86
	Mak	0.91	0.90	-0.12	0.010	0.82

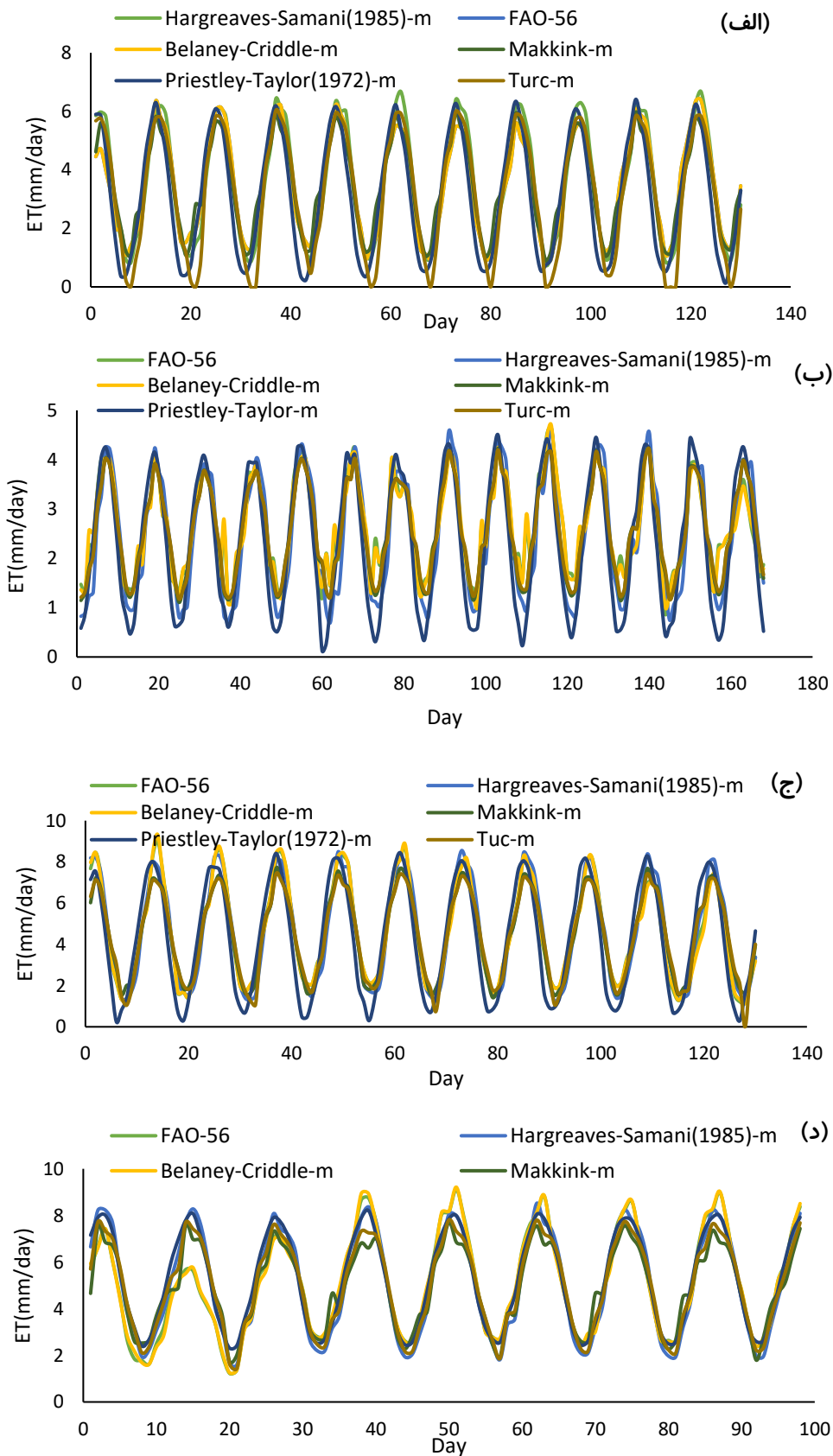
۳-۳- ارزیابی آماری معادلات با ضرایب جدید

به منظور ارزیابی دقیق تر معادلات حاصل، از شاخص های آماری برای مقایسه نتایج هر کدام از ۵ روش با داده های مشاهداتی صورت گرفت که در جدول (۷) آمده است. از مقایسه آماری روش های دمایی برای هر چهار ایستگاه، روش بلانی-کریدل با بالاترین مقدار r و کمترین مقدار $RMSE$ روش برتر انتخاب شد و در بین روش های تشعشعی، برای ایستگاه های ارومیه و مشهد، روش مک کینک با مقادیر r و $RMSE$ به ترتیب ۰/۹۶ و ۰/۴۳ در ارومیه و ۰/۹۶ و ۰/۶۱ در مشهد و در ایستگاه رشت روش تورک با مقادیر r و $RMSE$ ۰/۹۲ و ۰/۳۶ و در ایستگاه یزد روش پریستلی-تیلور با مقادیر r و $RMSE$ ۰/۹۳ و ۰/۷۷ روش های برتر در این ایستگاه ها شناخته شدند. علت تفاوت در برآوردها، اقلیم متفاوت هر منطقه است که بر داده های هواشناسی تأثیر داشته و منجر به این اختلاف شده است.

مقایسه آماری تبخیر-تعرق محاسبه شده با استفاده از روش FAO-56 و معادلات انتخابی در جدول (۷) نشان داد که در هر چهار ایستگاه روش بلانی-کریدل دارای کمترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا با مقادیر حدود (۰/۱۴ - ۰/۱۱) در مقابل روش تورک در ایستگاه ارومیه است. روش پریستلی-تیلور در ایستگاه های رشت و مشهد و روش مک کینک در ایستگاه یزد که دارای بیشترین مقدار $RMSE$ با مقادیر به ترتیب ۰/۹۰، ۰/۶۸، ۱/۰۹ و ۰/۹۰ می باشد. بنابراین با توجه به اینکه هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچک تر باشد مناسب تر است، روش بلانی-کریدل بهترین نتیجه را بر اساس این شاخص داراست. هم چنین روش بلانی-کریدل دارای بالاترین همبستگی به مقدار (۰/۹۹) در هر ۴ ایستگاه می باشد. مقدار MBE این روش نیز در هر ۴ ایستگاه منفی بوده که نشان از برآورد کمتر این روش نسبت به مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده با FAO-56 است.

مقدار MBE همه روش ها در همه ایستگاه ها به جز روش پریستلی-تیلور منفی می باشد که نشان دهنده برآورد کمتر تبخیر-تعرق نسبت به روش FAO-56 است. به طور کلی در بررسی هایی که بر روی این ۵ روش برآورد صورت گرفت روش بلانی-کریدل با کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE$)، بیشترین همبستگی و مقدار منفی میانگین خطای اریب (MBE) به عنوان روش برتر بین سایر روش ها برای هر ۴ ایستگاه و اقلیم های مختلف انتخاب گردید که می توان در صورت دسترسی به حداقل داده های مورد نیاز (دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی) با استفاده از روش بلانی-کریدل برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش FAO-56 را به دست آورد.

در پژوهشی در ایران، تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش های بلانی-کریدل، هارگریوز و ترنت وایت برای اقلیم های مختلف بر اساس اقلیم نامی یونسکو در مقایسه با روش استاندارد FAO-56 بررسی شد، نشان داده شده است که روش بلانی-کریدل در اقلیم های خشک، نیمه خشک و مرطوب بهترین برآورد را داراست. نتایج این مطالعه بیان کرد در شرایطی که در اقلیم های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده های مورد نیاز، برآورد تبخیر-تعرق مرجع از روش فائو-پنمن-مانتیت ممکن نباشد، با بهره گیری از معادلات واسنجی شده می توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش فائو-پنمن-مانتیت دست یافت (Pashakhah et al. 2014). همچنین در مطالعه ای دیگر که در زمینه ارزیابی مدل مناسب تبخیر-تعرق بالقوه در ایران انجام گرفت، از چهار روش تورنت وایت، جنسن-هیز، بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی استفاده شد و به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل همخوانی بهتری با شرایط ایران دارد (Roushan et al. 2011). شکل (۲) روند برآورد تبخیر-تعرق مرجع بر اساس روش های هارگریوز-سامانی، بلانی-کریدل، پریستلی-تیلور، تورک و مک کینک در هر ۴ ایستگاه نسبت به روند برآوردهای FAO-56 را نشان می دهد.



شکل ۲- روند برآورد تبخیر-تعرق روش‌های واسنجی شده نسبت به داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های: الف) - ارومیه، ب) - رشت، ج) - مشهد، و د) یزد

Fig. 2 Evaluation trend of evapotranspiration of calibrated methods compared to observational data in: a) Urmia, b) Rasht, c) Yazd, and d) Mashhad stations

با بررسی که بر روی داده‌های تبخیر-تعرق حاصل از روش‌های واسنجی شده بر اساس شاخص نش-ساتکلیف (N.S) انجام شد، مشخص گردید که روش بلانی-کریدل بر اساس این شاخص روش برتر بوده و مقدار این شاخص در ایستگاه‌های ارومیه، مشهد و یزد برابر یک و در ایستگاه رشت برابر

جدول ۸- صحت‌سنجی روش‌های واسنجی شده برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع با داده‌های مشاهداتی توسط شاخص‌های آماری

Table 8 Validation of calibrated methods for estimating evapotranspiration of reference plant with observational data by statistical indexes

Station	Eq.	r	RMSE (mm/day)	MBE (mm/day)	MAE (mm/day)	N.S
Urmia	H.S	0.98	0.59	-0.46	0.0058	0.89
	B.C	0.99	0.13	0.072	0.0014	0.99
	P.T	0.93	1.23	-1.007	0.0020	0.52
	T	0.81	2.16	-1.13	0.0051	0.47
	Mak	0.98	0.78	-0.66	0.0096	0.81
Rasht	H.S	0.93	1.13	-1.02	0.0005	0.27
	B.C	0.99	0.18	0.09	0.0007	0.98
	P.T	0.92	1.28	-1.17	0.0089	0.07
	T	0.95	1.02	-0.88	0.59	0.41
	Mak	0.95	1.02	-0.89	0.57	0.4
Mashhad	H.S	0.98	0.66	0.44	0.11	0.92
	B.C	0.99	0.18	-0.023	0.0076	0.99
	P.T	0.91	1.10	0.077	0.030	0.77
	T	0.94	0.88	0.37	0.014	0.85
	Mak	0.97	0.67	0.33	0.015	0.92
Yazd	H.S	0.97	0.53	-0.16	0.021	0.94
	B.C	0.99	0.089	0.005	0.00097	1
	P.T	0.99	0.31	-0.00055	0.017	0.98
	T	0.96	0.61	-0.21	0.031	0.92
	Mak	0.95	0.82	-0.35	0.040	0.85

که نشان از برآورد کمتر این روش نسبت به مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده با FAO-56 است اما در سایر ایستگاه‌ها مقدار آن مثبت است که به معنای برآورد بیشتر این روش نسبت به مقادیر تبخیر-تعرق محاسبه شده با FAO-56 دارد. علت بیش برآورد در سه ایستگاه دیگر را می‌توان وابستگی این معادله تنها به یک پارامتر دانست و در اقلیم مرطوب طبیعتاً انتظار می‌رود رطوبت بیشترین نقش را در برآورد تبخیر-تعرق داشته باشد در حالیکه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ترجیحاً دما تعیین‌کننده خواهد بود.

بطور کلی در بررسی‌هایی که بر روی این ۵ روش برآورد صورت گرفت روش بلانی-کریدل با کمترین مقدار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و بیشترین همبستگی (r) به‌عنوان روش برتر بین سایر روش‌ها برای هر ۴ ایستگاه و اقلیم‌های مختلف انتخاب گردید. همان‌طور که در جدول فوق

مقایسه آماری مقادیر تبخیر-تعرق با استفاده از معادلات واسنجی شده به‌منظور صحت‌سنجی روش‌ها در جدول فوق ارائه شده است که در هر چهار ایستگاه روش بلانی-کریدل دارای کمترین میزان ریشه میانگین مربعات خطا با مقادیر حدود (۰/۱۸ - ۰/۰۸۹) در مقابل روش تورک در ایستگاه ارومیه، روش پرستلی-تیلور در ایستگاه‌های رشت و مشهد و روش مک‌کینک در ایستگاه یزد که دارای بیشترین مقدار RMSE با مقادیر به‌ترتیب ۲/۱۶، ۱/۲۸، ۱/۱۰، و ۰/۸۲ می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه هرچه مقدار ریشه میانگین مربعات خطا کوچکتر باشد بهتر است، روش بلانی-کریدل بهترین نتیجه را بر اساس این شاخص داراست. همچنین روش بلانی-کریدل دارای بالاترین همبستگی به مقدار (۰/۹۹) در هر ۴ ایستگاه می‌باشد و مقدار میانگین خطای اریب (MBE) این روش تنها در ایستگاه مشهد منفی بوده

تورک واسنجی شده با r و RMSE به ترتیب ۰/۹۲، ۰/۹۳ و ۰/۱۱، ۰/۱۲ در اولویت بعدی قرار می‌گیرد.

۴- روش بلانی-کریدل واسنجی شده، پس از روش FAO-56 که روش مینا بود، با بیش‌ترین میزان r کم‌ترین میزان RMSE و شاخص N.S حدود ۱، در هر چهار ایستگاه مورد مطالعه برآورد مناسبی از تبخیر-تعرق در اقلیم‌های مختلف می‌دهد.

در شرایطی که در اقلیم‌های مورد مطالعه به دلیل عدم دسترسی به داده‌های موردنیاز، برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع از روش FAO-56 ممکن نباشد، با بهره‌گیری از معادلات واسنجی شده می‌توان به برآوردهای مشابه از نظر آماری با روش FAO-56 دست یافت.

سیاسگزاری

در پایان این پژوهش از سازمان هواشناسی کشور بخاطر در اختیار گذاشتن داده‌های موردنیاز صمیمانه تشکر می‌گردد.

دسترسی به داده‌ها

داده‌های استفاده شده (یا تولیدشده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

References

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. and Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirement. Irrig. Drain. (No. 56). FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A and Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. Agri. Water Manage., 98, 921-929.
- Asareh, A. and Davoudi, H. (2014). Evaluating the Methods of Estimating Potential Evapotranspiration in Omidiyeh Town. J. Water Sci. Eng., 10(4), 63-74 [In Persian].
- Berti, A., Tardivo, G., Chiaudani, A., Rech, F. and Borin, M. (2014). Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. Agri. Water Manage., 140, 20-25.
- Blaney, H. F. and Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. Washington Soil Conservation Service (SCS). (Vol. 96).
- Cobaner, M., Citakoğlu, H., Haktanir, T. and Kisi, O. (2017). Modifying Hargreaves-Samani equation with meteorological variables for estimation of reference

نشان داده شده، مقدار شاخص نش-ساتکلیف (N.S) برای روش بلانی-کریدل در تمامی ایستگاه‌ها مقداری نزدیک به یک داشته که بیانگر دقت خوب این روش در برآورد میزان تبخیر-تعرق مرجع می‌باشد. همانطور که قبلاً در بخش واسنجی معادلات بیان شد نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های دیگر محققان انطباق دارد.

۴- نتیجه‌گیری

تخمین دقیق تبخیر-تعرق گیاه مرجع در برنامه‌ریزی‌های آبیاری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. لذا در پژوهش حاضر سعی گردید تا میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع با روش‌های مختلف تجربی برای ۴ ایستگاه هواشناسی برآورد و دقیق-ترین روش پیشنهاد شود. در نهایت براساس تحلیل‌های آماری، نتایج نشان داد:

۱- برای ایستگاه ارومیه با اقلیم نیمه‌مرطوب استفاده از روش بلانی-کریدل واسنجی شده با $r = 0.99$ و $RMSE = 0.14$ در اولویت بوده و معادله مک‌کینک با $r = 0.96$ و $RMSE = 0.43$ در اولویت بعدی قرار دارد.

۲- در ایستگاه مشهد با اقلیم نیمه‌خشک، معادله بلانی-کریدل واسنجی شده با $r = 0.99$ و $RMSE = 0.11$ برابر و معادله هارگریوز-سامانی با $r = 0.97$ و $RMSE = 0.55$ به-ترتیب در اولویت اول و دوم برآورد تبخیر-تعرق گیاه مرجع قرار گرفته‌اند.

۳- در خصوص ایستگاه‌های رشت و یزد به ترتیب با اقلیم‌های مرطوب و خشک، اولویت استفاده از معادله بلانی-کریدل واسنجی شده با r و RMSE به ترتیب ۰/۹۹ و ۰/۱۲ و معادله

- evapotranspiration in Turkey. *Hydrol. Res.*, 48(2), 480-497.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for predicting crop-water requirements. *FAO Irrigation and Drainage*. (No. 24), (second ed). FAO, Rome, Italy, 156 pp.
- FAO. (1998). Crop Evapotranspiration (Guidelines for Computing Crop Water Requirements). *Irrig. Drain.*, Paper No.56.
- Ghamarnia, H. and Soultani, N. (2019). Evaluating the efficiency of empirical estimation of reference evapotranspiration (Pan Based Method) in different climate conditions of Iran. *Iran Water Resour. Res.*, 14(2), 174-193 [In Persian].
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agri.*, 1(2), 96-99.
- Jacobs, J. M., Mergelsberg, S. L., Lopera, A. F. and Myers, D. A. (2002). Evaporation from a wet prairie wetland under drought conditions: Paynes Prairie Preserve, Florida, USA. *Wetland.*, 22(2), 374-385.
- Jacobs, J. M., Anderson, M. C., Friess, L. C. and Diak, G. R. (2004). Solar radiation, long wave radiation and emergent wetland evapotranspiration estimates from satellite data in Florida, USA. *Hydrol. Sci. J.*, 49(3), 461-476.
- Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G. (Ed), (1990). Evapotranspiration and irrigation water requirements, *ASCE Manuals and reports on engineering practice No. 70*, 332 pp.
- Jin-Fa Chen, J. F., Yeh, H. F., Lee, Ch. H. and Lo, W. H. (2005). Optimal comparison of empirical equations for estimating potential evapotranspiration in Taiwan. *XXXI IAHR Congress*, Seoul, Korea.
- Jovzi, M., Zare Abyaneh, H., Hozhabr., H. and Khasraei, A. (2019). Estimate of potential evapotranspiration from energy balance method compared to evaporation Pan and FAO Penman-Monteith methods. *Iran. J. Irrig. Drain.*, 13(3), 727-736 [In Persian].
- Kakhkhmoghadam, P. (2017). Evaluation of reference evapotranspiration models for warm arid climate (Case study: Zahedan station). *J. Water Soil Conserv.*, 25(1), 309-317 [In Persian].
- Martinez-Cob, A. and Tejero-Juste, M. (2004). A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ET₀ estimation equation in semiarid region. *Agri. Water Manage.*, 64(3), 251-264.
- Makkink, G. F. (1957). Testing the Penman Formula by Means of Lysimeters. *J. Instit. Water Eng.*, 11(3), 277-288.
- Nazari, R. and Kaviani, A. (2016). Evaluation of potential evapotranspiration and Pan evaporative methods by lysimeter data in a semiarid climate (case study: Qazvin Plain). *Iran. J. Ecohydrol.*, 3(1), 19-30 [In Persian].
- Pashakhah, P., Pirmoradian, N., Khazdoz, N., Neshagar, H. and Moshfegh, M. (2014). Calibration and evaluation of three experimental methods for estimating reference evapotranspiration in some Iranian cities. *Nivar J.*, 38, 39-50 [In Persian].
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceed. Royal Soci. London*, A.193(1032), 120-146. Doi: 10.1098/rspa.1948.0037.
- Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Month. Weather Rev.*, 100(2), 81-92.
- Rao L. Y., Sun, G., Ford, C. R. and Vose, J. M. (2011). Modeling potential evapotranspiration of two forested watersheds in the southern Appalachians. *Am. Soci. Agri. Bio. Eng.*, 54, 2067-2078.
- Roushan, G. R., Khoshakhlagh, F. and Karampour., M. (2011). Evaluation and modification of an appropriate model of potential evapotranspiration in Iran. *Phys. Geogra. Res.*, 78, 49-68 [In Persian].
- Shahedi, K. and Zarei, M. (2012). Assessment of potential evapotranspiration estimation methods in Mazandaran Province. *J. Iran. Irrig. Water Eng.*, 1(3), 12-21. [In Persian].
- Sharifian, H. and Ghahreman, B. (2006). Evaluating of measured evapotranspiration with evaporate pan and standard potential evapotranspiration. *J. Agri. Sci. Nat. Resour.*, 13(5), 2-9. [In Persian].
- Shi, T. T., Guan, D. X., Wu, J. B. and Wang, A. Z. (2008). Comparison of methods for estimating evapotranspiration rate of dry forest canopy: Eddy covariance, Bowen ratio energy balance, and Penman-Monteith

- equation. *J. Geophys. Res.*, 113. Doi: 10.1029/2008JD010174
- Smith, M. (1993). *Climwat for CropWat: a climatic database for irrigation planning and management*. FAO Irrig. Drain. Paper, No. 49, Rome (Italy), 116 p.
- Turc, L. (1961). Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: A simple climate formula evolved up to date. *Annal. Agronom.*, 12, 13-49.
- Vanzyl, W. H., De Jager, J. M. and Maree, C. J. (1989). The relationship between daylight evaporation from short vegetation and the USWB Class A pan. *Agri. Forest Meteorol.*, 46, 107-118.
- Xu, C.-Y. and Singh, V. P. (2001). Evaluation and generalization of temperature-based method for calculating evaporation. *Hydrol. Process.*, 15(2), 305-319.
- Xu, C.-Y. and Singh, V. P. (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resour. Manage.*, 16, 197-219.

How to cite this paper:

Safari, F., Kaviani, A., Azizian Ghatar, A. and Ramezani Etedali, H. (2022). Modification of the coefficients of some equations for estimation of evapotranspiration of the reference plant. *Environ. Water Eng.*, 8(2), 411-426. DOI: 10.22034/JEWE.2021.293310.1593
