

**Research Paper**

**مقاله پژوهشی**

**Evaluation of Different Evapotranspiration Methods, Optimizing the Best Model Based on Multivariate Linear Regression in Cold Moderate and Semi-Humid Climates**

ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق، ارائه مدل‌های بهینه براساس رگرسیون خطی چند متغیره در اقلیم‌های نیمه مرطوب معتدل سرد

Ahmadreza Karimipour<sup>1\*</sup> and Golnoosh Banitalebi<sup>2</sup>

1- Instructor, Department of Civil Engineering, Payam Noor University, Shahrekord, Iran.

2- PhD student, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\* Corresponding author, Email: [ahm.karimipour@gmail.com](mailto:ahm.karimipour@gmail.com)

احمدرضا کریمی‌پور<sup>۱\*</sup> و گل‌نوش بنی‌طالبی<sup>۲</sup>

۱- مربی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه پیام نور، شهرکرد، ایران.

۲- دانشجوی دکتری فیزیک و حفاظت خاک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.

\* نویسنده مسئول، ایمیل: [ahm.karimipour@gmail.com](mailto:ahm.karimipour@gmail.com)

Received: 20/07/2019

Revised: 31/12/2019

Accepted: 05/01/2020

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۹

تاریخ اصلاح: ۱۳۹۸/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵

**Abstract**

**چکیده**

ET<sub>0</sub> plays an essential role in water resources management. In this study, nine temperature-based, ten radiation-based and six mass transfer-based methods at three-time scales (monthly, seasonal, and annual) were evaluated versus the FAO56-PM model, and the best and worst methods were selected from each group for the cold moderate and semi-humid climate of Iran. At annual and seasonal time scales (spring, summer and autumn seasons) Hargreaves-M4 and Trajkovic methods (temperature-based methods), Priestley-Taylor and IRMAK 1 equations (radiation-based methods) in winter season and for monthly time scale: Meyer and Rohwer, Hargreaves-M4, Trajkovic, IRMAK 1, and Priestley-Taylor methods were shown to have the best performance in comparison to FAO56 PM. These equations are the best ET<sub>0</sub> estimators in cold moderate, and semi-humid climate. In this study, two equations with the best performance, namely Hargreaves-M4 and Trajkovic were optimized as linear and power functions. The results showed that the power equation had better performance than the linear equation. Finally, two equations were presented based on the linear multivariate regression to simplify ET<sub>0</sub> estimation. The results revealed that those kinds of equations, which used T<sub>max</sub>, T<sub>min</sub> as input parameters have high accuracy in comparison with Hargreaves-M4 and Trajkovic equations.

تبخیر و تعرق نقش مهمی در مدیریت منابع آب ایفا می‌کند. در این مطالعه ۹ روش برپایه درجه حرارت، ۱۰ روش برپایه تشعشع و ۶ روش برپایه انتقال جرم در سه مقیاس زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه) در مقایسه با روش FAO56-PM مورد ارزیابی قرار گرفتند و بهترین روش از هر گروه برای اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد ایران انتخاب شدند. در میان روش‌های برپایه درجه حرارت، دو روش Hargreaves-M4 و Trajkovic در مقیاس‌های زمانی سالانه و فصلی (بهار، تابستان و پاییز)، در بین روش‌های برپایه تشعشع، روش‌های Priestley-Taylor و IRMAK 1 در فصل زمستان و در مقیاس زمانی ماهانه روش‌های Priestley-Taylor، IRMAK 1، Trajkovic، Hargreaves-M4، Meyer، Rohwer، Trajkovic، IRMAK 1 دارای بهترین عملکرد در مقایسه با FAO56-PM بودند. از این روش‌ها می‌توان به‌عنوان بهترین تخمین‌گر ET<sub>0</sub> در نواحی با اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد نام برد. در این مطالعه دو معادله با بهترین عملکرد با نام‌های Hargreaves-M4 و Trajkovic به‌صورت خطی و توانی بهینه و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که معادلات توانی عملکرد بهتری نسبت به معادلات خطی دارند. در نهایت این دو معادله براساس رگرسیون خطی چند متغیره برای سادگی در تخمین ET<sub>0</sub> ارائه شدند. نتایج مربوط به این دو معادله نشان داد که استفاده از پارامتر دما به‌عنوان پارامتر ورودی منجر به دقت بالاتر در برآورد ET<sub>0</sub> در مقایسه با روش‌های Hargreaves-M4 و Trajkovic می‌شود.

**Keywords:** ET<sub>0</sub>, FAO56-PM, Multivariate linear regression, Optimization.

**کلمات کلیدی:** تبخیر و تعرق مرجع، FAO56-PM، رگرسیون خطی چند متغیره، بهینه‌سازی.

است. (George and Raghuwanshi (2012) شش مدل متفاوت تخمین  $ET_0$  را برای چهار منطقه مختلف در هند مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که برای مناطقی با اقلیم مرطوب روش فائو-۲۴ دارای تطابق بیشتری با روش FAO56-PM بود.

(Sharifian and Ghahreman (2006) به بررسی و مقایسه تبخیر و تعرق برآورد شده از تشت تبخیر با مقادیر  $ET_0$  روش استاندارد در منطقه گرگان پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که برای بازه زمانی ۱۰ روزه، روش‌های کونیکا، اشنایدر اصلاح شده و آلن - پروت و برای مقیاس ماهانه روش‌های کونیکا و اشنایدر اصلاح شده مناسب هستند. تحقیقات (Gundekar (2004 نشان داد که مقادیر تبخیر و تعرق به‌دست آمده از ضریب تشت اشنایدر در استان مازندران در کشور هند تطابق بسیار خوبی با مقادیر تبخیر و تعرق حاصله از روش فائو- پنمن-مانتیت دارد. خوشحال و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تشت تبخیر فائو در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق ایران پرداختند. نتایج نشان داد که در برآورد مقدار تبخیر و تعرق مرجع، در مقیاس فصلی، فصل تابستان کمترین خطا و فصل زمستان بیشترین خطا را در برآورد  $ET_0$  دارد. (Irmak et al. (2003 معادلات مبتنی بر تابش خورشیدی را برای برآورد تبخیر تعرق مرجع در منطقه‌ای با آب و هوای مرطوب مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که معادلات مبتنی بر تابش می‌تواند به‌عنوان روش‌های عملی و مناسب برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع در مناطق مرطوب جنوب شرقی آمریکا مورد استفاده قرار گیرند. (Zhendong et al. (2017 روند تبخیر و تعرق مرجع و عوامل موثر بر آن را در حوضه غربی رودخانه لیائو چین مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه از اطلاعات ۱۵ ایستگاه هواشناسی در ناحیه خشک و نیمه‌خشک حوضه رودخانه لیائو چین از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۱۲ استفاده شد. نتایج نشان داد که در مقیاس زمانی سالانه، پارامتر تابش خورشید و در مقیاس زمانی فصلی، سه پارامتر میانگین دمای هوا، حداکثر دمای هوا و رطوبت نسبی به‌عنوان اثرگذارترین پارامتر بر مقدار  $ET_{ref}$  در فصل بهار، تابستان، زمستان و پاییز شناخته شدند. (Feng et al. (2017 تغییرات مکانی و زمانی تبخیر و تعرق مرجع در بازه زمانی ۱۹۵۴-۲۰۱۳ در جنوب غربی چین را مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه از آزمون من-کندال<sup>۲</sup>، روند خطی، تحلیل موجک مورلت<sup>۳</sup> و روش‌های درون‌یابی وزن و فاصله معکوس برای تحلیل استفاده شد. صمدی و مجدزاده (۱۳۸۳) به بررسی و مقایسه مقادیر تبخیر و تعرق مرجع حاصله از لایسیمتر با مقادیر تبخیر و تعرق مرجع حاصله از روش‌های تجربی بلانی کریدل، ترنت وایت و پنمن-مانتیت در شهر کرمان پرداخته و نتیجه گرفتند که معادله بلانی کریدل مناسب‌ترین روش برای برآورد مقدار تبخیر و تعرق در مناطق خشک است.

افزایش جمعیت و نیاز روز افزون به مواد غذایی و همچنین محدودیت منابع آب و خاک ضرورت پایداری در توسعه کشاورزی را در شرایط اقلیمی ایران آشکار می‌سازد. در میان اجزای مختلف چرخه هیدرولوژیکی، تقریب دقیق مقدار تبخیر و تعرق، شاید به‌دلیل تعامل پیچیده آن با سیستم خاک-گیاه-اتموسفیر امری دشوار بوده و برآورد دقیق  $ET_0$  برای تخمین نیاز آبیاری خالص، برنامه‌ریزی منابع آب منطقه‌ای و مدیریت و مدل‌سازی تغییرات آب و هوایی ضروری است. تبخیر و تعرق به دو روش مستقیم (استفاده از لایسیمتر) و غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌شود ولی به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه، بیشتر محققین از روش‌های غیرمستقیم برای برآورد میزان تبخیر و تعرق استفاده می‌کنند. این روش‌ها مبتنی بر اطلاعات هواشناسی منطقه، ارتفاع و عرض جغرافیایی هستند. روش‌های غیرمستقیم برآورد تبخیر و تعرق به سه دسته برپایه تشعشع، انتقال جرم و درجه حرارت تقسیم‌بندی می‌شوند. از بین همه این روش‌ها، روش پنمن-مانتیت به‌علت دقت بالای این روش در تخمین تبخیر و تعرق، در همه شرایط آب و هوایی قابل کاربرد است. این روش به‌عنوان روش استاندارد از طرف سازمان فائو معرفی شده و برای ارزیابی سایر مدل‌های تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش FAO56-PM در حال حاضر به‌طور گسترده به‌عنوان روش مرجع در زمینه زراعت، مدیریت آب و آبیاری و سایر زمینه‌های مرتبط برای تحقیق هدف استفاده می‌شود (Alexandris et al., 2006).

روش مورد استفاده برای تخمین مقادیر  $ET_0$  با نوع شرایط آب و هوایی و اطلاعات هواشناسی مورد استفاده تغییر می‌کند. داده‌های مورد نیاز از روشی به‌روشی دیگر تغییر می‌کند. در صورت عدم وجود داده‌های هواشناسی، روش‌های تجربی برای مکان‌های جدید با استفاده از مدل FAO56-PM استاندارد می‌شوند. ارزیابی عملکرد روش‌های مختلف تخمین  $ET_0$  توسط شمار زیادی از محققان انجام شده است. (Yoder et al. (2005 هشت معادله مختلف تخمین  $ET_0$  در جنوب ایالات متحده را مورد ارزیابی قرار داده و نتیجه گرفتند که معادله تورک<sup>۱</sup> جایگزین مناسبی برای مدل FAO56-PM بوده در حالی که معادله هارگریوز-ام ۴ برای منطقه موردنظر انتخابی مناسب نبود. (Nandagiri and Kovoov (2006 عملکرد هفت روش مختلف برآورد  $ET_0$  را در تمام شرایط آب و هوایی هند مورد ارزیابی قرار دادند و نتیجه گرفتند که روش تورک دارای بهترین عملکرد است. (Fooladmand et al. (2008 انواع مختلف معادلات هارگریوز را برای ۱۴ ایستگاه هواشناسی در جنوب ایران با معادله FAO56-PM به‌عنوان معادله استاندارد مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که معادله Hargreaves-M4 برای شرایط آب و هوایی مرطوب و باد کم یک گزینه مناسب

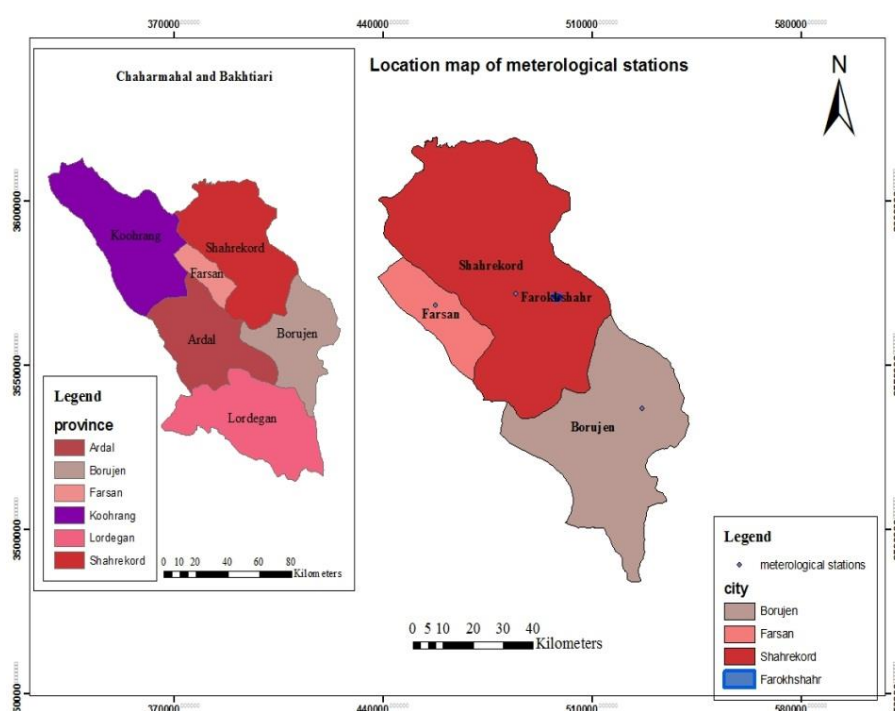
جنوب غربی ایران، استان چهارمحال و بختیاری و بختیاری از سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، ۲) اندازه‌گیری روندهای ماهانه، سالانه و فصلی سری‌های  $ET_0$  بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۷، ۳) تعیین یک جایگزین مناسب برای معادله استاندارد (معادله پنمن-مانتیت) و ۴) ارائه یک رابطه ساده با نیاز به حداقل داده‌های هواشناسی در مناطق دارای کمبود پارامتر هواشناسی تحت شرایط اقلیم نیمه مرطوب و معتدل سرد پایه‌ریزی شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

استان چهارمحال و بختیاری با مساحت ۱۶۵۳۲ کیلومتر مربع بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و نیز ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این استان در بخش مرکزی کوه‌های زاگرس واقع شده است و دارای تنوع آب و هوایی بسیار بوده و شامل اقلیم‌های نیمه مرطوب معتدل سرد، مرطوب معتدل سرد، نیمه مرطوب کمی سرد و اقلیم نیمه مرطوب بسیار گرم است. شهرهای مورد مطالعه در این مقاله شامل شهرکرد، بروجن، فارسان و فرخ‌شهر هستند که دارای اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد می‌باشند. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک سازمان هواشناسی شهرکرد، بروجن، فارسان و فرخ‌شهر استفاده شده است. موقعیت این ایستگاه‌های هواشناسی بوسیله بسته نرم‌افزاری Arc 10.2 GIS مشخص و در شکل ۱ آورده شده است. نام و موقعیت این ایستگاه‌ها در جدول ۱ نمایش داده شده است.

Xing et al. (2018) روش‌های تجربی پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت را برای تخمین  $ET_0$  با روش تشت تبخیر در ایستگاه ساحلی پژوهشگاه کشت سیب زمینی کانادا مورد مقایسه قرار دادند و نتیجه گرفتند که روش تشت تبخیر، تخمین کمتری از  $ET_0$  نسبت به روش‌های پرستلی-تیلور و پنمن-مانتیت ارائه می‌دهد. (Kaya and Salih (2012) مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را در ناحیه ایگدیر ترکیه با استفاده از معادلات مختلف تخمین ضریب تشت تبخیر برآورد نمودند و در مقایسه مقادیر حاصله با معادله فائو-پنمن-مانتیت نتیجه گرفتند که روش اشنایدر در مقیاس ماهانه عملکرد خیلی خوبی دارد. (Naseri et al. (2000) مقادیر تبخیر و تعرق مرجع را با استفاده از روش‌های مختلف تجربی برآورد نموده و سپس مقادیر حاصله را با نتایج حاصل از لایسیمتر مورد مقایسه قرار داده و نتیجه گرفتند که روش‌های بلانی کریدل و تشت تبخیر برای برآورد  $ET_0$  در این منطقه مناسب هستند.

با توجه به تحقیقات و بررسی‌های انجام شده هیچ گزارشی مبنی بر مطالعات انجام شده برای ارزیابی عملکرد روش‌های تخمین تبخیر و تعرق بر پایه انتقال جرم، دما و تشعشع در مناطق سردسیر و نیمه مرطوب در ایران وجود ندارد. علاوه بر این بسته به شرایط خاص آب و هوایی نوع پارامترهای اثر گذار و معادله تجربی مناسب در برآورد تبخیر و تعرق نیز متفاوت است. از این رو به منظور بررسی انطباق هر یک از روش‌های تجربی با شرایط اقلیمی نیمه مرطوب معتدل سرد و همچنین میزان انطباق آن‌ها با فصول گرم و سرد سال به صحت‌سنجی، ارزیابی و مقایسه هر یک از این معادلات پرداخته شد. بدین منظور این مطالعه در قابل چهار هدف. ۱) محاسبه الگوهای ماهانه، سالانه و فصلی سری  $ET_0$  در



شکل ۱- محل ایستگاه‌های سینوپتیک هواشناسی و منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده

ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع (m)
شهرکرد	۳۲°۱۷'	۵۰°۵۵'	۲۰۵۰
بروجن	۳۱°۵۸'	۵۱°۱۷'	۲۲۶۰
فارسان	۳۳°۱۵'	۵۰°۳۳'	۲۰۵۹
فرخ‌شهر	۳۲°۱۷'	۵۰°۵۵'	۲۰۸۵

درجه حرارت: معادلات: ترنث‌وایت<sup>۴</sup>، بلانی کریدل<sup>۵</sup>، هارگریوز-سامانی<sup>۶</sup>، اسکندل<sup>۷</sup>، هارگریوز-ام<sup>۸</sup>، فائو-۲۴<sup>۹</sup>، بلانی کریدل<sup>۹</sup>، تراجکویک<sup>۱۰</sup>، راوازانی<sup>۱۱</sup>، معادلات بر پایه انتقال جرم: پنمن<sup>۱۲</sup>، ماهرینگر<sup>۱۳</sup>، بروکامپ و ونر<sup>۱۴</sup>، میر<sup>۱۵</sup>، راهور<sup>۱۶</sup> و دالتون<sup>۱۷</sup> و معادلات بر پایه تشعشع شامل تورک، فائو-۲۴<sup>۱۸</sup>، والنترز<sup>۱</sup> و ۲<sup>۱۹</sup>، ترک اصلاح شده<sup>۲۰</sup>، پرستلی-تیلور<sup>۲۱</sup>، ماکینک<sup>۲۲</sup> و ایرماک<sup>۱</sup>، ۲ و ۳<sup>۲۳</sup> تقسیم‌بندی شدند.

متغیرهای هواشناسی مورد استفاده در این پژوهش شامل سرعت باد، حداقل، حداکثر و متوسط درجه حرارت هوا و حداقل، حداکثر و متوسط رطوبت نسبی هوا، تعداد ساعات تابش خورشید و میزان بارندگی بوده که در جدول ۲ آورده شده است. این داده‌ها از ۴ ایستگاه هواشناسی و به مدت ۲۲ سال جمع‌آوری شده است. پردازش داده‌ها و تعیین موقعیت ایستگاه‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای Excel و Arc GIS انجام شد. در این مطالعه روش‌های محاسباتی مورد استفاده به سه دسته معادله‌های برپایه

جدول ۲- میانگین ماهانه تغییرات آب و هوایی در ایستگاه‌های شهرکرد، بروجن، فارسان، فرخ‌شهر از سال‌های ۱۳۷۴-۱۳۹۶\*

پارامترها	واحد	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
T <sub>max</sub>	(°C)	۱۶/۵	۲۲/۳	۲۸/۳	۳۲/۹	۳۲/۴	۲۹/۹	۲۴/۵	۱۶/۳	۹/۹	۶/۴	۶/۸	۱۲/۲
T <sub>min</sub>	(°C)	۲/۱	۶/۲	۹/۱	۱۳/۴	۱۳	۹/۷	۵	۱/۲	-۳/۶	-۷/۲	-۵/۹	-۲
T <sub>mean</sub>	(°C)	۹/۳	۱۴/۳	۱۹	۲۳/۲	۲۲/۷	۱۹/۸	۱۴/۷	۸/۷	۳/۱	-۰/۴	۰/۵	۵/۱
P	(mm)	۱/۸	۰/۵	۰/۱	۰/۲	۰/۱	۰/۰۳	۰/۱	۱/۳	۱/۹	۱/۴	۱/۸	۱/۵
RH	(%)	۴۴/۷	۳۹/۷	۲۷/۹	۲۴/۵	۲۴/۵	۲۵/۶	۳۱/۹	۴۷/۷	۵۶/۷	۵۹/۶	۵۸/۲	۴۷/۱
U <sub>2</sub>	(m s <sup>-1</sup> )	۲/۵۱	۲/۲۸	۱/۹۶	۱/۸۸	۱/۸۱	۱/۸۱	۱/۶۵	۱/۶۵	۱/۲۶	۱/۳۴	۱/۸۱	۲/۲۸
R <sub>s</sub>	(MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	۱۸/۶	۲۱/۹۸	۲۵/۹۴	۲۵/۲	۲۳/۹۸	۲۱/۸۸	۱۷/۷۶	۱۳/۰۳	۱۰/۲۵	۱۰/۲۸	۱۲/۰۶	۱۵/۸۱
n	hour	۸/۱	۹/۲	۱۱/۴	۱۰/۹	۱۰/۸	۱۰/۵	۹/۸	۷/۶	۶/۷	۶/۸	۷/۲	۸/۱
N	hour	۱۲/۶	۱۳/۳	۱۳/۸	۱۳/۶	۱۳/۳	۱۲/۳	۱۱/۷	۱۰/۳	۱۰/۳	۱۰/۴	۱۱/۲	۱۱/۹
R <sub>a</sub>	(MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	۳۴/۶	۳۹/۱	۴۱/۴	۴۱	۳۸/۷	۳۴/۲	۲۸/۱	۲۲/۳	۱۸/۹	۱۸/۹	۲۲/۴	۲۸/۴
R <sub>n</sub>	(MJm <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	۱۰/۵۰	۱۵/۰۰	۱۵/۴۳	۱۵/۳۶	۱۴/۲۷	۱۱/۹۵	۸/۴۳	۵/۲۸	۳/۵۸	۳/۶۰	۵/۱۵	۷/۹۱

\* T<sub>max</sub>: دمای حداکثر، T<sub>min</sub> دمای حداقل، T<sub>mean</sub>: دمای میانگین، p: میزان بارندگی (mm)، RH: رطوبت نسبی، U<sub>2</sub>: سرعت باد در ارتفاع دو متری، R<sub>s</sub>: تشعشع خورشیدی رسیده به زمین، n: تعداد ساعات آفتابی، N: حداکثر ساعات آفتابی، R<sub>a</sub>: تابش برون زمینی، R<sub>n</sub>: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی

تعرق مرجع است و مقدار آن از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

که ET<sub>0</sub>: تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mm d<sup>-1</sup>)، R<sub>n</sub>: تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (MJm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>)، T: متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (°C)، U<sub>2</sub>: سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (m s<sup>-1</sup>)، e<sub>a</sub>-e<sub>s</sub>: کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری

## ۱-۲- معادلات تخمین تبخیر و تعرق مرجع

براساس عملکرد، سادگی کاربرد و نیاز به حداقل داده‌های ورودی هواشناسی از ۲۵ معادله تخمین تبخیر و تعرق مرجع استفاده شد و صحت عملکرد این معادلات در مناطق با اقلیم نیمه‌مرطوب و معتدل سرد توسط معادله استاندارد و بین‌المللی (معادله پنمن-مانتیث) مورد ارزیابی و اعتبارسنجی قرار گرفت.

### ۱-۱-۲- معادله پنمن - مانتیث (معادله استاندارد)

این معادله به‌عنوان معتبرترین روش برای تخمین تبخیر و

از سطح زمین (kPa)،  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار (برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد)،  $\gamma$ : ضریب رطوبتی (کیلوپاسکال بر درجه سانتی‌گراد) و  $G$ : شار گرما به داخل خاک ( $\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ) هستند.

#### ۲-۲-۲- معادله رومانکو<sup>۲۴</sup>

$$ET_0 = 4.5 \times \left[ 1 + \frac{T}{25} \right]^2 \times \left( 1 - \frac{e_a}{e_s} \right) \quad (۴)$$

این معادله توسط Oudin et al. (2005) اصلاح شده و فقط نیاز به داده‌های فشار بخار واقعی و اشباع و متوسط درجه حرارت هوا دارد. در این معادله  $e_a$ : فشار بخار واقعی برحسب kPa و  $e_s$ : فشار بخار اشباع برحسب (kPa) هستند.

#### ۲-۲-۴- معادله ترنت‌وایت

اساس این معادله در تعیین میزان تبخیر و تعرق، دمای متوسط ماهانه است و میزان تبخیر و تعرق با این روش به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$ET_0 = 16 \times N_m \times \left( \frac{10 \times T}{I} \right)^a \quad (۵-الف)$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{T}{5} \right)^{1.51} \quad (۵-ب)$$

$$a = (6.75 \times 10^{-7})I^3 - (7.71 \times 10^{-5})I^2 + (1.792 \times 10^{-2})I + 0.492 \quad (۵-ج)$$

که  $ET_0$ : برحسب  $\text{mm/month}$   $I$ : نمایه حرارتی سال است که از جمع نمایه‌های حرارتی ماهانه در طی سال به دست می‌آید،  $a$ : ضریب وابسته به  $I$ ،  $T$ : متوسط دمای هوا ( $^{\circ}\text{C}$ ) در ماه مورد نظر و در صورتی که متوسط دمای هوا در یک ماه صفر یا منفی باشد مقدار  $\left( \frac{T}{5} \right)^{1.51}$  برای آن ماه صفر است و  $N_m$ : ضریب اصلاحی برای ماه‌های مختلف سال است. چون معادله ترنت‌وایت برای محاسبه تبخیر و تعرق در هر یک از ماه‌ها بر این فرض استوار است که هر ماه ۳۰ روز و هر روز ۱۲ ساعت روشنایی داشته باشد. بنابراین اگر تعداد روزهای هر ماه و تعداد ساعات روشنایی در ماه‌های مختلف سال متفاوت باشد، لازم است مقدار  $ET_0$  با استفاده از ضریب اصلاحی  $N_m$  که مقادیر آن در مراجع موجود است تصحیح شود.

#### ۲-۲-۵- معادله اسکندل

$$ET_0 = 16 \frac{T}{RH} \quad (۶)$$

این معادله بسیار ساده است که فقط به متوسط درجه حرارت روزانه هوا وابسته است. در این معادله  $RH$ : درصد رطوبت نسبی هوا و  $T$ : متوسط درجه حرارت روزانه ( $^{\circ}\text{C}$ ) هستند.

#### ۲-۲-۶- روش فائو-۲۴ بلانی‌کریدل (Allen and Pruitt, 1986)

#### ۲-۲-۲- معادلات بر اساس درجه حرارت

معادلات براساس درجه حرارت از اولین معادلاتی بودند که برای تخمین تبخیر و تعرق مورد استفاده قرار گرفتند. معادله‌های مورد استفاده در این مطالعه در ادامه آورده شده است.

#### ۲-۲-۱- معادله هارگریوز-سامانی

معادله هارگریوز و سامانی یک روش تجربی مبتنی بر تابش است و در مناطقی که دارای داده‌های آب و هوایی محدود هستند مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این معادله فقط نیاز به پارامتر دمای هوا است و مقدار تبخیر و تعرق در آن با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$ET_0 = 0.0023 \times R_a \times (T + 17.8) \sqrt{(T_{max} - T_{min})} \quad (۲)$$

که  $T$ : دمای متوسط هوا در دوره مورد نیاز ( $^{\circ}\text{C}$ ) مثلاً روزانه،  $T_{max}$  و  $T_{min}$ : حداکثر و حداقل دمای هوا در دوره مورد نظر ( $^{\circ}\text{C}$ ) و  $R_a$ : تابش خورشیدی ( $\text{mm/d}$ ) هستند.

#### ۲-۲-۲- معادله بلانی‌کریدل

این روش توسط Pruitt واسنجی شده و برای تخمین تبخیر و تعرق مرجع به صورت زیر ارائه شده است:

$$ET_0 = a + b [P(0.46T + 8.13)] \quad (۳)$$

که  $P$ : متوسط ساعات روشنایی هر روز در ماه مورد نظر تقسیم بر کل ساعات روشنایی سال ضرب در ۱۰۰ و  $a$  و  $b$ : ضرایب اقلیمی هستند.

$$a = 0.0043(RH_{min}) - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (۳-الف)$$

$$b = 0.82 - 0.0041(RH_{min}) + 1.07 \left( \frac{n}{N} \right) + \quad (۳-ب)$$

$$0.066(U_2) - 0.006(RH_{min}) \frac{n}{N} - 0.0006(RH_{min})(U_2)$$

که  $n$ : تعداد ساعات واقعی آفتاب،  $N$ : حداکثر ساعات ممکن تابش آفتاب،  $RH_{min}$ : حداقل رطوبت نسبی (درصد) و  $U_2$ : سرعت باد در طول روز در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $\text{m s}^{-1}$ ) هستند.

### ۲-۳-۳- معادله 2 Valiantzas

$$ET_0 = 0.0393R_s \sqrt{|T+9.5|} - 0.19R_s^{0.6} \varphi^{0.15} + 0.078 \times (T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (13)$$

که  $\varphi$ : عرض جغرافیایی برحسب رادیان است.

### ۲-۳-۴- معادله 1 Valiantzas

$$ET_0 = 0.0393R_s \sqrt{|T+9.5|} - 2.4 \left(\frac{R_s}{R_a}\right)^2 - 0.024 \times (T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) + W_{aero} \times 0.066(T+20) \left(1 - \frac{RH}{100}\right) u_2^{0.6}$$

$$W_{aero} = 0.78 \text{ when } RH > 65\%$$

$$W_{aero} = 1.067 \text{ when } RH \leq 65\%$$

در این دو معادله (Kisi (2014) پیشنهاد کرده است که برای سهولت در محاسبات، برای مقادیر خیلی کوچک  $T < -9.5^\circ C$  قدر مطلق ترم  $T+9.5$  در نظر گرفته شود. ولی Valiantzas (2013) پیشنهاد کرده است که برای حالت  $T < -9.5^\circ C$ ،  $ET_0=0$  در نظر گرفته شود. در معادله 1 Valiantzas،  $T$ : متوسط درجه حرارت روزانه هوا ( $^\circ C$ )،  $u_2$ : متوسط سرعت باد در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ( $m s^{-1}$ )، هستند.

### ۲-۳-۵- معادله ایرماک ۱

$$ET_0 = -0.611 + 0.149 \times R_s + 0.079T \quad (15)$$

### ۲-۳-۶- معادله ایرماک ۲

$$ET_0 = -0.642 + 0.174 \times R_s + 0.0353T \quad (16)$$

### ۲-۳-۷- معادله ایرماک ۳

$$ET_0 = -0.478 + 0.156R_s - 0.0112 \times T_{max} + 0.0733 \times T_{min} \quad (17)$$

### ۲-۳-۸- معادله (FAO24-Radiation)

$$ET_0 = a + b \left[ \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times R_s \right] \quad (18)$$

$$ET_0 = a + bP(0.46T + 8.13)(1 + 0.0001E) \quad (7)$$

که  $E$ : ارتفاع (m)،  $a$  و  $b$  ضرایب تجربی همانند روش بلانی کریدل هستند.

### ۲-۲-۷- معادله تراجکویک

$$ET_0 = 0.0023 \times R_a \times (T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424} \quad (8)$$

### ۲-۲-۸- معادله راوازانی

$$ET_0 = (0.817 + 0.00022z)(0.0023) \times R_a \times (T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (9)$$

### ۲-۲-۹- معادله هارگریورز-ام ۴

$$ET_0 = 0.408 \times 0.0023 \times (T + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.424} \times R_a \quad (10)$$

### ۲-۳- معادلات برپایه تشعشع

در این مطالعه از ۱۰ معادله اندازه‌گیری تبخیر و تعرق برپایه تشعشع استفاده شده است. این معادلات عبارتند از:

### ۲-۳-۱- معادله تورک

$$ET_0 = 0.013 \times \frac{T}{T+15} \times \frac{23.88R_s + 50}{\lambda}$$

For  $RH \geq 50\%$

$$ET_0 = \left(1 + \frac{50 - RH}{70}\right) \times 0.013 \times \frac{T}{T+15} \times \frac{23.88R_s + 50}{\lambda}$$

For  $RH < 50\%$

که  $\lambda$ : گرمای نهان تبخیر ( $MJkg^{-1}$ ) که در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد برابر با ۲/۴۵ است،  $RH$ : رطوبت نسبی هوا ( $\%$ ) و  $R_s$ : تشعشع خورشیدی رسیده به زمین (موج کوتاه) برحسب (مگاژول بر مترمربع بر روز) هستند.

### ۲-۳-۲- معادله ماکینک

$$ET_0 = 0.61 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (12)$$

که  $\Delta$ : شیب منحنی فشار بخار (برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد) است.

$$ET_0 = 0.543 \times u_2^{0.456} \times (e_s - e_a) \quad (25)$$

۲-۳-۹- معادله پریستلی-تیلور (PT)

۲-۴-۷- معادله ماهرینگر

$$ET_0 = 1.26 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (19)$$

$$ET_0 = 0.15072 \times \sqrt{(3.6 \times u_2)} \times (e_s - e_a) \quad (26)$$

که  $R_n$ : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی ( $MJm^{-2}d^{-1}$ ) است.

۲-۵- آماره‌های خطا

۲-۳-۱۰- معادله تورک اصلاح شده

مرشدی و همکاران (۱۳۹۶) در مطالعه خود به مقایسه داده‌های لایسیمتری و برخی از معادلات تجربی برآورد تبخیر و تعرق در دشت شهرکرد پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو مدل هاگریورز-سامانی و پنمن-مانتیت در مقایسه با داده لایسیمتری از دقت خوبی برخوردار است. پریسای و همکاران (۱۳۹۶) با ارزیابی معادله‌های مختلف تجربی برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع در شرایط وجود و عدم وجود برخی پارامترهای هواشناسی در دشت شهرکرد نشان دادند که در صورت عدم وجود داده‌های لایسیمتری، معادله پنمن-مانتیت از دقت خوبی برخوردار است. بر این اساس عملکرد و کارایی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق در مقایسه با معادله پنمن-مانتیت مورد ارزیابی قرار گرفت. به این منظور ارزیابی دقت روش‌های جایگزین معادله تبخیر و تعرق استاندارد و تجزیه و تحلیل نتایج از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE) و درصد خطای تخمین (PE) بهره گرفته شد. روابط RMSE، MAE و PE در ادامه ارائه شده‌اند:

$$ET_0 = c_u \times 0.013 \times (23.88 \times R_s + 50) \times T \times (T + 15)^{-1} \quad (20)$$

$$c_u = -0.0211 \times u_2^2 + 0.1109 \times u_2 + 0.9004$$

واحدهای  $ET_0$ ،  $R_s$  و  $T$  همانند واحدهای معادله فائو-پنمن-مانتیت است.

۲-۴-۲- معادلات براساس انتقال جرم

معادلات مبتنی بر انتقال جرم عموماً معادلات ساده‌ای هستند. این معادلات اساساً براساس قانون گاز دالتون هستند و تعدادی از معادلات انتقال جرم که در این مطالعه از آن‌ها استفاده شده است به شرح زیر ارائه شده‌اند:

۲-۴-۱- معادله میر

$$ET_0 = (0.375 + 0.05026u_2) \cdot (e_s - e_a) \quad (21)$$

که  $e_s$  و  $e_a$ : فشار بخار اشباع و فشار بخار واقعی (mmHg) هستند.

۲-۴-۲- معادله پنمن

$$ET_0 = 0.35 \times \left(1 + \frac{0.98}{100u_2}\right) \times (e_s - e_a) \quad (22)$$

که  $e_s$  و  $e_a$  بر حسب mmHg،  $u$  بر حسب mile/day و  $ET_0$  بر حسب  $mm d^{-1}$  هستند.

۲-۴-۳- معادله راهور

$$ET_0 = 0.44 \times (1 + 0.27u_2) \times (e_s - e_a) \quad (23)$$

۲-۴-۵- معادله دالتون

$$ET_0 = (0.3648 + 0.07223u_2) \times (e_s - e_a) \quad (24)$$

۲-۴-۶- معادله بروکمن و ونر

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (27)$$

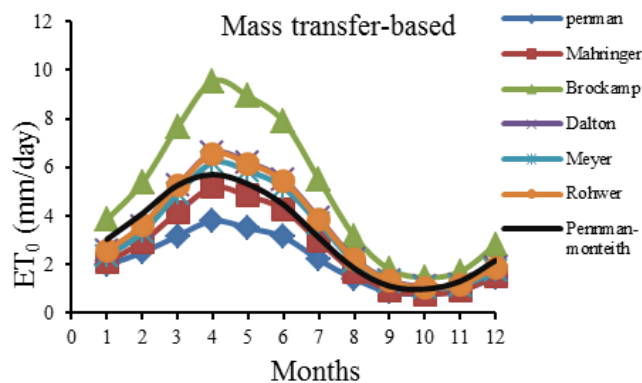
$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (28)$$

$$PE = \left| \frac{P_{av} - O_{av}}{O_{av}} \right| \times 100\% \quad (29)$$

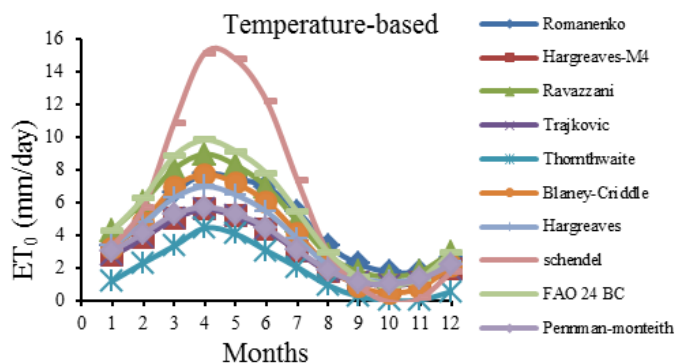
که  $P_i$ : تبخیر و تعرق تخمین زده شده توسط معادلات مختلف،  $O_i$ : تبخیر و تعرق تخمین زده شده واقعی (معادله پنمن-مانتیت)  $P_{av}$ : میانگین تبخیر و تعرق تخمین زده شده،  $O_{av}$ : میانگین  $O_i$  و  $n$ : تعداد داده‌ها هستند.

۳- نتایج و بحث

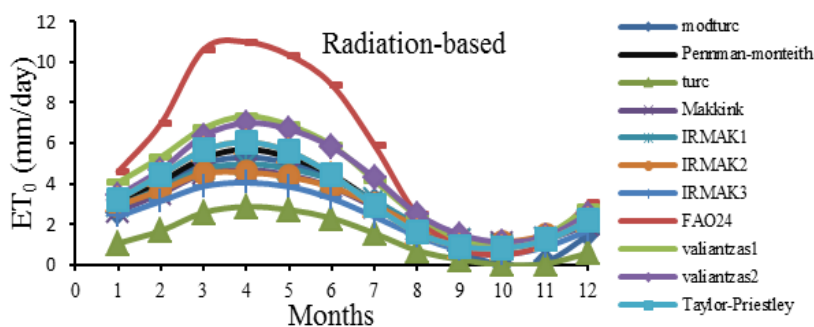
مقادیر  $ET_0$  میانگین ماهانه محاسبه شده از مدل FAO56-PM و روش‌های برپایه انتقال جرم، تشعشع و درجه حرارت برای بازه زمانی ۲۲ سال در شکل‌های ۲ تا ۴ آورده شده‌اند.



شکل ۲- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق ماهانه محاسبه شده با روش‌های مختلف براساس روش انتقال جرم و روش استاندارد در بازه زمانی ۲۲ سال



شکل ۳- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق ماهانه محاسبه شده با روش‌های مختلف براساس درجه حرارت و روش استاندارد در بازه زمانی ۲۲ سال



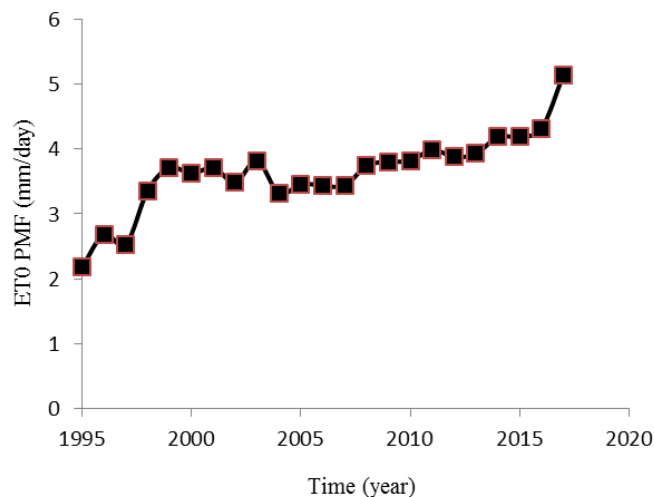
شکل ۴- مقادیر متوسط تبخیر و تعرق ماهانه محاسبه شده با روش‌های مختلف براساس تشعشع و روش استاندارد در بازه زمانی ۲۲ سال

ساله را با زمان نشان می‌دهد (شکل ۵). نتایج هم‌چنین نشان داد که نرخ افزایش تبخیر و تعرق در این بازه زمانی ۲۲ ساله از مقدار ۲/۱۸ به مقدار ۵/۱۴ میلی‌متر بر روز رسیده است (در حدود ۲/۵ میلی‌متر بر روز). نرخ تغییرات درجه حرارت سالانه در بازه زمانی ۲۲ ساله در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج نشان داد که درجه حرارت در حدود ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و این افزایش دما منجر به افزایش نرخ تبخیر و تعرق در این سال‌ها شده است.

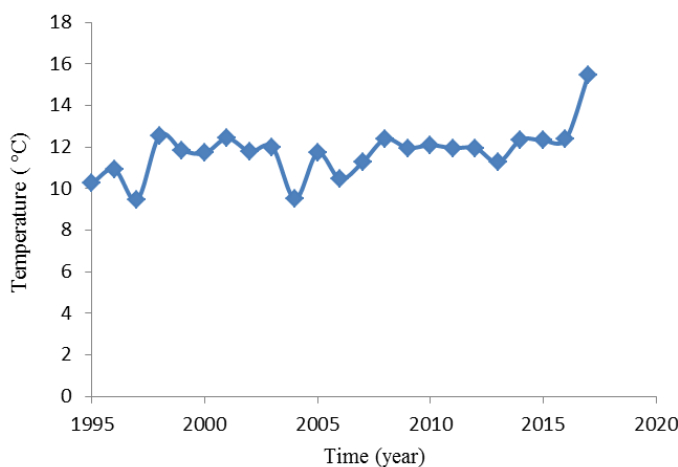
برطبق شکل‌های ۲ تا ۴ حداکثر مقدار تبخیر و تعرق مرجع در ماه‌های فروردین و اردیبهشت مشاهده شده است. این امر می‌تواند به علت درجه حرارت بیشتر در این دو ماه نسبت به ماه‌های دیگر باشد. بنابراین می‌توان انتظار داشت که تبخیر و تعرق در مقیاس زمانی ماهانه متفاوت از مقیاس زمانی فصلی و سالانه تغییر کند (Yihdego and Webb, 2018).

مقادیر داده‌های تبخیر و تعرق سالانه با استفاده از داده‌های تبخیر و تعرق روزانه محاسبه شدند. در مقیاس زمانی سالانه، نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی تبخیر و تعرق در طی بازه زمانی ۲۲





شکل ۵- روند تغییرات تبخیر و تعرق در بازه زمانی ۱۳۷۴-۱۳۹۶



شکل ۶- روند تغییرات درجه حرارت در بازه زمانی ۱۳۷۴-۱۳۹۶

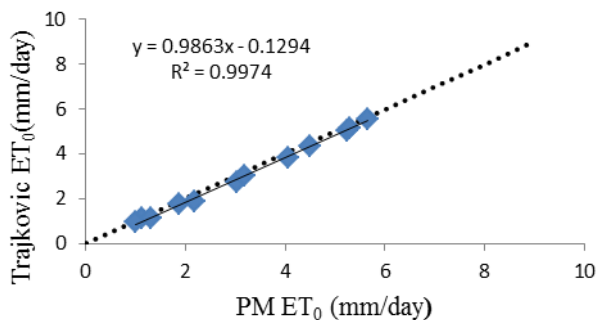
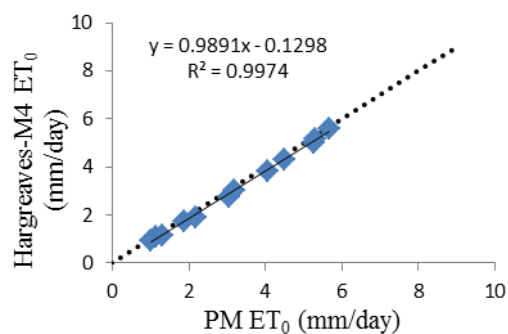
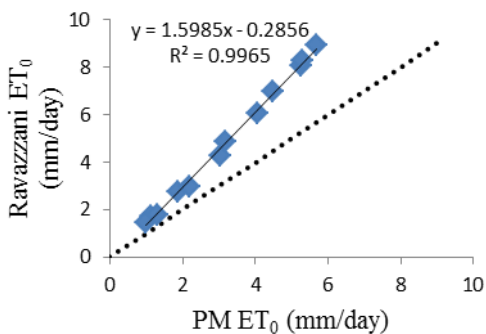
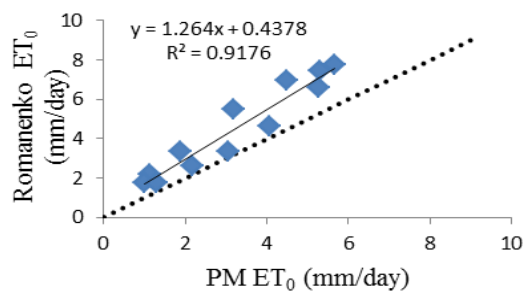
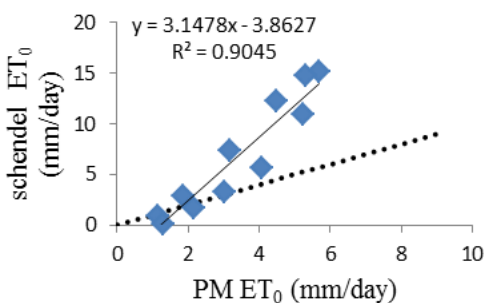
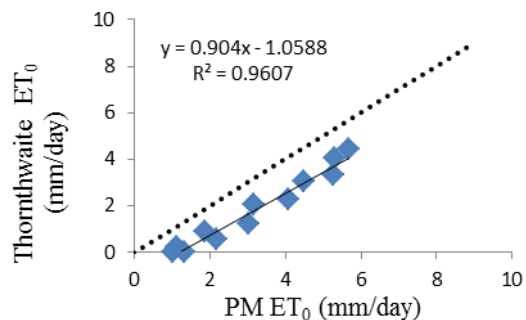
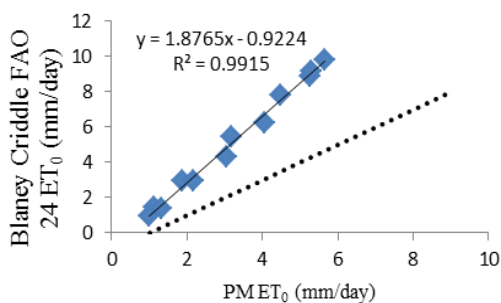
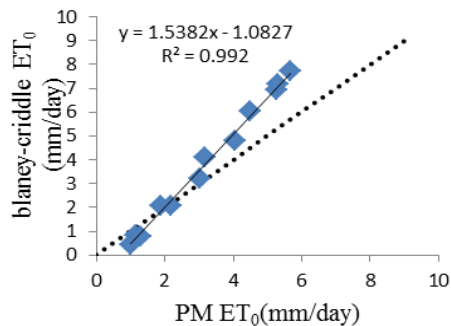
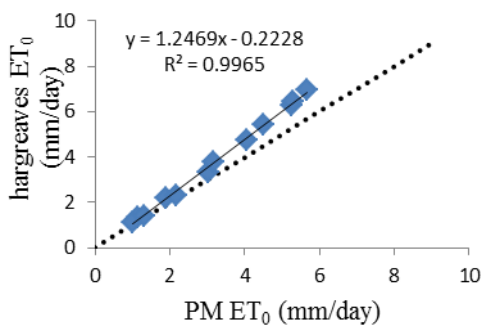
به‌دست آمده از روش FAO56-PM ترسیم شد (شکل ۷). تخمین تبخیر و تعرق توسط همه معادلات برپایه درجه حرارت همبستگی بالایی با معادله FAO56-PM داشته (۰/۹۹- $R^2=0/90$ ). نتایج به‌دست آمده از شکل ۷ نشان می‌دهد که بیشترین تفاوت با خط ۱:۱ مربوط به دو روش اسکندل و فائو-۲۴ بلانی‌کریدل به ترتیب با شیب‌های ۳/۱۴ و ۱/۸۷ و کمترین تفاوت با خط ۱:۱ مربوط به روش ترنث‌وایت با شیب ۰/۹ است. در بین معادلات برپایه درجه حرارت،  $ET_0$  تخمین زده شده به‌وسیله معادلات تراچکویک و هارگریوز-۴م بهترین تطابق را با مقدار  $ET_0$  به‌دست آمده با معادله FAO56-PM ( $R^2=0/99$ ) داشتند. مقایسه معادلات برپایه انتقال جرم با معادله فائو-پنمن-مانتیت در مقیاس زمانی ماهانه در شکل ۸ نمایش داده شده است. مقایسه روش‌های مختلف برپایه انتقال جرم در مقیاس زمانی ماهانه نشان می‌دهد که روش میر بر خط ۱:۱ کاملاً منطبق بوده و مقدار بالای ضریب تبیین ۰/۹۳ حاکی از دقت بالای این مدل در میان روش‌های مورد بررسی است. سپس روش‌های راهور و دالتون با شیب‌های خط ۱/۱۳ و ۱/۱۴ کمترین اختلاف را با روش استاندارد دارند. روش‌های پنمن و ماهرینگر با شیب‌های خط

مقایسه روش‌های مختلف نشان می‌دهد که در بین معادلات برپایه درجه حرارت، تمامی روش‌ها به‌جز روش ترنث‌وایت منجر به برآورد بیشتر مقدار  $ET_0$  در مقایسه با روش استاندارد پنمن-مانتیت شده‌اند. به‌نظر می‌رسد که در بین همه معادلات برپایه درجه حرارت، معادله هارگریوز-۴ عملکرد بهتری در مقایسه با معادله FAO56-PM دارد (شکل ۳). برخلاف هارگریوز-۴م، معادله هارگریوز مقدار  $ET_0$  را نسبت به روش استاندارد بیشتر برآورد می‌کند. تخمین بیشتر مقدار تبخیر و تعرق با استفاده از معادله هارگریوز و در اقلیم مرطوب نیز توسط پژوهشگران مختلفی تایید شده است (Yoder et al., Jensen et al., 1997; 2004; Landeras et al., 2008). در میان معادلات بر پایه انتقال جرم و تشعشع، دو معادله بروکامپ و فائو-۲۴ نتایج ضعیف‌تری در مقایسه با FAO-56 داشتند در حالی که معادلات پرستلی-تیلور و میر عملکرد بهتری در تخمین مقدار تبخیر و تعرق در مقایسه با FAO56-PM داشتند.

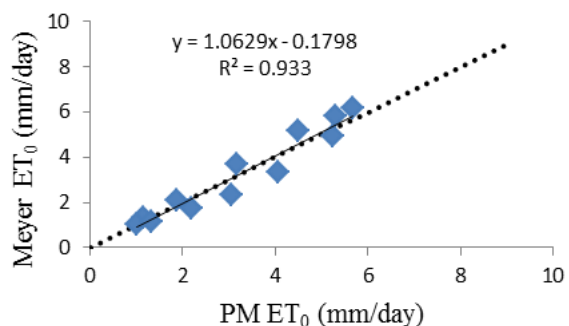
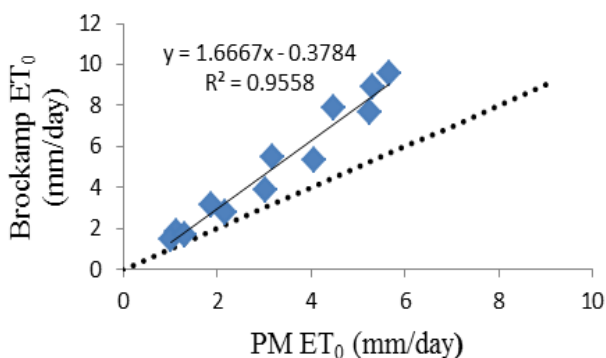
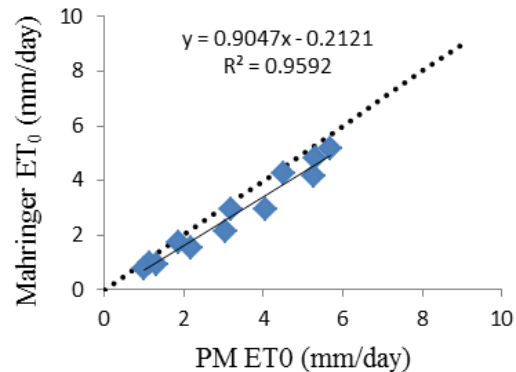
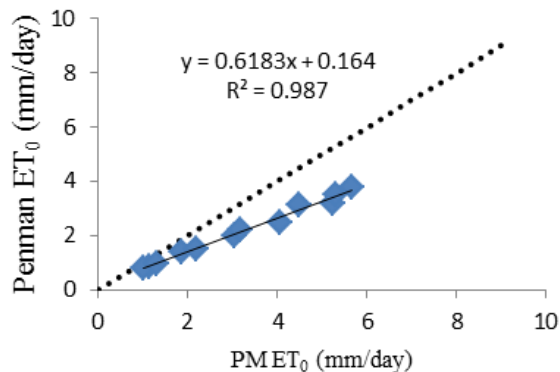
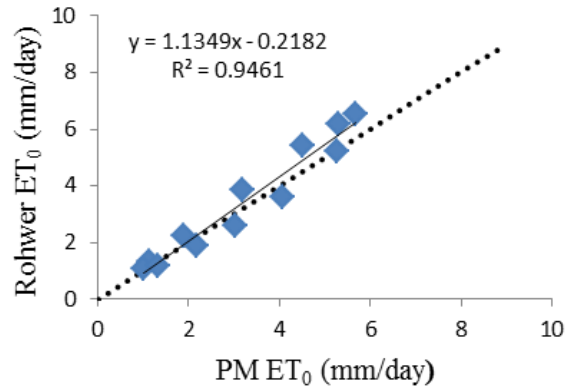
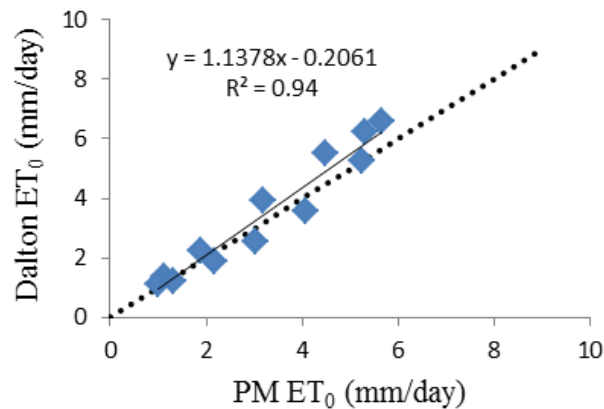
به‌منظور مقایسه مقادیر ماهانه  $ET_0$  با استفاده از معادلات برپایه درجه حرارت، مقدار  $ET_0$  به‌واسطه این معادلات محاسبه شد و سپس مقادیر متوسط  $ET_0$  برای ۲۲ سال در مقابل مقادیر

شیب خط ۱/۶۶ بوده و این روش دارای عملکرد پایینی در تخمین تبخیر و تعرق است.

۰/۶۱ و ۰/۹ پایین تر از خط ۱:۱ قرار داشته و این روش‌ها منجر به برآورد کمتر مقدار تبخیر و تعرق در مقایسه با مقدار واقعی می‌شوند. بیشترین اختلاف با خط ۱:۱ مربوط به روش بروکامپ با



شکل ۷- رابطه بین تخمین مقادیر تبخیر و تعرق معادلات بر پایه درجه حرارت در مقابل روش FAO56-PM در مقیاس زمانی ماهانه

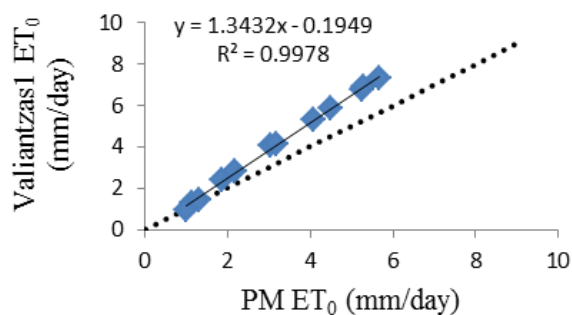
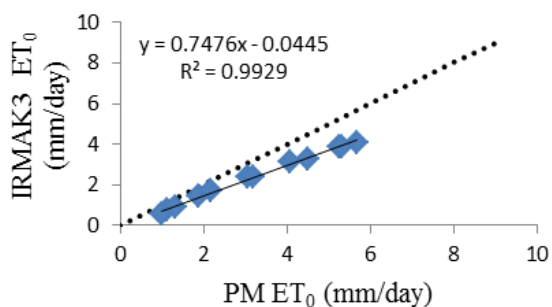
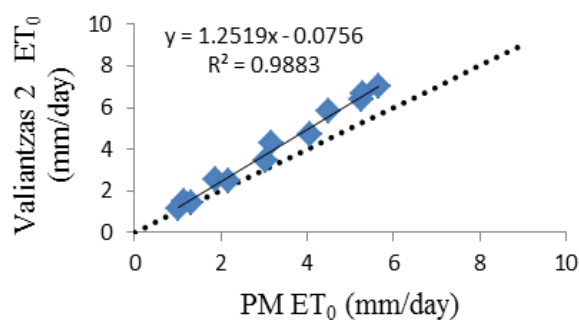
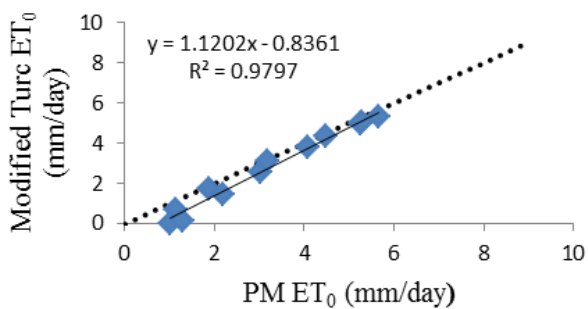
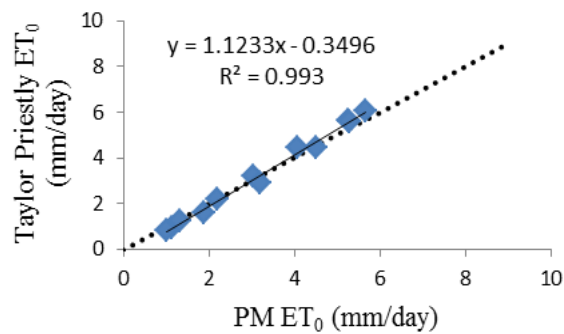
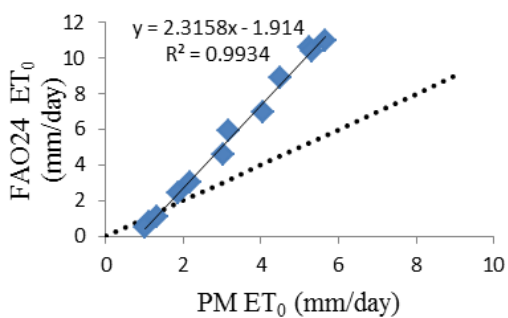
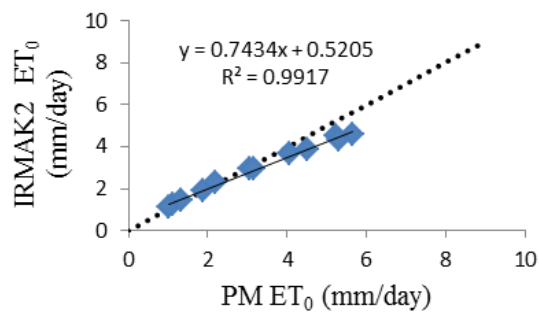
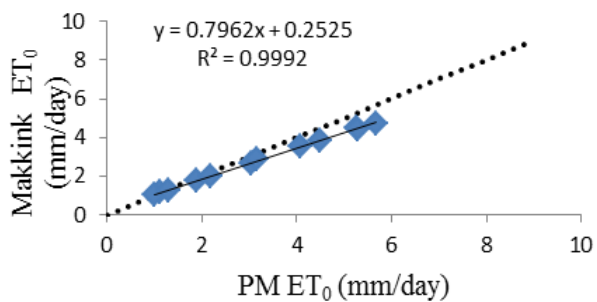
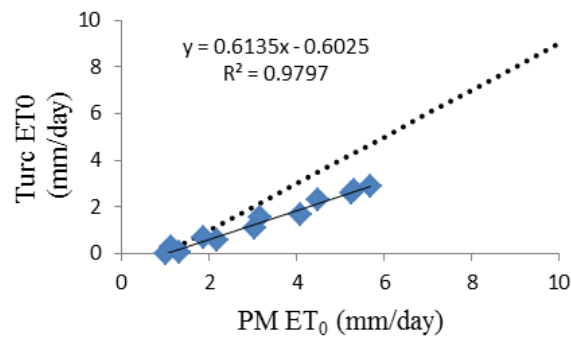
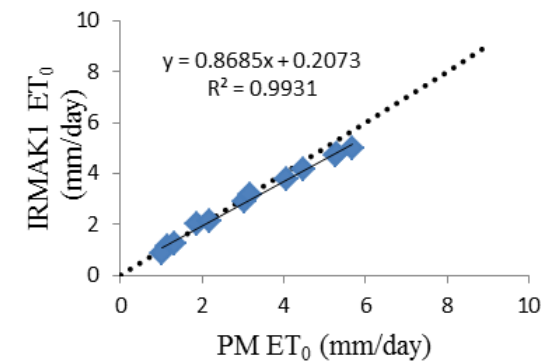


شکل ۸- رابطه بین روش‌های تخمین تبخیر و تعرق برپایه انتقال جرم در مقابل روش فائو-پنمن-مانتیت در مقیاس زمانی ماهانه

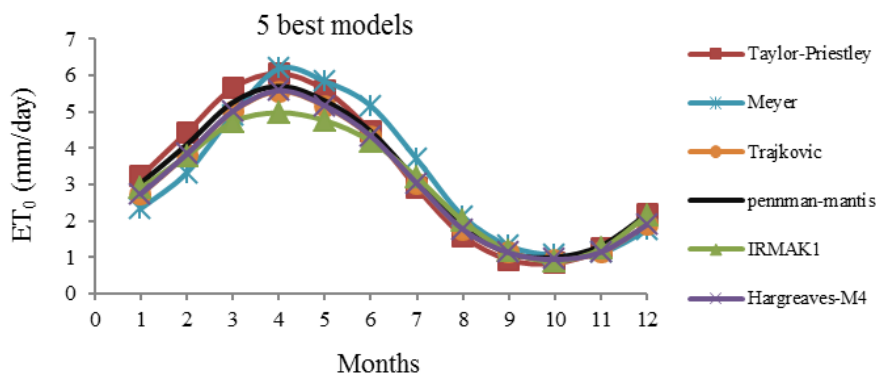
دارند و روش‌های برپایه انتقال جرم و درجه حرارت مناسب‌ترین روش‌ها برای تخمین تبخیر و تعرق در اقلیم‌های نیمه مرطوب معتدل سرد هستند. مقایسه تخمین مقادیر متوسط ماهانه  $ET_0$  نشان داد که در روش‌های تخمین  $ET_0$  برپایه انتقال جرم پارامترهای فشار بخار اشباع، فشار بخار واقعی و سرعت متوسط روزانه باد، پارامترهای اثرگذارتری در مقایسه با پارامترهای همچون تابش خالص خورشیدی و متوسط درجه حرارت روزانه هوا در روش‌های برپایه تشعشع در اقلیم‌های نیمه مرطوب معتدل سرد هستند. برطبق مقادیر RMSE و MAE، پنج مدل پرستلی-تیلور، میر، تراچکویک، پنمن-مانتیت، ایرماک ۱ و هاگریورز-ام ۴ در مقیاس زمانی ماهانه انتخاب شدند که در شکل ۱۰ نمایش داده شده‌اند.

مقایسه بین روش‌های مختلف تخمین  $ET_0$  برپایه تشعشع در مقابل روش پنمن-مانتیت در مقیاس زمانی ماهانه در شکل ۹ ترسیم شده است. نتایج نشان داد که روش‌های ایرکاک ۱، ۲، ۳ و تورک به ترتیب با شیب خط ۰/۸۶، ۰/۷۴، ۰/۷۵ و ۰/۶۱ منجر به برآورد کمتر مقدار تبخیر و تعرق در مقایسه با روش پنمن-مانتیت می‌شوند در حالی که روش‌های فائو ۲۴، والنتریز ۱ و ۲ به ترتیب با شیب خط ۲/۳۱ و ۱/۳۴ و ۱/۲۵ منجر به تخمین بیشتر تبخیر و تعرق نسبت به روش پنمن-مانتیت می‌شوند. مقایسه روش‌های مختلف بر پایه تشعشع حاکی از اختلاف حداکثری روش فائو ۲۴ (شیب خط ۲/۳۱) با مقادیر پنمن-مانتیت (خط ۱:۱) دارد.

به‌طور کلی، مقایسه نتایج نشان داد که معادلات برپایه تشعشع بدترین عملکرد را در بین روش‌های ارزیابی تخمین  $ET_0$



شکل ۹- رابطه بین معادلات تخمین تبخیر و تعرق بر پایه تشعشع در مقابل روش فائو-پنمن-مانتیت در مقیاس زمانی ماهانه



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر متوسط تبخیر و تعرق ماهانه ۲۲ ساله برای پنج مدل با عملکرد بالاتر از میان ۳۱ روش تخمین تبخیر و تعرق

تخمین (PE) به ترتیب با ۹۴/۴۵، ۵۸/۹۱، ۴۰/۰۴ و ۵۰/۹۵ درصد منجر به برآورد بیشتر تبخیر و تعرق در مقایسه با روش پنمن-مانتیت شده در حالی که معادله ترنتوایت با متوسط درصد خطای تخمین ۴۲/۵۸ منجر به برآورد کمتر مقدار تبخیر و تعرق می‌شود. وجود مقدار اختلاف ۱/۳۶- بین مقدار برآورد شده و مقدار واقعی (پنمن-مانتیت) نیز دلالت بر این امر دارد. معادلات فائو-۲۴ و تورک با متوسط درصد خطای ۷۱/۹۶ و ۵۷/۴۲ در بین روش‌های برپایه تشعشع عملکرد ضعیف‌تری در برآورد تبخیر و تعرق و در نواحی با اقلیم نیمه مرطوب معتدل سرد نشان دادند. Djaman et al., (2015) بیان کردند که معادلات راوازانی، هارگریوز، تراجکویک و هارگریوز اصلاح شده به‌طور سیستماتیک مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر از مقدار روش فائو-پنمن-مانتیت برآورد نموده در حالی که دو معادله ماکینک و تورک منجر به برآورد کمتر مقدار تبخیر و تعرق می‌شوند.

به‌منظور بررسی عملکرد معادلات مختلف برآورد تبخیر و تعرق (روش‌های برپایه درجه حرارت، انتقال جرم و تشعشع) در مقیاس زمانی فصلی در مقایسه با روش پنمن-مانتیت، عملکرد آماری این معادلات در جدول ۵ آورده شده است. نتایج نشان داد که کمترین و بیشترین خطا در تخمین مقدار تبخیر و تعرق مرجع به ترتیب متعلق به دو فصل پاییز و بهار است. در فصل‌های زمستان و پاییز روش‌های تورک، تورک اصلاح شده و ترنتوایت مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر از روش پنمن-مانتیت تقریب می‌زنند. در حالی که برای فصل‌های بهار و تابستان معادلات Ravazzani, Brockamp, Penman, FAO 24-Blaney-Criddle, FAO 24, IRMAK 3, Valiantzas 1, Schendel, Thornthwaite, Turc مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر از روش پنمن-مانتیت تقریب زدند. نتایج به‌دست آمده توسط معادلات برپایه انتقال جرم در فصل زمستان مشابه روش پنمن-مانتیت بود. بیشترین مقدار تبخیر و تعرق به‌وسیله روش Schendel در فصل تابستان تخمین زده شد. براساس نتایج به‌دست آمده و پارامترهای مورد استفاده در معادلات مختلف، در فصل زمستان پارامترهای متوسط درجه حرارت روزانه و تابش خورشیدی ( $R_s$ ) موثرترین پارامترها بر میزان تبخیر و تعرق هستند. اما در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز

جدول ۴ خلاصه نتایج عملکرد آماری روش‌های برپایه تشعشع، انتقال جرم و درجه حرارت در مقابل روش FAO56-PM را برای تخمین تبخیر و تعرق در مقیاس زمانی سالانه در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۵-۲۰۱۷) نشان می‌دهد. در میان روش‌های برپایه انتقال جرم، روش میر (PE=۰/۶۸، MAE=۰/۴۴ و RMSE=۰/۴۹)، در میان روش‌های برپایه درجه حرارت، هارگریوز-م۴ (PE=۰/۵۱۳، MAE=۰/۱۶ و RMSE=۰/۱۸)، تراجکویک (PE=۰/۵۳۹، MAE=۰/۱۷ و RMSE=۰/۱۹) و در میان روش‌های برپایه تشعشع پرستلی-تیلور (PE=۰/۱۴۴، MAE=۰/۲۱ و RMSE=۰/۲۴) بهترین عملکرد را در برآورد تبخیر و تعرق در مقایسه با روش پنمن-مانتیت داشتند. صرف‌نظر از تعداد پارامترهای ورودی هواشناسی به‌منظور تخمین تبخیر و تعرق و در مقیاس زمانی سالانه، روش‌های برپایه درجه حرارت خطای بیشتری (RMSE بالاتری،  $4/96 \text{ mm day}^{-1}$ ) در میان سه روش ذکر شده (یعنی روش‌های برپایه درجه حرارت، انتقال جرم و تشعشع) داشته و در این میان دو روش هارگریوز-م۴ و تراجکویک خطای کوچکتری نسبت به دیگر معادلات دارند (جدول ۴). بررسی پارامترهای ورودی مورد استفاده در این دو روش نشان می‌دهد که این دو روش دارای ۴ پارامتر ورودی برای تخمین تبخیر و تعرق هستند، ولی لزوماً تعداد کمتر پارامتر ورودی همیشه منجر به برآورد دقیق‌تر تبخیر و تعرق نمی‌شود (برای مثال روش Schendel). این نتیجه با نتایج به‌دست آمده توسط Antonopoulos and Antonopoulos (2017) مطابقت دارد.

نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ حاکی از اختلاف به‌ترتیب  $1/05 \text{ mm d}^{-1}$  و  $0/51 \text{ mm d}^{-1}$  روش‌های پنمن و ماهرینگر (معادلات برپایه انتقال جرم) با روش فائو-پنمن-مانتیت است. اما این اختلاف برای روش Brockamp بیشتر است ( $1/77 \text{ mm d}^{-1}$ ). در بین معادلات برپایه انتقال جرم روش Meyer با MAE=0.44 در  $\text{mm day}^{-1}$  بهترین عملکرد را در تخمین تبخیر و تعرق دارد. در بین معادلات برپایه درجه حرارت، معادلات Schendel, FAO24-Blaney-Criddle, Romanenko و Ravazzani با درصد خطای

تابش برون‌زمینی ( $R_a$ ) و حداکثر و حداقل درجه حرارت هوا پارامترهای اثرگذار بر برآورد و تعرق بودند. ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا برای هر ۳۱ روش محاسبه و مشخص شد که روش‌های که برای تخمین تبخیر و تعرق نیاز به پارامترهای بیشتری دارند، مقادیر RMSE و MAE کمتری دارند. در حالی که روش‌هایی که نیاز به پارامترهای کمتری در محاسبه  $ET_0$  دارند مقادیر RMSE و MAE بیشتری دارند. این الگو در هر دو مقیاس زمانی فصلی و سالانه مشاهده شد. بنابراین روش‌های پریستلی-تیلور، میر و هارگریوز-ام ۴ خطای بسیار کمی را در

مقیاس زمانی سالانه و فصلی از خود نشان دادند. دو روش هارگریوز-ام ۴ و تراجکویک در مقیاس زمانی فصلی (همه فصل‌ها به جز فصل زمستان) تطابق خیلی خوبی با روش پنمن-مانتیت داشتند. پارامترهای مورد استفاده در روش‌های هارگریوز-ام ۴ و تراجکویک (روش‌های برپایه درجه حرارت) شامل حداکثر و حداقل دما، متوسط درجه حرارت روزانه و تابش خورشیدی ( $R_s$ ) است که می‌تواند اثر بیشتری بر مقدار برآورد تبخیر و تعرق در این مقیاس زمانی داشته باشد.

جدول ۴- عملکرد آماری روش‌های برپایه تشعشع، درجه حرارت و انتقال جرم در مقابل فائو-پنمن-مانتیت جهت تخمین تبخیر و تعرق سالانه در بازه زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۵-۲۰۱۷)

نام روش	RMSE (mm day <sup>-1</sup> )	MAE (mm day <sup>-1</sup> )	PE (%)	$\Delta^*$
بر اساس انتقال جرم				
ماهرینگر	۰/۶۳	۰/۵۱	۱۶/۱۳	-۰/۵۱
دالتون	۰/۵۸	۰/۴۸	۷/۳۶	۰/۲۴
روهور	۰/۵۵	۰/۴۵	۶/۶۹	۰/۲۳
پنمن	۱/۲۴	۱/۰۵	۳۳/۰۶	-۱/۰۵
بروکامپ	۲/۱۶	۱/۷۷	۵۴/۸۸	۱/۷۶
میر	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۶۸	۰/۰۳
بر اساس درجه حرارت				
هاگریوز-ام ۴	۰/۱۸	۰/۱۶	۵/۱۳	-۰/۱۶
راوازانی	۱/۹۲	۱/۶۴	۵۰/۹۵	۱/۶۴
تراجکویک	۰/۱۹	۰/۱۷	۵/۳۹	-۰/۱۷
اسکندل	۴/۹۶	۳/۵۳	۹۴/۴۵	۳/۰۴
ترنت‌واپت	۱/۴۰	۱/۳۶	۴۲/۵۸	-۱/۳۶
رومنکو	۱/۵۱	۱/۲۹	۴۰/۰۴	۱/۲۹
بلانی کریدل	۱/۱۲	۰/۸۸	۲۰/۰۹	۰/۶۵
هاگریوز	۰/۷۱	۰/۵۷	۱۷/۷۵	۰/۵۸
فائو-۲۴-بلانی کریدل	۲/۳۹	۱/۹۱	۵۸/۹۱	۱/۹
بر اساس تشعشع				
پریستلی-تیلور	۰/۲۴	۰/۲۱	۱/۴۴	۰/۰۵
فائو-۲۴	۳/۱۸	۲/۴۸	۷۱/۹۶	۲/۳۲
ایرماک ۳	۰/۹۵	۰/۸۵	۲۶/۶۲	-۰/۸۴
ایرماک ۲	۰/۵۴	۰/۳۹	۹/۴۵	-۰/۲۹
ایرماک ۱	۰/۳۴	۰/۲۵	۶/۶۹	-۰/۲۱
والنتیرز ۱	۱/۰۷	۰/۹۲	۲۸/۳۵	۰/۹۲
والنتیرز ۲	۰/۸۸	۰/۷۴	۲۲/۸۴	۰/۷۴
ماکینگ	۰/۵۳	۰/۴۱	۱۲/۵۱	-۰/۳۹
تورک	۱/۹۵	۱/۸۳	۵۷/۴۲	-۱/۸۴
تورک اصلاح‌شده	۰/۵۶	۰/۴۴	۱۴/۰۲	-۰/۴۴

\* $\Delta$ : تفاوت بین مقادیر تبخیر و تعرق سالانه برآورد شده از هر روش با روش پنمن-مانتیت

در مقیاس زمانی فصلی روش‌های بر پایه دما شامل هارگریوز-ام ۴ با مقدار خطای  $RMSE=0.49 \text{ mm d}^{-1}$  و تراجکویک با مقدار خطای ( $RMSE=0.18 \text{ mm d}^{-1}$ ) به ترتیب دارای عملکرد بالاتری در مقایسه با روش فائو-پنمن-مانتیت

هستند.

در میان روش‌های مختلف، روش هارگریوز-ام ۴ نتایج بهتری در هر دو مقیاس زمانی سالانه و فصلی داشته است و بنابراین می‌تواند جایگزین مناسبی برای برآورد تبخیر و تعرق به‌ویژه

در داده‌های ورودی مورد نیاز با معادله هارگریوز-ام ۴ تعیین نمود. آن‌ها هم‌چنین نشان دادند که تفاوت مکانی قابل توجهی در عملکرد این معادله در دو اقلیم مرطوب و خشک وجود ندارد.

در صورت عدم اطلاعات کافی مورد نیاز در این دو مقیاس زمانی باشد. (Vicente-Serrano et al. (2014) بیان کردند که می‌توان مقدار  $ET_0$  را در مناطقی با اقلیم مرطوب و در صورت محدودیت

جدول ۵- آماره‌های خطای فصلی روش‌های مختلف جهت تخمین تبخیر و تعرق در مقایسه با روش پنمن - مانیت

فصل					فصل					
روش	مقدار خطا	بهار	تابستان	پاییز	زمستان	مقدار خطا	بهار	تابستان	پاییز	زمستان
ماهرینگر	MAE	۱/۰۷	۰/۴۱	۰/۱۵	۰/۴۲	RMSE	۱/۰۸	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۵
	RMSE	۱/۰۸	۰/۴۳	۰/۱۵	۰/۴۵	MAE	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۱۰۶	۰/۱۸
هارگریوز ام ۴	MAE	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۱۰۶	۰/۱۸	RMSE	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۱۰۶	۰/۱۹
	RMSE	۰/۲۷	۰/۱۳	۰/۱۰۶	۰/۱۹	MAE	۱/۹۹	۲/۹۱	۱/۱	۰/۵۶
راوازانی	MAE	۱/۹۹	۲/۹۱	۱/۱	۰/۵۶	RMSE	۱/۶۳	۳/۶۳	۱/۶۳	۰/۵۱
	RMSE	۱/۶۳	۳/۶۳	۱/۶۳	۰/۵۱	MAE	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۰۶	۰/۱۸
تراجکویک	MAE	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۰۶	۰/۱۸	RMSE	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۰۶	۰/۲
	RMSE	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۱۰۶	۰/۲	MAE	۱/۴۹	۳/۶۲	۱/۴۷	۰/۴۹
بروکامپ	MAE	۱/۴۹	۳/۶۲	۱/۴۷	۰/۴۹	RMSE	۲/۰۹	۲/۹۲	۱/۱۹	۰/۵۹
	RMSE	۲/۰۹	۲/۹۲	۱/۱۹	۰/۵۹	MAE	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۹۶
ماد تورک	MAE	۰/۳۶	۰/۲۷	۰/۱۹	۰/۹۶	RMSE	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۹۸
	RMSE	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۹۸	MAE	۰/۳۴	۰/۹۴	۰/۴۸	۰/۱۷
دالتون	MAE	۰/۳۴	۰/۹۴	۰/۴۸	۰/۱۷	RMSE	۰/۴۱	۰/۹۴	۰/۵۴	۰/۱۹
	RMSE	۰/۴۱	۰/۹۴	۰/۵۴	۰/۱۹	MAE	۰/۳۲	۰/۸۹	۰/۴۴	۰/۱۶
روهو	MAE	۰/۳۲	۰/۸۹	۰/۴۴	۰/۱۶	RMSE	۰/۳۸	۰/۸۹	۰/۴۹	۰/۱۸
	RMSE	۰/۳۸	۰/۸۹	۰/۴۹	۰/۱۸	MAE	۱/۵۸	۱/۶۸	۰/۵۳	۰/۴۲
پنمن	MAE	۱/۵۸	۱/۶۸	۰/۵۳	۰/۴۲	RMSE	۱/۶۴	۱/۷	۰/۵۹	۰/۴۷
	RMSE	۱/۶۴	۱/۷	۰/۵۹	۰/۴۷	MAE	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۲۳
میر	MAE	۰/۶۱	۰/۵۷	۰/۳۵	۰/۲۳	RMSE	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۲۸
	RMSE	۰/۶۴	۰/۵۸	۰/۳۹	۰/۲۸	MAE	۲/۳۳	۳/۷۶	۱/۲۶	۰/۲۸
بلانی کریدل فائو ۲۴	MAE	۲/۳۳	۳/۷۶	۱/۲۶	۰/۲۸	RMSE	۲/۵۲	۳/۷۷	۱/۵	۰/۴۵
	RMSE	۲/۵۲	۳/۷۷	۱/۵	۰/۴۵	MAE	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۰۸
پرستلی- تیلور	MAE	۰/۳۱	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۰۸	RMSE	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۱۱
	RMSE	۰/۳۲	۰/۲۶	۰/۲۲	۰/۱۱	MAE	۰/۶۵	۱/۱۳	۰/۴۲	۰/۱۱
هارگریوز	MAE	۰/۶۵	۱/۱۳	۰/۴۲	۰/۱۱	RMSE	۱/۰۵	۱/۸۳	۰/۶۲	۰/۴۴
	RMSE	۱/۰۵	۱/۸۳	۰/۶۲	۰/۴۴					

از مدل توانی و یا خطی) انجام شد:

$$ET_0 = 1.015 \times (0.408 \times 0.0023 \times (T + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.424} \times R_a) + 0.112 \quad (30)$$

Hargreaves-M4 linear optimized equation

$$ET_0 = 1.118 \times (0.408 \times 0.0023 \times (T + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.424} \times R_a)^{0.952} \quad (31)$$

Hargreaves-M4 power-optimized equation

$$ET_0 = 1.018 \times (0.0023 \times R_a \times (T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424}) + 0.112 \quad (32)$$

Trajkovic linear optimized equation

$$ET_0 = 1.121 \times (0.0023 \times R_a \times (T + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.424})^{0.952} \quad (33)$$

Trajkovic power optimized equation

نتایج نشان داد که معادلات توانی در مقایسه با معادلات خطی دارای عملکرد بالاتری هستند (جدول ۶). بنابراین معادله‌های بهینه شده زیر می‌توانند مقدار  $ET_0$  را با دقت بالاتر در اقلیم‌های سرد، معتدل و نیمه مرطوب برآورد کنند.

ارزیابی مقادیر خطای آماری محاسبه شده برای فصل زمستان نشان می‌دهد که روش‌های برآورد تبخیر برپایه تشعشع عملکرد بالاتر و دقت بیشتری در مقایسه با روش‌های بر پایه دما دارد. از میان این روش‌ها دو روش ایرماک و تیلور-پرستلی ۱ با مقدار خطای  $MAE=0.08 \text{ mm d}^{-1}$  خبش خوبی داشته و دقت بالایی در برآورد تبخیر و تعرق بعد از روش هارگریوز-ام ۴ (روش برپایه دما) دارند.

برپایه جدول ۴ بهترین روش‌ها برای برآورد مقدار  $ET_0$  در فصل‌های بهار، تابستان و پاییز روش‌های برپایه دما و بهترین روش برای برآورد مقدار  $ET_0$  در فصل زمستان روش‌های بر پایه تشعشع هستند. در این مطالعه به‌منظور کاهش مقدار خطای برآورد  $ET_0$  و دستیابی به دقت بالاتر، دو معادله هارگریوز-ام ۴ و تراجکویک به‌علت عملکرد بالا انتخاب و بهینه شدند. این بهینه‌سازی تا رسیدن به حداقل میزان مجموع مربعات خطا و بیشترین ضریب تبیین بین داده‌های مقادیر موجود (داده‌های برآورد شده توسط این دو روش، معادله‌های (۸) و (۱۰)) و برآورد شده (با استفاده

جدول ۶- مقادیر آماره‌های خطای مربوط به دو معادله بهینه شده تبخیر و تعرق

RMSE	MAE	PE (%)	نام
۰/۱۸	۰/۱۵	۵/۱۳	Hargreaves-M4
۰/۱۹	۰/۱۶	۵/۳۹	Trajkovic
۰/۰۹	۰/۰۸	۴/۹	Hargreaves-M4 linear optimized equation
۰/۰۸	۰/۰۷	۴/۸	Hargreaves-M4 power optimized equation
۰/۰۹	۰/۰۸	۵/۱۶	Trajkovic linear optimized equation
۰/۰۸	۰/۰۸	۵/۱۶	Trajkovic power optimized equation

که روش‌های برپایه تشعشع عملکرد و دقت بالاتری در مقایسه با روش‌های برپایه دما دارند.

- در بازه زمانی ماهانه، از میان روش‌های بر پایه انتقال جرم سه روش دالتون، راهور و میر تطابق بیشتری با روش پنمن-مانتیت داشته است. در مقایسه با شیب خط ۱:۱، بیشترین تفاوت معنی‌دار آماری مربوط به روش بروکامپ با شیب خط ۱/۶۶ است. در حالی که شیب به‌دست آمده برای دو روش پنمن و ماهرینگر به ترتیب ۰/۶۱ و ۰/۹ به‌دست آمده است که حاکی از عملکرد ضعیف روش بروکامپ در مقایسه با دو روش مذکور در برآورد  $ET_0$  است.

- در میان روش‌های برپایه دما در مقیاس زمانی ماهانه، نتایج نشان داد که روش‌های هارگریورز-ام ۴ و تراجکویک تطابق بیشتری با روش پنمن-مانتیت داشته و دیگر روش‌ها مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر از روش پنمن-مانتیت تخمین می‌زنند و تنها در میان این روش‌ها، روش ترنث‌وایت برآورد کمتری از میزان تبخیر و تعرق در مقایسه با روش استاندارد دارد.

- در مقیاس زمانی ماهانه، در میان روش‌های برپایه تشعشع، روش‌های فائو ۲۴ و تورک بدترین عملکرد و دو روش پریستلی-تیلور و ایرماک ۱ بیشترین تطابق را با روش پنمن-مانتیت داشتند. نتایج به‌دست آمده همچنین نشان می‌دهد که استفاده از اغلب معادلات برپایه تشعشع منجر به برآورد کمتر مقدار تبخیر در مقایسه با روش استاندارد می‌شوند. برای مثال می‌توان به معادلات ماکینگ، تورک اصلاح شده و ایرماک ۳ با مقادیر شیب کمتر از یک اشاره نمود، اما روش‌های فائو-۲۴، Valiantzas 1 و Valiantzas 2 با شیب‌های به ترتیب ۲/۳۱، ۱/۳۴ و ۱/۲۵ مقدار تبخیر و تعرق را نسبت به روش پنمن-مانتیت بیشتر برآورد کردند.

- در مقیاس زمانی ماهانه، مقادیر  $ET_0$  نشان داد که فشار بخار اشباع، فشار بخار واقعی و متوسط سرعت روزانه باد پارامترهای موثرتری نسبت به پارامترهای هم‌چون (تابش خالص در سطح پوشش گیاهی:  $R_n$ ) و متوسط درجه حرارت روزانه هوا هستند.

- در این مطالعه، روش‌های هارگریورز-ام ۴ و تراجکویک به صورت معادلات خطی و توانی برای اقلیم‌های نیمه مرطوب

از آن جایی که پارامترهای ورودی از قبیل دمای حداقل، دمای حداکثر و  $R_s$  بیشترین تاثیر را در برآورد مقدار  $ET_0$  داشته‌اند. به‌منظور ساده‌سازی برآورد  $ET_0$  در اقلیم‌های سرد، معتدل و نیمه مرطوب دو معادله خطی با استفاده از رگرسیون خطی چند متغیره و براساس پارامترهای ورودی ذکر شده ارائه شد:

$$ET_0 = 0.116 \times T_{\min} + 0.16 \times R_s + 0.01 \quad (34)$$

$$ET_0 = 0.04 \times T_{\min} + 0.05 \times T_{\max} + 0.22 \quad (35)$$

همان‌طور که در جدول ۷ نشان داده شده است، معادلات پیشنهادی (معادلات (۳۴) و (۳۵)) در مقایسه با دو معادله هارگریورز-ام ۴ و تراجکویک از دقت بالایی برخوردار بودند.

جدول ۷- مقادیر آماره‌های خطای دو معادله ارائه شده براساس رگرسیون خطی چند متغیره

RMSE	MAE	نام
۰/۱۲	۰/۱۵	معادله (۳۴)
۰/۱۱	۰/۰۹	معادله (۳۵)

#### ۴- نتیجه‌گیری

- در مقیاس زمانی سالیانه روش‌های هارگریورز-ام ۴ و تراجکویک (دو معادله برپایه دما) دو معادله مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق هستند. پس از آن دو روش پریستلی-تیلور و ایرماک ۱ (برپایه تشعشع) مطابقت کمتری با معادله پنمن-مانتیت داشته و برای برآورد مقدار  $ET_0$  در جایگاه پایین‌تری در مقایسه با دو روش قبلی قرار می‌گیرند.

- در مقیاس فصلی، مقایسه روش‌های مختلف برآورد تبخیر در فصل تابستان، بهار و پاییز نشان می‌دهد که مشابه با مقیاس سالیانه دو معادله هارگریورز-ام ۴ و تراجکویک دارای کمترین مقدار خطا (RMSE و MAE) و بالاترین ضریب تبیین هستند. نتایج هم‌چنین نشان داد که کمترین و بیشترین مقادیر خطای محاسبه شده در برآورد  $ET_0$  به ترتیب مربوط به دو فصل پاییز و بهار است.

- ارزیابی آماره خطای محاسبه شده در فصل زمستان نشان داد



تبخیر فائو در حوضه آبریز شرق و جنوب شرق کشور"،  
*فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۸(۲۸)، ۱-۱۶.  
 صمدی، ح.، و مجدزاده، ب.، (۱۳۸۳)، "مقایسه تبخیر و تعرق  
 محاسبه شده با فرمول‌های تجربی و لایسیمتر در منطقه  
 کرمان"، *مجموعه مقالات هشتمین سمینار سراسری آبیاری  
 و کاهش تبخیر*، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ۱۹-۲۲.  
 مرشدی، م.، نادری، م.، طباطبایی، ح.، و محمدی، ج.، (۱۳۹۶)،  
 "برآورد تبخیر و تعرق واقعی در مقیاس منطقه‌ای به کمک  
 داده‌های سنجش از دور در دشت شهرکرد (ب) مقایسه نتایج  
 مدل‌های SEBAL و METRIC نسبت به برخی مدل‌های  
 ریاضی تبخیر و تعرق"، *نشریه علوم آب و خاک*، ۲۱(۳)، ۱-۱۳.

Alexandris, S., Kerkides, P., and Liakatas, A., (2006),  
 "Daily reference evapotranspiration estimates by the  
 Copais approach", *Agricultural Water Management*,  
 82(3), 371-386.  
 Antonopoulos V.Z., and Antonopoulos, A.V., (2017),  
 "Daily reference evapotranspiration estimates by  
 artificial neural networks technique and empirical  
 equations using limited input climate variables",  
*Journal of Computer and Electronics in Agriculture*,  
 132, 86-96.  
 Djaman K., Balde A.B., Sow, A., Muller, B., Irmak, S.N.,  
 Diayea, M.K., Manneh, B., Moukoubi, Y.D.,  
 Futakuchi, K., and Saito, K., (2015), "Evaluation of  
 sixteen reference evapotranspiration methods under  
 sahelian conditions in the Senegal River Valley",  
*Journal of Hydrology: Regional Study*, 3, 139-159.  
 Feng, Y., Cui, N., Zhao, L., Gong, D., and Zhang, K.,  
 (2017), "Spatiotemporal variation of reference  
 evapotranspiration during 1954-2013 in Southwest  
 China", *Quaternary International*, 441, 129-139.  
 Fooladmand, H.R., Zandilak, H., and Ravanan, M.H.,  
 (2008), "Comparison of different types of Hargreaves  
 equation for estimating monthly evapotranspiration in  
 the south of Iran", *Archives of Agronomy and Soil  
 Science*, 54(3), 321-330.  
 George, B.A., and Raghuvanshi, N.S., (2012), "Inter-  
 comparison of reference evapotranspiration estimated  
 using six methods with data from four climatological  
 stations in India", *Journal of Indian Water Resource  
 Society*, 32(34), 15-22.  
 Gundekar, H.G., (2004), "Evapotranspiration estimation  
 methods and development of crop coefficients for  
 some crops in semi-arid region", An Unpublished  
 M.Tech Dissertation Submitted to Marathwada  
 Agricultural university Parbhani, Maharashtra, India.  
 Hargreaves, G.H., and Allen, R.G., (2003), "History and  
 evaluation of Hargreaves evapotranspiration  
 equation", *Journal of Irrigation Drainage  
 Engineering*, 129(1), 53-63.  
 Hargreaves, G.H. and Samani, Z.A., (1985), "Reference  
 crop evapotranspiration from temperature", *Applied  
 Engineering Agriculture*, 1(2), 96-99.  
 Irmak, S., Irmak, A., Allen, R.G., and Jones, J.W., (2003),  
 "Solar and net radiation-based equations to estimate  
 reference evapotranspiration in humid climates",  
*Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 129(5),  
 336-347.

معتدل سرد در مقایسه با معادله پنمن-مانتیث بهینه شدند.  
 نتایج نشان داد که معادله توانی با  $MAE=0/079$  و  
 $RMSE=0/08$  عملکرد بهتری در مقایسه با معادله خطی  
 دارد.

- براساس رگرسیون خطی چند متغیره، دو معادله با متغیرهای  
 شامل  $T_{max}$  و  $T_{min}$  و  $R_n$  به منظور تخمین ساده‌تر تبخیر و  
 تعرق در اقلیم‌های نیمه مرطوب معتدل سرد ایجاد شد. نتایج  
 به‌دست آمده نشان داد که این دو معادله، به‌ویژه معادله (۳۴)  
 دقت قابل‌قبول‌تری در مقایسه با دیگر معادلات بهینه شده  
 دارد.
- نرخ افزایش تبخیر و تعرق در طی بازه زمانی ۲۲ سال در  
 حدود ۲/۵ میلی‌متر بر روز و نرخ افزایش درجه حرارت در این  
 مدت حدود ۵ °C بود که خود می‌تواند دلیلی بر افزایش نرخ  
 تبخیر و تعرق در طی این بازه زمانی باشد.

## ۵- پی‌نوشت‌ها

- 1- Turc
- 2- Mann-Kendall
- 3- Morlet Wavelet Analysis
- 4- Thornthwaite
- 5- Blanicridel
- 6- Hargreaves and Samani
- 7- Schendel
- 8- Hargreaves-M4
- 9- FAO24-Blaney-Criddle
- 10- Trajkovic
- 11- Ravazani
- 12- Penman
- 13- Mahringer
- 14- Brockamp and Wenner
- 15- Meyer
- 16- Rohwer
- 17- Dalton
- 18- FAO 24
- 19- Valiantzas 1,2
- 20- Modified Turc
- 21- Priestley-Taylor
- 22- Makkink
- 23- IRMAK 1,2,3
- 24- Romanenko

## ۶- مراجع

پریسای، ز.، عبدالهی، خ.، و طهماسبی، ط.، (۱۳۹۶)، "ارزیابی  
 معادله‌های مختلف تجربی برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع  
 در شرایط وجود و عدم وجود برخی پارامترهای هواشناسی"،  
 دومین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد، ایران، ۱-  
 ۱۱.  
 جواد، خ.، زارع ایبانه، ح.، و جوشنی، ع.، (۱۳۹۴)، "ارزیابی  
 روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع با روش تشت

- Jensen, D.T., Hargreaves, G.H., Temesgen, B., and Allen, R.G., (1997), "Computation of  $ET_0$  under nonideal conditions", *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 123(5), 394-400.
- Kaya, S., and Salih, E., (2012), "Evaluation of pan coefficient for reference crop evapotranspiration for Iğdir region of Turkey", *Journal of Food Agriculture Environment*, 10(3), 987-991.
- Kisi, O., and Shiri, J., (2014), "Prediction of long-term monthly air temperature using geographical inputs", *International Journal of Climatology*, 34 (1), 179-186.
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., and López, J.J., (2008), "Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque country (Northern Spain)", *Agricultural Water Management*, 95(5), 553-565.
- Nandagiri, L., and Kovoov, G.M., (2006), "Performance evaluation of reference evapotranspiration equations across a range of Indian climates", *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 132(3), 238-249.
- Naseri, A.A., Mohseni Movehed, S.A., Kashkooli, H.A., Ehsani, M., and Zare Abyaneh, H., (2000), "Assessment of experimental methods for estimating potential evapotranspiration in Hamadan region", *Journal of Agriculture Research*, 1, 24-39.
- Sharifian, H., and Ghahreman, B., (2006), "Evaluation and comparison of estimated reference evapotranspiration from evaporation pan with  $ET_0$  standard method in Gorgan", *Journal of Agriculture Science National Resources*, 13(5), 18-28.
- Vicente-Serrano, S.M., Azorin-Molina, C., Sanchez-Lorenzo, A., Revuelto, J., López-Moreno, J.I., González-Hidalgo, J.C., Tejada, E.M., and Espejo, F., (2014), "Reference evapotranspiration variability and trends in Spain, 1961–2011", *Global Planet Change*, 121, 26-40.
- Xing, Z., Chow, L., Meng, F., Rees, H.W., Monteith J., and Lionel, S., (2008), "Testing reference evapotranspiration estimation methods using evaporation pan and modeling in maritime region of Canada", *Journal of Irrigation Drainage Engineering*, 134(4), 417-424.
- Yihdego, Y., and Webb, J.A., (2018), "Comparison of evaporation rate on open water bodies: Energy balance estimate versus measured pan", *Journal of Water and Climate Change*, 9(1), 101-111.
- Yoder, R.E., Odhiambo, L.O., and Wright, W.C., (2005), "Evaluation of methods for estimating daily reference crop evapotranspiration at a site in the humid southeast United States", *Applied Engineering Agriculture*, 21(2), 197-202.
- Zhendong, G., Junshi, H., Kebao, D., and Xiang, L., (2017), "Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China", *Journal of Agriculture for Meteorology*, 232, 106-117.