

مقایسه مفاهیم تبخیرتعرق پتانسیل و تبخیرتعرق مرجع با استفاده از داده‌های لایسیمتری در استان قزوین

محدثه السادات فخار و عباس کاویانی

دوره ۷، شماره ۴، زمستان ۱۴۰۰، صفحات ۶۸۲-۶۶۸

Vol. 7(4), Winter 2021, 668-682

DOI: 10.22034/JEWE.2021.279059.1535

**Comparison of the Concepts of Potential
Evapotranspiration (ETp) and Reference
Evapotranspiration (ETo) Using Lysimetric
Data in Qazvin Province**

Sadat Fakhar, M. and Kaviani, A.



www.jewe.ir

OPEN ACCESS

ارجاع به این مقاله:

السادات فخار، م. و کاویانی، ع. (۱۴۰۰). مقایسه مفاهیم تبخیرتعرق پتانسیل و تبخیرتعرق مرجع با استفاده از داده‌های لایسیمتری در استان قزوین. محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۷، شماره ۴، صفحات: ۶۶۸-۶۸۲.

Citing this paper: Sadat Fakhar, M. and Kaviani, A. (2021). Comparison of the concepts of potential evapotranspiration (ETp) and reference evapotranspiration (ETo) using Lysimetric data in Qazvin Province. Environ. Water Eng., 7(4), 668-682. DOI: 10.22034/JEWE.2021.279059.1535

مقاله پژوهشی

مقایسه مفاهیم تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع با استفاده از داده‌های لایسیمتری در استان قزوین

محدثه السادات فخار^{۱*} و عباس کاویانی^۲

^۱دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، قزوین، ایران
^۲دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی^(ع)، قزوین، ایران

*نویسنده مسئول: Mfakhar@edu.ikiu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۰/۰۳/۱۹]

تاریخ بازنگری: [۱۴۰۰/۰۲/۱۷]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۰/۰۱/۱۱]

چکیده

به‌منظور تعیین مقدار آب آبیاری لازم است میزان نیاز آبی گیاه یا تبخیر-تعرق محاسبه شود. معادلاتی که برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده می‌شوند، پارامترهای اقلیمی یکسانی را به‌کار نمی‌گیرند و به‌دلیل ماهیت تجربی آن‌ها برای تمام شرایط اقلیمی مناسب نیستند. تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) و تبخیر-تعرق مرجع (ET_o) در مفاهیم، معادلات و زمینه‌های کاربردی متفاوت هستند، با این حال بسیاری از پژوهشگران استفاده از این دو اصطلاح را یکسان در نظر گرفته‌اند. در این پژوهش به بررسی جامع معادلات ET_p و ET_o پرداخته شد. به‌همین منظور، با استفاده از داده‌های هواشناسی ایستگاه سینوپتیک و اطلاعات لایسیمتری منطقه به مقایسه و بررسی تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل بر مبنای چهار گروه تجربی در طی ۴ yr پرداخته شد. معادلات با استفاده از شاخص‌های آماری به‌منظور انتخاب ایده‌آل‌ترین مدل کالیبره شدند. نتایج نشان داد تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع کاملاً با یکدیگر متفاوت بودند طوری که در روش مشابه در معادلات گروه دمایی ET_p و ET_o مقدار RMSE به‌ترتیب ۱/۱۷ و ۱/۱ محاسبه شد. با بررسی‌های صورت گرفته از تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع معادلات گروه دمایی بهترین عملکرد را داشته است که نشان از برتری گروه دمایی در مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک است.

واژه‌های کلیدی: تبخیر-تعرق؛ روش تابشی؛ روش ترکیبی؛ روش دمایی



۱- مقدمه

در هیدرولوژی، زراعت، آبیاری و هواشناسی مورد استفاده قرار گرفته است (Paredes and Pereira 2019). اندازه‌گیری مستقیم ET_0 به دلایل مختلف زمان‌بر است. به دلیل محدودیت‌های اندازه‌گیری مستقیم ET_0 ، بسیاری از مدل‌های تجربی برای تخمین ET_0 در ۷۰ سال گذشته، از زمان معرفی روش Thornthwaite در سال ۱۹۴۴، مطرح شده‌اند (Tasumi 2019). روش ET_0 در مطالعات به انواع مختلف تقسیم شده است و به‌طور گسترده و در چهار گروه ترکیبی، دمایی، تشعشعی، رطوبتی و طبقه‌بندی می‌شوند (Djaman et al. 2015). تبخیر-تعرق یک سطح بدون کمبود آب و تحت مدیریت زراعی مطلوب، تبخیر-تعرق گیاه مرجع نامیده شده و با ET_0 نشان داده می‌شود. گیاه مرجع، یک گیاه فرضی با ویژگی‌های مشخص (ارتفاع $1/2m$ ، مقاومت سطحی $70s/m$ و ضریب آلبیدو $0/23$) می‌باشد. که تبخیر از این سطح به‌طور دقیق، مشابه تبخیر از سطح وسیع چمن سبز با ارتفاع یکنواخت، رشد فعال و آبیاری مناسب می‌باشد (Allen et al. 1998). بسیاری از پژوهشگران مفهوم تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل را متفاوت از یکدیگر می‌دانستند، اما برخی دیگر ET_0 و ET_P را به‌عنوان مفاهیم یکسان در نظر گرفته و از معادلات مشابه برای تخمین استفاده می‌کردند (Helm et al. 2016). زیرا مدت‌ها این دو باهم مفاهیم و معادلات مشترکی داشتند، اما واضح است که ET_0 و ET_P متفاوت هستند. توسعه تبخیر-تعرق پتانسیل برای چندین دهه ادامه یافت و برای تمایز آن از تبخیر-تعرق مرجع اصطلاح "تبخیر-تعرق پتانسیل" پس از بررسی میزان بارندگی و مصرف بی‌رویه آب در ایالات متحده برای اولین بار توسط Thornthwaite (1948) مطرح شد (Thornthwaite 1948). ET_P میزان تبخیر-تعرق مربوط به یک محصول خاص نیست. مشکل اصلی تعریف تبخیر-تعرق پتانسیل این است که، انواع مختلفی از گیاهان وجود دارد که جزء گیاهان سبز کوتاه‌قد قرار دارد. بنابراین، در بین پژوهشگران به جهت انتخاب محصولی به‌عنوان گیاه سبز کوتاه‌قد، ممکن است اشتباهی صورت گیرد. زیرا نرخ تبخیر-تعرق از محصولات کشاورزی با آبیاری مناسب ممکن است ۱۰ تا ۳۰٪ بیش‌تر از مقداری باشد که از چمن سبز کوتاه‌قد اتفاق می‌افتد (Irmak et al. 2017). در ابتدا

آب یکی از ارکان مهم در کشاورزی به حساب می‌آید. برآورد دقیق و به‌موقع تبخیر-تعرق تأثیر بسزا و حیاتی در حفظ منابع آب و کشاورزی و هیدرولوژی دارد که از این امر در تخمین آب موردنیاز محصولات، جهت برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت خشک‌سالی استفاده می‌شود (Raziei and Pereira 2013). فرآیند تبخیر-تعرق در بسیاری از رشته‌ها از جمله طراحی سامانه‌های آبیاری، برنامه‌ریزی آبیاری، مطالعات هیدرولوژیک و زهکشی از اهمیت بسیاری برخوردار است (Irmak et al. 2017). عوامل بسیار زیادی در تبخیر-تعرق دخالت دارند که برآورد میزان تبخیر-تعرق را در فرآیندی بسیار پیچیده قرار می‌دهد. شدت و مدت تابش خورشید، درجه حرارت، سرعت باد، میزان رطوبت نسبی هوا، بافت خاک نوع گیاه و مقدار رطوبت خاک از جمله عوامل مؤثر بر تبخیر-تعرق هستند و با توجه به این موضوع، محاسبه مقدار دقیق تبخیر-تعرق، کاری بسیار مشکل است (Chang et al. 2018). اندازه‌گیری تبخیر-تعرق به دو صورت مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌گیرد روش‌های تجربی جزئی از روش‌های غیرمستقیم محسوب می‌شود (McMahon et al. 2016). تبخیر-تعرق در دو مفهوم تبخیر-تعرق مرجع (ET_0)^۱ و تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_P)^۲ قرار می‌گیرد، که این دو مفهوم بسیار نزدیک و مرتبط به هم می‌باشد. اگرچه ET_0 و ET_P هر دو نحوه برآورد تبخیر از سطح را بیان می‌کنند، اما این دو دارای مفاهیم و معادلات مختلفی هستند (Yates and Strzepek 1994). میزان تبخیر-تعرق بستگی به درصد رطوبت خاک نیز دارد و در صورتی که آب به‌اندازه کافی در اختیار باشد تبخیر-تعرق نیز با حداکثر توان خود صورت می‌گیرد که به مفهوم تبخیر-تعرق پتانسیل است (Song et al. 2019). همچنین تبخیر-تعرق مرجع به مفهوم سرعت تبخیر-تعرق از یک سطح مشخص پوشیده از چمن با ارتفاع یکنواخت بیان می‌شود (Doorenbos and Pruitt 1977). تقاضای تبخیر به آب‌وهوا و نوع سطح تبخیر، نیز بستگی دارد. بنابراین ET_0 به‌عنوان یک مفهومی دیگر به بررسی مطالعات نیاز آبی گیاه پرداخته است. (Katerji and Rana 2011) یک روش قابل قبول برای تخمین تبخیر-تعرق، اندازه‌گیری تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) است (Gocic et al. 2014). اصطلاح ET_0 به‌طور گسترده‌ای

²Potential evapotranspiration¹Reference evapotranspiration

یک منطقه خاص با دیدگاه خاص توسعه یافته‌اند، و بنابراین، اغلب آن‌ها در تخمین ET_0 در مناطق دیگر آب‌وهوایی، بسیار ناکارآمد هستند (Muhammad et al. 2019). به همین دلیل با توجه به اینکه هر معادله در منطقه‌ای خاص و با توجه به شرایط آب‌وهوایی محل استخراج تهیه شده است، واسنجی روابط در مناطق مختلف دارای اهمیت می‌باشد (Vanzyl et al. 1989).

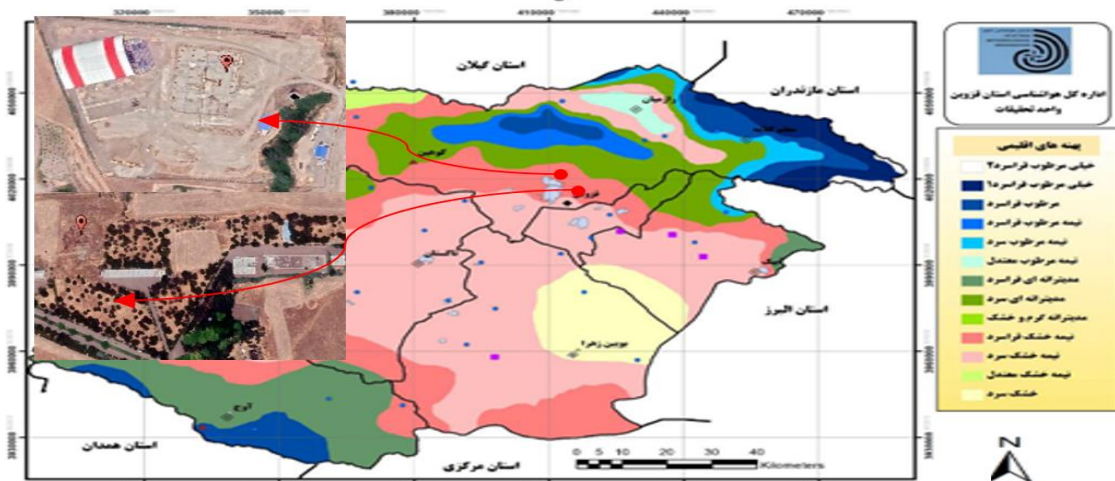
هدف از این پژوهش ارائه مفاهیمی جهت بررسی تمایز میان ET_0 و ET_p و همچنین برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از معادلاتی مبتنی بر روش دمایی، تابشی، رطوبتی و ترکیبی، در دو حالت ET_0 و ET_p جهت تعیین بهترین مدل براساس شرایط آب‌وهوایی، و مقایسه آن با داده‌های لایسیمتر در استان قزوین بود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، واقع در استان قزوین می‌باشد که در حوزه مرکزی قرار گرفته است. میانگین بارش سالانه ۳۱۰ mm و میانگین دمای سالیانه $14^{\circ}C$ می‌باشد. طبق بررسی‌های انجام شده و با استفاده از نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیمی دومارتن، پهنه مورد مطالعه استان در اقلیم نیمه‌خشک و سرد قرار دارد (شکل ۱).

کاربرد ET_p فقط در هواشناسی و هیدرولوژی متداول بود و اما بعدها در سایر زمینه‌ها هم گسترش پیدا کرد (Parajuli et al. 2019). در پژوهشی رابطه بین ET_0 و ET_p مورد بحث قرار گرفته و در آن‌ها اشاره شده است که ET_0 و ET_p برابر نیستند (Katerji and Rana 2011). ET_p با هدف برآورد تبخیر-تعرق با توجه به شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه است زیرا تقاضای تبخیر نه تنها با آب‌وهوا، بلکه به نوع سطح تبخیر، نیز بستگی دارد. بنابراین ET_0 به عنوان یک مفهوم جایگزین پیشنهاد می‌شود که فقط در مطالعات نیاز آبی گیاه استفاده می‌شود (Katerji and Rana 2011). در پژوهشی به مقایسه تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل پرداخته شده و به بیانی تعریف ET_0 را واضح‌تر و خاص‌تر از ET_p می‌داند (Tasumi 2019). همین‌طور در پژوهشی دیگر معادله مختلف ET_0 و ET_p را اعمال کرده و آن‌ها را با داده‌های اندازه‌گیری لایسیمتر در ایران، در شرایط آب‌وهوایی نیمه‌خشک مقایسه کردند، نتایج نشان داد که معادله FAO 24 Blaney-Criddle جزو یکی از ۶ معادله برتر محاسبه تبخیر-تعرق در منطقه است (Bakhtiari et al. 2011). همچنین (López-Urrea et al. 2006) هفت معادله از گروه‌های تبخیر تعرق مرجع و پتانسیل را در کشور اسپانیا با داده‌های لایسیمتر مورد مقایسه قرار دادند و نتایج حاصل از پژوهش نشان از عدم مطلوبیت معادله FAO 24 Blaney-Criddle در منطقه مورد مطالعه را داشت. بسیاری از روش‌های تخمین ET برای



شکل ۱- نقشه پهنه‌بندی اقلیمی دومارتن و محدوده مورد مطالعه

Figure 1 Climate zoning map of De martonne and the study area

می‌باشد. در این پژوهش به منظور محاسبه تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل بر مبنای روش‌های تجربی از اطلاعات هواشناسی

روش‌های متفاوتی جهت محاسبه ET_0 و ET_p وجود دارد که برای محاسبه هریک از آن‌ها به داده‌های مشخصی نیاز

$$E = C \times U \times (e_s - e_a) \quad (1)$$

جدول ۱- معادلات تبخیر-تعرق پتانسیل مبتنی بر انتقال جرم
Table 2 Potential evapotranspiration equations based on mass transfer

Proposed by	Equation
Albrecht (1950)	$ET_p = (0.1005 + 0.297u)(e_s - e_a)$
Harbeck et al. (1954)	$ET_p = 0.057u(e_s - e_a)$
Kuzmin (1957)	$ET_p = 6(1 + 0.21u)(e_s - e_a)$
Brockamp and Wenner (1963)	$ET_p = 0.543 u^{0.456}(e_s - e_a)$
Mahringer (1970)	$ET_p = 2.86 u^{0.5}(e_s - e_a)$

۲-۲-۲- معادلات مبتنی بر روش دما

معادلات تبخیر-تعرق مبتنی بر دما به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد (Jensen et al. 1990) و دمای هوا به عنوان پارامتر اصلی در برآورد تبخیر-تعرق محسوب می‌شود و جزء یکی از پرکاربردترین روش‌ها در محاسبات تبخیر-تعرق است. معادلات ET_0 مبتنی بر روش دمایی اساساً از نظر ساختار مشابه ET_p هستند اکثر معادلات ET_0 ، مانند ET_p ، شامل ضرایب متعددی هستند (جدول ۲) در واقع، تشخیص معادلات ET_0 مبتنی بر دما از ET_p تا حدودی دشوار است. این مورد در انواع حالت‌های دیگر معادلات ET_0 نیز صدق می‌کند.

۲-۲-۳- معادلات مبتنی بر روش تابش

معادلات مبتنی بر تابش، رابطه تجربی بین تابش و تبخیر-تعرق را نشان می‌دهد. این گروه از معادلات بر مبنای بیلان انرژی بوده و در بسیاری از آن‌ها سرعت باد و رطوبت نسبی نقشی ندارد. معادلات مبتنی بر تابش را می‌توان به عنوان اشکال ساده معادله (Penman (1948) در نظر گرفت، که برآورد قابل اعتمادتری، برای دوره‌های کوتاه مدت ایجاد می‌کند (Jensen et al. 1990) مشابه معادلات ET_0 مبتنی بر دما، معادلات ET_0 مبتنی بر تابش نیز وجود دارد که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این معادلات در جدول (۳) اشاره شده است.

شامل: دما، سرعت باد، رطوبت نسبی، فشار هوا و ساعات آفتابی از ایستگاه هواشناسی استان قزوین در طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۸۲ به صورت ماهانه بهره گرفته شد. لایسیمتر یکی از معتبرترین روش‌های اندازه‌گیری مستقیم تبخیر-تعرق می‌باشد. داده‌های مرتبط با تبخیر-تعرق توسط لایسیمتر زهکش‌دار در منطقه واقع در ایستگاه تحقیقاتی آب و خاک اسماعیل‌آباد قزوین با ابعاد 1×2 و به عمق $1/5m$ مساحتی برابر با $2 m^2$ را می‌پوشاند. پس از انتخاب محل نصب و ساخت لایسیمتر، ابتدا خاک برداری محل نصب انجام گردید. خاک حفاری لایه به لایه با توجه به لایه‌بندی خاک به صورت جداگانه در اطراف محل احداث ریخته شد تا بعد از جایگذاری و نصب لایسیمتر، خاک حفاری شد به ترتیبی که خاک برداری شده بود، در داخل لایسیمتر ریخته شود. نظر به اینکه بدنه لایسیمتر در تماس مداوم با آب قرار می‌گیرد جهت جلوگیری از پوسیدگی دیواره‌های داخل و خارج بدنه، هر دو طرف قیرگونی شد و به منظور جلوگیری از خروج احتمالی ذرات خاک از طریق لوله زهکش از سیستم فیلتربندی (لایه شن و ماسه دانه‌بندی شده) استفاده گردید. برداشت شده است. لایسیمتر در وسط قطعه زمینی به ابعاد 50×50 ($2500 m^2$) نصب گردید. به طوری که پوشش گیاهی در جهت شمال به جنوب و غرب به شرق حدود $50 m$ می‌باشد.

۲-۲-۲- مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع

برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل و تبخیر-تعرق مرجع از انواع مدل‌ها، اعم از انتقال جرم، دمایی، تشعشعی، ترکیبی و رطوبتی استفاده شد. با توجه به اینکه معادلات مختلف دارای مقیاس‌های زمانی متفاوت روزانه و ماهانه هستند برای مقایسه محاسبات با لایسیمتر تبدیل واحدهای هر یک از معادلات نیز در محاسبات مدنظر قرار گرفته شد.

۲-۲-۱- معادلات مبتنی بر روش انتقال جرم

این نوع معادلات از دالتون نشات گرفته و فرم کلی این معادلات به صورت رابطه (۱) می‌باشد و در جدول (۱) کلیه معادلات برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل براساس انتقال جرم آمده است.

جدول ۲- معادلات تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع مبتنی بر دما
Table 2 The temperature-based equations for estimating ET_o and ET_p

Proposed by	Equation*	Proposed by	Equation
Hargreaves and Samani (1985)	$ET_0 = C \times R_a \times (T + a) \times (T_x - T_n)^m$	Thornthwaite (1948)	$ET_p = 16N_m[(10T_m)^{a1}]$
Mc Cloud (1995)	$ET_0 = 0.254 \times 1.07^{1.8T}$	Blaney and Criddle (1950)	$ET_p = a_2 + b(0.46T_a + 8.13)(1 + 0.0001Z)$
Ahooghalandari et al. (2016)	$ET_0 = 0.369R_a + 0.139T_{max} (1 - RH/100) - 1.95$	McCloud (1955)	$ET_p = 0.254 \times 1.07^{1.8T_a}$
Doorenbos and Pruitt (1977)	$ET_0 = p(0.46T_a + 8)$	Hamon (1960)	$ET_p = 0.55N^2P_t$
Samani and Pessarakli (1986)	$ET_0 = 0.013K_T R_a (1.8T_a + 32 - T_x) T_d^{0.5}$	Romanenko (1961)	$ET_p = 0.0018(25 + T_a)^2(100 - RH)$
Hargreaves and Samani (1982)	$ET_0 = 0.0145K_{RS} R_a (T_a + 17.8T_d)^{0.5}$	Baier and Robertson (1965)	$ET_p = 0.157T_{max} + 0.158T_d + 0.109R_a - 5.39$
Hamon (1960)	$ET_0 = 0.55(N/12)^2 (\rho \cdot v^*) / 100 \times 25.4''$	Schendel (1967)	$ET_p = (16T_a) / RH$
Hargreaves et al. (1985)	$ET_0 = 0.0022R_a (T_a + 17.8) T_d^{0.5}$	Szász (1973)	$ET_p = 0.00536(T_a + 21)^2(1 + RH)^{2/3}(0.519u_2 + 0.905)$
Hargreaves and Samani (1985)	$ET_0 = 0.0023R_a (T_a + 17.8) T_d^{0.5}$	Hargreaves (1975)	$ET_p = 0.0135R_s (T_a + 17.8)$
Droogers and Allen (2002)	$ET_0 = 0.0005304R_a (T_a + 17)(T_d - 0.0123P)^{0.76}$		
Trajkovic (2007)	$ET_0 = 0.0023R_a (T_a + 17.8) T_d^{0.424}$		

* با توجه به متعدد بودن پارامترها، جزئیات معادلات در منابع ارجاع شده موجود می باشد.

جدول ۳- معادلات تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل و مبتنی بر تابش
Table 3 radiation-based equations for estimating ET_o and ET_p

Equation	Proposed by	Equation*	Proposed by
$ET_p = 0.61[\Delta / (\Delta + \gamma)] R_s - 0.12$	Makkink (1957)	$ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_n$	Ritchie (1972)
$ET_p = 0.013[T_a / (T_a + 15)](R_s + 50)$	Turc (1961)	$ET_0 \approx 0.0393(T_a + 9.5)^{0.5} R_s - [0.19R_s]^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.0061(T_a + 20)(1.12T_a - T_{min} - 2)^{0.7}$	Valiantzas (2013b)
$ET_p = (0.014T_a - 0.37)R_s$	Jensen and Haise (1963)	$ET_0 = C_1(WR_s)$	Doorenbos and Pruitt (1977)
$ET_p = (0.0082T_a - 0.19)R_s / 1500$	Stephens and Stewart (1963)	$ET_0 = 0.7 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_s$	Hansen (1984)
$ET_p = (0.0158T_a - 0.09)R_s$	Stephens (1965)	$ET_0 = 0.77 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_s + 0.2$	Xu and Singh (2000)
$ET_p = 0.385R_s$	Christiansen (1968)	$ET_0 = 0.7 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] R_s - 0.12$	Castaneda and Rao (2005)
$ET_p = \alpha 0[\Delta / (\Delta + \gamma)](R_n - G)$	Priestley and Taylor (1972)	$ET_0 = 0.63 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_s - 2G)$	De Bruin (1981)
$ET_p = (6.1/10^6)(1.8T_a + 1)R_s$	Caprio (1974)	$ET_0 = 1.18 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n - G)$	Abtew (1996)
$ET_p = (R_a T_a) / (5\rho W)$	Oudin et al. (2005)	$ET_0 = 0.98 \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right] (R_n + 0.94)$	Xu and Singh (2000)

* با توجه به متعدد بودن پارامترها، جزئیات معادلات در منابع ارجاع شده موجود می باشد.



ترکیبی، هنگامی که داده‌های زمین‌شناسی و هواشناسی موردنیاز موجود باشد، نوع ترکیبی معادلات ET_0 به‌طور گسترده در مناطق مختلف اعمال می‌شود. از این تعداد معادله FAO 56 PM دقیق‌ترین روش برای برآورد ET_0 در مقیاس زمانی روزانه یا ماهانه است و به‌عنوان روش استاندارد توسط FAO توصیه‌شده که در جدول (۴) ارائه شده است.

۲-۲-۴- معادلات مبتنی بر روش ترکیبی

نوع ترکیبی معادلات تبخیر و تعرق، از به هم پیوستن روش‌های آیرودینامیک و توازن انرژی ایجاد شده است. قسمت آیرودینامیکی مربوط به تئوری انتقال جرم Dalton (1802) است، که سرعت و فشار بخار دو اصطلاح اصلی آن هستند. Dalton (1802) اولین معادله مبتنی بر روش ترکیبی، توسط پنمن ارائه شد مشابه معادلات ET_p از نوع

جدول ۴- معادلات تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع مبتنی بر روش ترکیبی

Table 4 Combination-based equations for estimating ET_0 and ET_p

Equation	Proposed by	Equation*	Proposed by
$ET_p = \frac{\Delta H + \gamma(\dot{e}_a - \dot{e}_d)f(u)}{\Delta + \gamma}$	Dalton (1802)	$ET_0 = [\Delta/(\Delta + \gamma)(R_n - G) + 2.7 \gamma/(\gamma + \Delta)(1 + 0.864u_2)(e_s - e_a)]$	Penman_FAO 24
$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + \frac{6.43 \gamma}{\Delta + \gamma}(1 + 0.0536U_z)(e_{zs} - e_{za})$	Penman (1948)	$\lambda \times ET_0 = \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + 6.43 \frac{\gamma}{\gamma + \Delta}(a_w + b_w u_2)(e_s - e_a) \right] - G$	Penman_FAO-PPP17
$ET_p = \frac{\Delta(R_n - G) + [p_{CP}(e_s - e_a)]/r_a}{\Delta + \gamma(1 + \frac{r_s}{r_a})}$	Penman (1948)	$ET_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + 6.43 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} W_f(e_{zs} - e_{za})$	Wright (1982)
$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + (\gamma 0.622 \rho k^2 UZ(e_s - e_a))/(\Delta + \gamma P_{re} [\ln((Z1 - d)/z0)^2])$	Penman (1963)	$ET_0 = (0.408 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma 900/(T_{mean} + 273) \times u_2 (e_s - e_a))/(\Delta + \gamma(1 + 0.34 \times u_2))$	Penman_Monteith_FAO (FAO 56)
$ET_p = \frac{\Delta R_n + \gamma r u_2^{0.75}(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma}$	Penman (1963)	$ET_0 \approx 0.051(1 - \alpha)(T_a + 9.5)^{0.5} R_s - 2.4(R_s/R_a)^2 + 0.00012Z + 0.048(T_a + 20)(1 - RH/100)(0.5 + 0.536u_2)$	Valiantzas (2006)
$ET_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma}(R_n - G) + 15.36 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} W_f^*(e_{zs} - e_{za})$	Penman (1963)	$ET_0 \approx 0.0393 R_s (T_a + 9.5)^{0.5} - 0.024(T_a + 20)(1 - RH/100) - 2.4(R_s/R_a)^2 + 0.066 W_{aero}(T_a + 20)(1 - RH/100) u_2^{0.6}$	Valiantzas (2012)
$ET_p = (\Delta(R_n - G) + 1.2 \gamma(1 + 0.54U_2)(e_s - e_a))/(\Delta + \gamma(1 + r_s/r_a))$	Penman-Monteith (1965)	$ET_0 \approx 0.0393 R_s (T_a + 9.5)^{0.5} - 0.19 R_s^{0.6} \phi^{0.15} + 0.048(T_a + 20)(1 - RH/100) u_2^{0.7}$	Valiantzas (2013a)
$ET_p = ([700(T_a + 0.006 Z)/(100 - \phi) + 15(T_a - T_{dew})]/(80 - T_a))$	Penman (1948)	$ET_0 = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma u_2 (e_s - e_a) [\frac{900}{T_2 + 273}]}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$	Allen et al. (1998) (FAO56 PM)

* با توجه به متعدد بودن پارامترها، جزئیات معادلات در منابع ارجاع شده موجود می‌باشد.

هستند، و کمبود فشار بخار آب، سرعت باد و دما سه پارامتر اصلی این روش محسوب می‌شود که در جدول (۵) به ۱۰ مورد از این‌گونه معادلات اشاره شده است

۲-۲-۵- معادلات مبتنی بر روش رطوبتی

معادلات مبتنی بر روش رطوبتی همانند معادلات مبتنی بر انتقال جرم، بیش‌تر برای مناطقی با آب‌وهوای مرطوب مناسب



جدول ۵- معادلات تخمین تبخیر تعرق مرجع مبتنی بر رطوبتی
Table 5 Humidity-based equations for estimating ET_o and ET_p

Proposed by	Equation
$ET_0 = 0.44(1 + 0.27u_2)(e_s - e_a)$	Dalton (1802)
$ET_0 = 0.408 \times 0.3075 \times \sqrt{u_2} \times (e_s - e_a)$	Trabert (1896)
$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \frac{C_p \times \rho_a \times VPD}{r_a}}{\Delta + \gamma}$	Penman (1948)
$ET_0 = (0.1005 + 0.297u_2)(e_s - e_a)$	Albrecht (1950)
$ET_0 = 0.0018(100 - RH)(T + 25)^2$	Romanenko (1961)
$ET_0 = 16 \frac{T}{RH}$	Schendel (1967)
$ET_0 = 0.35 \times (1 + 0.24u_2)(e_s - e_a)$	Penman (1963)
$ET_0 = 0.15072 \times \sqrt{3.6u_2}(e_s - e_a)$	Mahringer (1970)
$ET_0 = \Delta/(\Delta + \gamma) (R_n - G) + \gamma/(\Delta + \gamma) 6.43(1 + 0.536u_2)VPD$	Shuttleworth (1993)
$ET_0 = 4.5 \left[1 + \left(\frac{T}{25} \right)^2 \right] \left(1 - \frac{e_s}{e_a} \right)$	Oudin_Romanenko (2005)

حاصل از هر یک معادلات پرداخته شد که نتایج در جدول‌های (۶) و (۷) نیز ارائه شده است.

به منظور تعیین میزان تبخیر-تعرق در لایسیمتر مورد بررسی، میانگین تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه چمن برابر با ۱۲۵۰/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. در جدول (۶) نتایج مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل پیش‌بینی شده با معادلات تجربی مختلف ارائه شده است. طبق پژوهش‌های صورت گرفته جهت تخمین تبخیر-تعرق پتانسیل، محاسبات در چهار گروه دمایی، تابشی، ترکیبی و انتقال جرم انجام شد. بر اساس جدول (۶) به وضوح مشاهده می‌شود که روش McCloud (1955) از گروه دمایی با توجه به شاخص‌های آماری با مقدار $RMSE=1/1$ و $0/85$ $MBE=$ نسبت به دیگر مدل‌های تجربی عملکرد بهتری در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل داشته است. مقدار خطای استاندارد (SE) در این روش کم‌تر از یک بوده که برتری این روش را در گروه تبخیر-تعرق پتانسیل در منطقه مورد مطالعه تأیید می‌کند. از بین سه گروه دیگر معادلات روش Dalton (1802) از گروه تابشی با مقدار $RMSE=2/07$ و $MBE=1/5$ Mahringer (1970) و از گروه انتقال جرم روش Penman (1948) با مقدار $RMSE=2/36$ و $MBE=1/72$ و روش Penman (1948) از گروه ترکیبی با مقدار $RMSE=1/99$ و $MBE=1/18$ عملکرد نسبتاً بهتری را در منطقه نسبت به سایر روش‌های اندازه‌گیری شده در هر گروه داشتند.

۲-۳- پارامترهای ارزیابی مدل‌ها

کارایی مدل‌های برآورد تبخیر-تعرق در مقایسه با نتایج لایسیمتری در این پژوهش با استفاده از شاخص‌های آماری همچون R: ضریب تعیین (mm/day)، RMSE: جذر میانگین مربعات خطا (mm/day)، MBE: میانگین خطای اریب (mm/day) و SE: خطای استاندارد (mm/day) استفاده شده است.

۳- یافته‌ها و بحث

با توجه به اینکه در لایسیمترها، تغییرات رطوبتی، از اجزاء بیلان آبی محسوب می‌شود. در این پژوهش تغییرات رطوبت با استفاده از تشت تبخیر اندازه‌گیری و به صورت مداوم تحت پایش قرار می‌گرفت، نسبت تبخیر-تعرق مرجع به تبخیر حاصل از تشت در طول چهار سال در بازه زمانی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۸۲ به طور میانگین برابر با ۰/۶۶ شد که تقریباً معادل ۲۳٪ تبخیر-تعرق گیاه بوده که از این مقدار ۹۰ درصد آن در فصل غیرفعال رویشی رخ داده و در طول دوره رویش حدود ۱۰٪ آب مورد استفاده از طریق بارش تأمین می‌شود. نتایج حاصل از تمامی معادلات تجربی تبخیر-تعرق پتانسیل (ET_p) و مرجع (ET_o) با مقادیر به دست آمده از لایسیمتر مقایسه شد و در قالب شاخص‌های آماری و به صورت جامع به بررسی نتایج



جدول ۶- ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف تجربی تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از داده‌های لایسیمتری توسط شاخص‌های آماری
 Table 6 Evaluation of performance of different experimental methods of potential evapotranspiration using lysimetric data by statistical indicators

Method	RMSE	R	MBE	SE	Method	RMSE	R	MBE	SE	
	(mm/day)	(mm/day)	(mm/day)	(mm/day)		(mm/day)	(mm/day)	(mm/day)	(mm/day)	
Mass Transfer based	Albrecht (1950)	3.52	0.72	2.78	3.82	Makkink (1957)	3.73	0.32	2.72	7.26
	Harbeck et al. (1954)	4.09	0.77	3.25	3.23	Turc (1961)	3.93	0.91	3.05	1.45
	Kuzmin (1957)	2.49	0.73	-1.08	3.76	Jensen Haise (1963)	2.21	0.92	0.57	1.13
	Brockamp Wenner (1963)	3.86	0.73	3.02	3.76	Stephens and Stewart (1963)	3.20	0.93	-1.88	1.03
	Mahringer (1970)	2.36	0.77	1.72	3.32	Stephens (1965)	3.28	0.98	2.60	0.33
	Thorntwaite (1948)	2.79	0.96	2.24	0.64	Christiansen (1968)	2.92	0.74	1.62	3.64
	Blaney and Criddle (1950)	1.74	0.74	0.205	3.59	Priestley Taylor (1972)	4.12	0.35	-3.13	7.06
Temperature based	McCloud (1955)	1.1	0.96	0.85	0.58	Caprio (1974)	3.33	0.98	2.57	0.35
	Hamon (1960)	3.16	0.85	-3.05	2.13	Oudin et al. (2005)	2.08	0.97	1.49	0.35
	Romanenko (1961)	2.02	0.96	1.82	0.61	Dalton (1802)	2.07	0.98	1.5	0.36
	Baier and Robertson (1965)	1.28	0.91	0.41	1.34	Penman (1948)	1.99	0.78	1.18	3.06
	Schendel (1967)	2.39	0.96	-1.95	0.51	Penman (1948)	2.62	0.15	0.03	7.88
	Szász (1973)	2.72	0.23	-0.98	7.63	Penman (1963)	5.90	0.25	-5.23	7.54
	Hargreaves (1975)	2.32	0.97	1.33	0.39	Penman (1963)	3.62	0.64	-2.84	4.76
						Penman (1963)	9.03	0.79	-6.72	3.08
						Penman Mon teith (1965)	3.76	0.78	2.90	3.12
						Penman (1948)	1.99	0.82	1.18	2.67

مقادیر منفی نشان از برآورد کم این روش به داده‌های لایسیمتری است. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه جزء منطقه نیمه‌خشک کشور محسوب می‌شود استفاده از معادلاتی که مرتبط با انتقال جرم و رطوبت بوده سبب عدم ایجاد نتیجه مطلوب از این گروه از معادلات شد. دلیل آن می‌تواند این باشد که این گروه از معادلات بیش‌تر در مناطقی با آب‌وهوای مرطوب عملکرد مناسبی را از خود نشان می‌دهند.

روش‌های (Priestley and Taylor (1972)، Harbeck et al. (1954) و Penman (1963) به ترتیب از گروه‌های تابشی، انتقال جرم و ترکیبی دارای بیش‌ترین مقدار RMSE بود؛ مقدار هر یک برابر با ۴/۱۲، ۴/۰۹ و ۹/۰۳ است که نشان‌دهنده عدم مطلوبیت این معادلات در منطقه مورد مطالعه است. همچنین طبق محاسبات انجام‌شده مقدار MBE در این روش‌ها برابر با ۳/۰۵، ۳/۳۱، ۳/۲۵ و ۶/۷۲ که



جدول ۷- ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف تجربی تبخیر-تعرق مرجع با استفاده از داده‌های لایسیمتری توسط شاخص‌های آماری
 Table 7 Evaluating the performance of various experimental methods of reference evapotranspiration using lysimetric data by statistical indicators

Estimation	Method	RMSE	R	MBE	SE	Method	RMSE	R	MBE	SE
Temperature-based	Hargreaves and Samani (1985)	1.02	0.97	0.45	0.32	Ritchie (1972)	2.81	0.05	-0.48	8.04
	Mc Cloud (1995)	1.17	0.88	0.87	0.65	Valiantzas (2013b)	3.14	0.96	2.41	0.48
	Hamon (1960)	3.72	0.89	2.35	1.72	Doorenbos and Pruitt (1977)	4.23	0.90	3.35	1.48
	Ahooghalandari et al. (2016)	1.73	0.94	1.08	0.8	Hansen (1984)	2.04	0.90	-0.28	1.48
	Doorenbos and Pruitt (1977)	2.95	0.95	2.1	0.66	Xu and Singh (2000)	2.14	0.90	-0.84	1.48
	Samani and Pessarakli (1986)	5.41	0.93	-2.47	1.1	Castaneda and Rao (2005)	2.03	0.90	-0.16	1.48
	Hargreaves and Samani (1982)	2.14	0.98	1.43	1.74	De Bruin (1981)	1.99	0.71	0.10	3.88
	Hargreaves et al. (1985)	2.47	0.98	1.62	0.34	Abtew (1996)	3.20	0.39	-0.61	7.83
	Hargreaves and Samani (1985)	2.4	0.98	1.56	0.35	Xu and Singh (2000)	2.93	0.30	-1.54	7.34
	Droogers and Allen (2002)	3.35	0.97	2.53	0.37	Dalton (1802)	3.85	0.70	3	4.12
Combination-based	Trajkovic (2007)	2.74	0.98	1.89	0.34	Trabert (1896)	4.15	0.72	3.28	3.91
	Wright (1982)	2.27	0.60	-0.84	5.17	Penman (1948)	1.72	0.24	2.17	7.60
	Valiantzas (2006)	2.66	0.74	3.16	4.12	Albrecht (1950)	3.48	0.68	2.64	4.28
	Valiantzas (2012)	2.88	0.07	-1.03	8.01	Romanenko (1961)	2.02	0.96	-1.28	0.61
	Valiantzas (2013a)	2.52	0.28	-0.38	7.39	Schendel (1967)	1.39	0.96	-1.95	0.5
	Allen et al. (1998) (FAO56 PM)	3.47	0.63	2.61	4.81	Penman (1963)	3.95	0.70	3.1	4.11
	Penman_Monteith (FAO 56)	1.47	0.93	2.61	4.81	Mahringer (1970)	4.03	0.72	3.17	3.91
	Penman_FAO24	2.10	0.78	-5.17	3.17	Shuttleworth (1993)	3.4	0.75	4.26	3.53
	Penman_FAO-PPP17	2.95	0.78	3.08	3.17	Oudin_Romanenko (2005)	2.61	0.14	-0.04	7.88

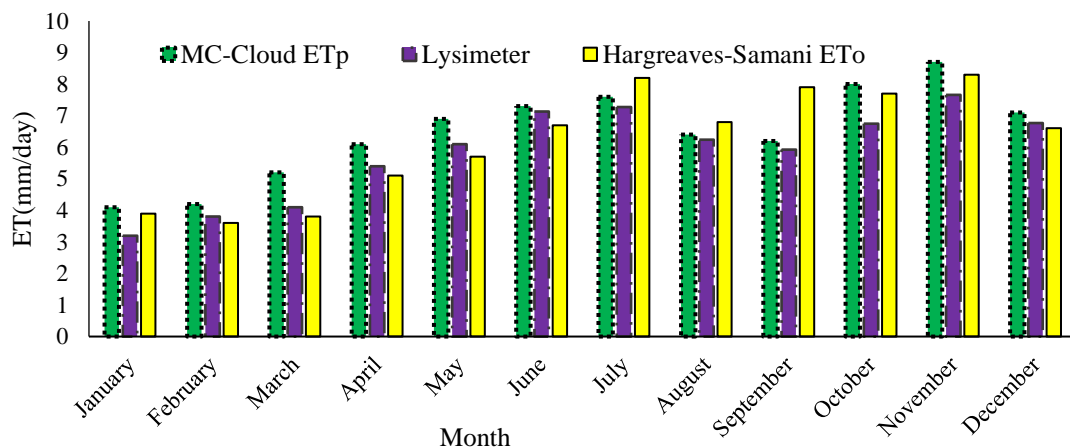
محاسباتی را شامل شده، در بعضی از مواقع به علت عدم وجود داده‌های هواشناسی موردنیاز، و ایجاد خطای بسیار بالا سبب ایجاد نتیجه نامطلوب در این دسته از معادلات شده است. معادله McCloud (1955) با اندازه‌گیری مستقیم پارامتر دمایی محاسبه می‌شود و از نتایج قابل قبولی برخوردار بوده و

(Djaman et al. 2016) در پژوهش خود مناطقی که نزدیک به دریا و دلتاها بودند، استفاده از معادلات مبتنی بر انتقال جرم به دلیل وابستگی این‌گونه معادلات به کمبود فشار بخار، نتایج بهتری را تولید نمود. علل دیگر عدم مطلوبیت دیگر معادلات به خصوص معادلاتی که پارامترهای مختلف



۴ گروه دمایی تابشی رطوبتی و ترکیبی انجام شد نتایج حاصل از آن‌ها نشان داد که از روش‌های محاسبه‌شده از گروه دمایی روش (Hargreaves and Samani (1985) با مقدار $1/0.2$ $RMSE=0/45$ و $MBE=0/45$ بهترین عملکرد را داشته است. دقت روش هارگیوز به شدت به میزان ساعات آفتابی و ابرناکی وابسته است (Farzanpour et al. 2018) به طوری که طبق محاسبات صورت گرفته در روزهایی با درجه ابرناکی بالاتر، نتایج ضعیف‌تری به دست آمده است. استفاده از این روش در مناطقی که در این دو عامل محدود هستند، سبب ایجاد خطای محاسباتی شده لذا با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک و همچنین تعداد روزهای ابرناکی استان به نسبت خیلی زیادی پایین بوده استفاده از این روش در منطقه بسیار کارآمد بوده است (Feng et al. 2017). در همین گروه روش Mc Cloud (1995) با مقدار $RMSE=1/17$ و $MBE=0/87$ در جایگاه دوم از این گروه از معادلات قرار دارد. برتری معادلات گروه دمایی به علت تابش برون زمینی به جای تابش خورشیدی بوده که مقدار آن به کمک پارامترهای دمایی برآورد می‌گردد که این موضوع نشان‌دهنده نقش بیش‌تر پارامترهای دمایی در برآورد ET_0 این ناحیه می‌باشد.

روش (Baier and Robertson (1965) در جایگاه دوم از این گروه از معادلات قرار گرفته که با استفاده از پارامترهای تشعشع خورشیدی، حداکثر دما و اختلاف درجه دما نتایج نسبتاً قابل قبولی را ایجاد کرده است. با این حال، معادله Penman (1963) با تخمین پارامترهای مختلف و محاسبه تعدادی پارامتر به صورت غیرمستقیم صورت می‌گیرد. لذا به عبارتی دیگر انتظار می‌رود در صورتی که پارامترهای بیش‌تری به صورت تخمینی (به جای اندازه‌گیری مستقیم) وارد معادله شوند، با توجه به اینکه تعداد پارامترهای ورودی که اندازه‌گیری می‌شوند کم هستند، آزمون کیفی‌سازی روی اندازه‌گیری‌های هواشناسی انجام نمی‌شود و در نتیجه خطا در پارامترهای ورودی بیش‌تر شده و میزان خطای ورودی افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج حاصل از معادلات مختلف تبخیر-تعرق پتانسیل، روش (McCloud (1955) در بین تمامی مدل‌ها روش مطلوب محسوب شده که علت این مطلوبیت، استفاده از اطلاعات هواشناسی دقیق و منطبق با ایستگاه هواشناسی استان می‌توان در نظر گرفت و روش ترکیبی Penman (1963) ضعیف‌ترین نتایج را نسبت به دیگر معادلات گروه‌های مختلف داشته است. مقایسه آماری تبخیر-تعرق مرجع اندازه‌گیری شده با استفاده از معادلات تجربی و روش لایسیمتر در



شکل ۲- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل با نتایج حاصل از لایسیمتر

Figure 2 Comparison of reference evapotranspiration and potential values with Lysimeter results

این اختلاف در مردادماه در کمترین میزان خود قرار دارد. طبق نتایج می‌توان این استنباط را داشت که معادلات حاصل از تبخیر-تعرق پتانسیل در ایام گرم سال نتایج بسیار نزدیک‌تری را به نتایج لایسیمتر داشته است. بر اساس پژوهش صورت گرفته توسط (Nazari and Kaviani (2015) که به منظور بررسی چهار گروه دمایی، رطوبتی، تابشی و ترکیبی در استان

همان‌طور که در شکل (۲) قابل ملاحظه است نتایج نشان می‌دهد که مقدار تبخیر-تعرق مرجع در دی‌ماه لغایت اردیبهشت‌ماه بسیار نزدیک به مقدار به دست آمده از نتایج حاصل از لایسیمتر می‌باشد. به طوری که هر چه به فصل گرم سال حرکت کرده مقادیر حاصل از تبخیر-تعرق پتانسیل به مقادیر حاصل از داده‌های لایسیمتر نزدیک بوده به طوری که

تفاوت تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل می باشد. همچنین از بین معادلات و روش های محاسبه شده، روش دیگری که در هر دو گروه مشترک بوده روش Hamon می باشد که طبق محاسبات صورت گرفته و مقایسه آن ها در هر دو حالت، نتایج حاصل از این مقایسه نشان می دهد که روش Hamon از گروه دمایی در حالت مرجع و پتانسیل با مقدار جذر خطای میانگین مربعات به ترتیب $3/72$ و $3/16$ mm/day، متفاوت بودن این دو حالت را بیان می کند و مقدار خطا در حالت مرجع نسبت به پتانسیل حدود $0/56$ mm/day بیش تر بوده است. در نهایت در نتایج به دست آمده از هر یک از روش ها و مقایسه آن ها به صورت ماهانه با استفاده از داده های لایسیمتری نشان داد که بهترین عملکرد از روش تبخیر-تعرق پتانسیل از گروه دمایی، روش McCloud (1955) بوده است که با مقدار $RMSE=1/1$ و ضریب همبستگی $0/96$ بهترین نتیجه را نسبت به سه گروه دیگر ایجاد کرده است و از گروه تبخیر-تعرق مرجع روش Hargreaves and Samani (1985) از گروه دمایی و با مقدار $RMSE=1/02$ و مقدار ضریب همبستگی $0/97$ بهترین عملکرد را داشته است (شکل ۳).

۴- نتیجه گیری

با توجه به بررسی های صورت گرفته اشتباهات رایجی بین تبخیر-تعرق پتانسیل و مرجع وجود داشته است. در این پژوهش به بررسی جامع این دو مفهوم پرداخته شد تا معانی آن ها به منظور بهبود برآورد ET از یکدیگر متمایز شود.

۱- طبق نتایج به دست آمده در این پژوهش، تبخیر-تعرق مرجع، متفاوت از تبخیر-تعرق پتانسیل در نظر گرفته شد.

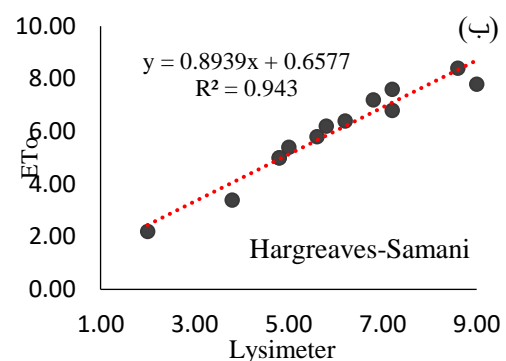
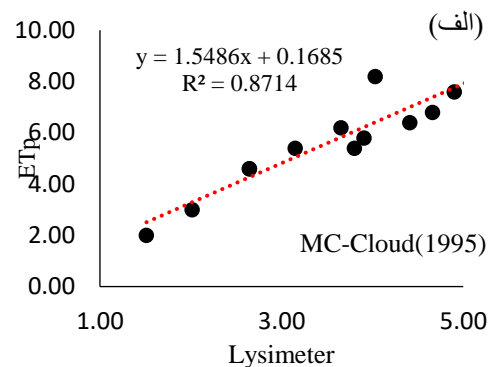
۲- طبق بررسی و محاسبات صورت گرفته در هر دو گروه، روش دمایی به عنوان روش برتر منطقه مورد مطالعه شناخته شد و با توجه به اقلیم خشک و نیمه خشک استان، از معادلات مبتنی بر انتقال جرم نتایج قابل قبولی حاصل نشد.

۳- روش برتر تبخیر-تعرق مرجع در خرداد ماه لغایت شهریور ماه که دمای بالاتری دارد، از همبستگی بیش تری برخوردار خواهد بود و روش برتر تبخیر-تعرق پتانسیل در ماه هایی از سال با میانگین دمای کم تر، نتایج بهتری را ایجاد خواهد کرد.

دسترسی به داده ها

داده های استفاده شده (یا تولید شده) در این پژوهش در متن مقاله ارائه شده است.

قزوین انجام شد، نتایج نشان داد که روش Hargreaves and Samani (1985) از گروه دمایی بهترین عملکرد را داشته است.



شکل ۳- مقایسه داده های تبخیر-تعرق لایسیمتر با دقیق ترین روش برآورد تبخیر-تعرق: (الف) پتانسیل و (ب) مرجع (mm/day) به صورت ماهانه

Fig. 3 Comparison of lysimeter evapotranspiration data with the most accurate method of estimating potential (a) and reference (b) transpiration evaporation (mm/day) on a monthly basis

در پژوهشی دیگر نیز که توسط Bahman Abadi and Kaviani (2020) جهت برآورد تبخیر-تعرق در اقلیم های مختلف انجام شد، نتایج بدست آمده از آن نشان داد که روش های Hargreaves and Samani (1985) و Monteith - FAO (FAO 56) بهترین عملکرد را برای استان قزوین داشته است. با توجه به متفاوت بودن تبخیر-تعرق مرجع و پتانسیل، در این پژوهش به مقایسه این دو روش نیز پرداخته شد. با بررسی معادلاتی که بهترین نتیجه را در منطقه داشته معادله McCloud از گروه دمایی در هر دو حالت دارای مقادیری نزدیک به یکدیگر بوده و از عملکرد مطلوبی برخوردار است، به طوری که جذر خطای میانگین مربعات در حالت مرجع و پتانسیل به ترتیب $1/17$ و $1/1$ mm/day بوده که این نشان از



References

- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south florid. *Jawra J. Am. Water Resour. Assoc.* 32, 465–473.
- Ahooghalandari, M., Khiadani, M. and Jahromi, M. E. (2016). Developing Equations for Estimating Reference Evapotranspiration in Australia. *Water Resour. Manag.* 30, 3815–3828.
- Allen, R.G., Pereira, L.s., Raes, D. and Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and drainage Paper, No. 56, Rome, Italy.
- Albrecht, F. (1950). Die Methoden zur Bestimmung der Verdunstung der natürlichen Erdoberfläche. *Archiv. Für Meteorologie Geophysik Und Bioklimatologie Serie B* 2, 1–38.
- BahmanAbadi, B. and Kaviani, A. (2020). Estimation of Potential Evapotranspiration in Different Climates of Iran. *Iran. Soil Water Res.*, 51(6), 1479-1499. [In Persian]
- Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A. and Hoogenboom, G. (2011). Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. *J. Agr. Sci. Tech.* 13, 223–237.
- Brockamp, B. and Wenner, H., (1963). Verdunstungsmessungen auf den Steiner See bei Münster. *Dt Gewässerkundl Mitt.*, 7, 149–154.
- Baier, W., Robertson, G.W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Can. J. Plant. Sci.* 45, 276–284.
- Blaney, H. F., Criddle, W. D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. Soil conservation service technical paper 96, Soil conservation service. US Department of Agriculture, Washington.
- Caprio, J. M. (1974). Phenology and seasonality modeling. In: Springer, V. (Ed.), *The solar thermal unit concept in problems related to plant development and potential evapotranspiration*, pp. 353–364 New York.
- Chang, X., Wang, S., Gao, Z., Luo, Y., Chen, H., (2018). Forecast of Daily Reference Evapotranspiration Using a Modified Daily Thornthwaite Equation and Temperature Forecasts. *Irrig. Drain.* 68, 297–317.
- Castaneda, L., Rao, P. (2005). Comparison of methods for estimating reference evapotranspiration in Southern California. *J. Environ. Hydrol.* 13, 1–10.
- Christiansen, J.E. (1968). Pan evaporation and evapotranspiration from climatic data. *J. Irrig. Drain. Eng. Division.* 94, 243–266.
- Djaman, K.; Balde, A.B.; Sow, A.; Muller, B.; Irmak, S.; N'Diaye, M.K.; Manneh, B.; Moukoubi, Y.D.; Futakuchi, K.; Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the senegal river valley. *J. Hydrol. Reg. Stud.*, 3, 139–159.
- Djaman, K., Tabari, H., Balde, A. B., Diop, L., Futakuchi, K., Irmak, S., (2016). Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. *J. Hydrol.*, 8, 82–94.
- Doorenbos, J., Pruitt, W. (1977). *Guidelines for predicting crop water requirements*, Irrig. Drain. Paper No. 24. FAO, Rome, Italy.
- De Bruin, H. (1981). The determination of (reference crop) evapotranspiration from routine weather data. *Evaporation in relation to hydrology. Proceedings of Technical Meeting 38, Committee for Hydrological Research TNO, Evaporation in relation to hydrology. Proc. Inform.*, 25, 25–37.
- Dalton, J. (1802). *Experimental essays on the constitutions of mixed gases; on the force of steam of vapor from waters and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation; and on the expansion of gases by heat.* *Mem. Manch. Lit. Philos. Soc.* 5, 535-602.
- Farzanpour, H. Shiri, J. Sadraddini, A. A. Trajekovic, S. (2018). Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. *Hydrol. Res.*, doi: 10.2166/nh. 2018.174.
- Feng, Y., Jia, Y., Cui, N. Zhao, L. Li, C. and Gong, D. (2017). Calibration of Hargreaves model for reference evapotranspiration



- estimation in Sichuan basin of southwest China. *J. Agri. Water Manage.*, 181, 1–9.
- Gocic, M. and Trajkovic, S. (2014). Analysis of trends in reference evapotranspiration data in a humid climate. *Hydrol. Sci. J.* 59, 165–180.
- Helm, P., Stirling, R. and Glendinning, S. (2016). The Implications of Using Estimated Solar Radiation on the Derivation of Potential Evapotranspiration and Soil Moisture Deficit within an Embankment. *Procedia Eng.* 143, 697–707.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng. Division* 108, 225–230.
- Hargreaves, G. H. and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1, 96–99.
- Harbeck, G., Kohler, M. and Koberg, G. (1954). Water loss investigations: Lake Hefner studies. Technical Report. United States Geological Survey Professional Paper 269.
- Hamon, W. R. (1960). Estimating potential evapotranspiration. *J. Hydraul. Division* 87, 107–120.
- Hargreaves, G. H. (1975). Moisture availability and crop production. *Trans. Asae* 18, 980–984.
- Irmak, S., Haman, D. Z., Irmak, A., Jones, J. W., Campbell, K. L. and Yeager, T. H. (2017). New irrigation-plant production system for water conservation in ornamental nurseries: Quantification and evaluation of irrigation, runoff, plant bio mass, and irrigation efficiencies. *Appl. Eng. Agr. ASAE* 19(6), 651–665.
- Jensen, M. E., Burman, R. D. and Allen, R. G. (1990). *Evapotranspiration and irrigation water requirements*. Agr. Soc. Civil Eng., New York.
- Jensen, M. E. and Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Proceedings of the American society of civil engineers. J. Irrig. Drain. Eng. Division* 89, 15–41.
- Katerji, N. and Rana, G. (2011). Crop reference evapotranspiration: a discussion of the concept, analysis of the process and validation. *Water Resour. Manag.* 25(6), 1581–1600.
- Kuzmin, P. (1957). Hydrophysical investigations of land waters. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Publ.*, 3, 468–478.
- López-Urrea, R., de Santa, O. F. M., Fabeiro, C. and Moratalla, A. (2006). Testing evapotranspiration equations using lysimeter observations in a semiarid climate. *Agri. Water Manage.*, 85, 15–26.
- McMahon, T., Finlayson, B. and Peel, M. (2016). Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *Wiley Interdiscipl. Rev. Water* 3, 788–818.
- Muhammad, M. K. I., Nashwan, M. S., Shahid, S., Ismail, T., Song, Y. H. and Chung, E.-S. (2019). Evaluation of empirical reference evapotranspiration models using compromise programming: a case study of Peninsular Malaysia. *Sustain.*, 11, 4267. doi:10.3390/su11164267.
- Mahringer, W., (1970). Verdunstungsstudien am neusiedler See. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B* 18, 1–20.
- McCloud, D. (1955). Water requirements of field crops in Florida as influenced by climate. *Proc. Soil Sci. Soc. Fla.* 15, 165–172.
- Makkink, G., (1957). Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J. I. Water Eng.* 11, 277–288.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.* 19, 205–234.
- Nazari, R. and Kaviani, A. (2015). Evaluation of potential evapotranspiration and evapotranspiration methods with a lysimeter values in a climate Semi dry (Case Study: Qazvin Plain). *J. Ecohydrol.*, 3(1), 19-30 [In Persian].
- Oudin, L., Michel, C. and Anctil, F. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model: Part 1 — Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? *J. Hydrol.* 303, 275–289.
- Parajuli, K., Jones, S. B., Tarboton, D. G., Flerchinger, G. N., Hipps, L. E., Allen, L. N. and Seyfried, M. S. (2019). Estimating actual evapotranspiration from stony-soils in



- montane ecosystems. *Agr. Forest Meteorol.* 265, 183–194.
- Paredes, P. and Pereira, L. (2019). Computing FAO56 reference grass evapotranspiration PMET₀ from temperature with focus on solar radiation. *Agri. Water Manage.*, 215, 86–102.
- Priestley, C. and Taylor, R. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, 100, 81–92.
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *P. Roy. Soc. Lond.* 193, 120–145.
- Penman, H. L. (1963). Vegetation and Hydrology, *Tech. Commun.* 53, Commonwealth Bureau of Soils. *Soil Sci* 96, 357.
- Raziei, T. and Pereira L. S. (2013). Estimation of ET₀ with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agri. Water Manage.*, 121, 1-18. doi:10.1016/j.agwat.2012.12.019.
- Romanenko, V. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. *Proc. Ukrainian Hydrometeorol. Res.*, 3, 12–25.
- Song, X., Lu, F., Xiao, W., Zhu, K., Zhou, Y. and Xie, Z. (2019). Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman–Monteith method and the potential influences in northeast China. *Meteorol. Appl.* 26, 83–96.
- Stephens, J. C. and Stewart, E. H. (1963). A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. *Publication*, 62, 123–133.
- Stephens, J. C. (1965). Discussion of estimating evaporation from insolation. *J. Hydraul.*, 504, 171–182.
- Schendel, U. (1967). Vegetationswasserverbrauch und wasserbedarf. *Habilitation, Kiel.* 137, 1–11 [In German].
- Szász, G. (1973). A potenciális párolgás meghatározásának új módszere. [New method for calculating potential evapotranspiration]. *Hidrológiai Közöny.* 10, 435–442 [In German].
- Trajkovic, S. (2007). Hargreaves versus Penman-Monteith under Humid Conditions. *J. Irrig. Drain. Eng.* 133 (1), 38–42.
- Trabert, W. (1896). Neue Beobachtungen über verdampfungsge schwindigkeiten. *Meteorol. Z.* 13, 261-263 [In German].
- Tasumi, M. (2019). Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agri. Water Manage.* 226, 105805.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geog. Rev.*, 33(1), 55–94.
- 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.
- Valiantzas, J. D. (2013a). Simple ET₀ forms of Penman's equation without wind and/or humidity data. I: theoretical development. *J. Irrig. Drain. Eng.* 139, 1–8.
- Valiantzas, J. D. (2006). Simplified versions for the Penman evaporation equation using routine weather data. *J. Hydrol.*, 331, 690–702.
- Valiantzas, J. D. (2012). Simplified reference evapotranspiration formula using an empirical impact factor for Penman's aerodynamic term. *J. Hydrol. Eng.*, 18, 108–114.
- Yates, D. and Strzepek, K. (1994). Potential evapotranspiration methods and their impact on the assessment of river basin runoff under climate change, first ed. IIASA, Austria.



Research Paper

Comparison of the Concepts of Potential and Reference Evapotranspiration using Lysimetric Data in Qazvin Province

Mohadese Sadat Fakhar^{1*} and Abbas Kaviani²

¹M.Sc. Alumni, Department. of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

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

*Corresponding Author: Mfakhar@edu.ikiu.ac.ir

Received: March 31, 2021

Revised: May 07, 2021

Accepted: June 09, 2021

Abstract

In order to determine the amount of irrigation water, it is required to calculate the amount of the plant water requirement or evapotranspiration. The equations used to calculate evapotranspiration do not use the same climatic parameters and are not suitable for all climatic conditions due to their experimental nature. Potential evapotranspiration (ET_p) and reference evapotranspiration (ET_o) are different in concepts, equations, and contexts; however, many researchers have considered the use of the two terms to be the same. This study provided a comprehensive review of the ET_p and ET_o equations. In this regard, using meteorological data of synoptic station and lysimetric information of the region, reference and potential evapotranspiration were compared and studied based on four experimental groups during 4 years. The equations were calibrated using statistical indicators to select the most ideal model. The results showed that the evapotranspiration potential and the reference are completely different from each other, so that in the same method of the temperature equations of ET_o and ET_p, the RMSE calculated was 1.17 and 1.1, mm/day, respectively. According to the studies from the ET_o and ET_o, the temperature group equations had the best performance, showing the superiority of this group of equations in areas with arid and semi-arid climate.

Keywords: Evapotranspiration; Radiation Method; Combination Method; Temperature Method

