



## "مقاله پژوهشی"

# ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع در مقیاس سالانه در شمال شرق ایران

رهرا شیرمحمدی علی‌اکبرخانی<sup>۱</sup>، سید فرهاد صابرعلی<sup>۲</sup> و منصوره کوهی<sup>۳</sup>

(mshirmohamady@yahoo.com)

- استادیار گروه علوم و مهندسی باگیانی، مجتمع آموزش عالی تربیت‌جام، خراسان رضوی، ایران

- استادیار گروه پژوهشی مخاطرات و تغیر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی

تاریخ ارسال: ۹۸/۰۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۱/۰۶

صفحه: ۱۹۹ تا ۲۰۹

### چکیده

یکی از اساسی‌ترین فرایندهای متأثر از شرایط آب و هوایی و اقلیم در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی که عامل اصلی کنترل‌کننده فعالیت‌های کشاورزی است، تبخیر و تعرق می‌باشد. ارزیابی دقیق تبخیر و تعرق در مدیریت آبیاری و منابع آب، مدل‌سازی اکوسیستم و ارزیابی‌های زیست‌محیطی و انرژی خورشیدی ضروری می‌باشد. به‌دلیل دشواری اندازه‌گیری تبخیر و تعرق واقعی به‌وسیله لایسیمتر و معادله بیلان آب در مزرعه، به‌طور معمول برای محاسبه آن از تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل مورد استفاده قرار گرفته‌اند اما انتخاب روش مطلوب نظر به داده‌های در دسترس در مناطق مورد نظر دشوار می‌باشد. در این مطالعه به‌منظور تعیین بهترین روش محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل در استان خراسان رضوی سه روش محاسباتی بر مبنای درجه حرارت: روش‌های هارگریوز-سامانی، هامون و لیناکر و پنج روش محاسباتی بر مبنای تابش، روش‌های جنسن-هیز، مک‌گونین-بورنه و آبتویو، پریستلی-تیلور با روش تبخیر و تعرق پنمن مانتیث فائق در مقیاس سالانه در طول دوره آماری ۱۱ سال و بالاترین دوره آماری ۷۷ سال در سیزده استان هواشناسی در شمال شرق ایران با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، بایاس نسبی، بایاس نسبی، ریشه میانگین مربعات خطای نرم‌النیزه و خطای نسبی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. نتایج آنالیز آماری نشان داد که کارایی روش‌های مختلف تخمین تبخیر و تعرق در مناطق مختلف متفاوت است. در بین روش‌های مورد مطالعه روش لیناکر تبخیر و تعرق را بیش برآورد و بقیه روش‌ها تبخیر و تعرق را در این مناطق کم برآورد می‌نمایند. در شهرستان درگز و گلستان روش هارگریوز سامانی عملکردی مشابه روش فائق پنمن مانتیث نشان داد که کارایی همچنین در مشهد. گتاباد، روش هامون، در نیشابور روش آبتویو کارایی بهتری داشت؛ اما در شهرستان‌های فریمان، کاشمر، سرخس، سبزوار و قوچان کلیه روش‌ها در مقایسه با روش فائق پنمن مانتیث عملکرد ضعیفی داشته به‌همین دلیل در این مناطق روش قابل قبول برای محاسبه تبخیر و تعرق روش فائق پنمن مانتیث در مقیاس سالانه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تابش، تبخیر و تعرق پتانسیل، درجه حرارت، شمال شرق ایران، فائق پنمن مانتیث

(۱۱،۱۴،۲۵،۳۰،۳۱)؛ اما محدودیت اصلی این روش دشواری و عدم دسترسی به تمام داده‌های هواشناسی مورد نیاز (حدود ۱۰ متری) و همچنین نیاز به محاسبات پیچیده ریاضی (تقرباً ۱۶ زیرمجموعه ریاضی) می‌باشد (۲۷). لذا، توسعه معادلات تحریبی ساده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از این روش به عنوان روش استاندارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه روش‌های بسیاری در دهه‌های گذشته به‌منظور تخمین تبخیر و تعرق بر اساس معادلات تحریبی و یا معیارهای فیزیکی توسعه یافته‌اند. با این حال، بسیاری از این روش‌ها برای استفاده در هر منطقه قابل اعتماد نبوده و نیاز به آنالیزهای محلی و اعتبارسنجی این روش‌ها خواهد بود. در ایران تحقیق‌های متعدد پیرامون مقایسه و محاسبه مقادیر تبخیر و تعرق انجام گرفته است که از این میان می‌توان به تحقیقات موسوی بایگی و همکاران (۲۲) در مشهد، میر موسوی و همکاران (۲۰) در کرمانشاه، سلطانی و همکاران (۲۸) در اقلیم‌های مختلف در ایران، مدیری (۲۱) استان تهران، امیری و پور قاسمی در حوزه آبخیز مهارلوی استان فارس (۷) اشاره نمود. نوری و همکاران (۲۳) در

### مقدمه

آگاهی از تغییرات تبخیر و تعرق در مقیاس مکانی و زمانی مختلف برای شناسایی اقلیم منطقه، مدیریت منابع آب، مدل‌سازی هواشناسی و هیدرولوژی، مدل‌سازی اکوسیستم و ارزیابی‌های زیست‌محیطی ضروری می‌باشد (۲۹،۸،۳). تاکنون روش‌هایی متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند، اما با توجه به دسترسی داده‌های مشاهده شده، انتخاب یک روش مناسب دشوار است. از میان روش‌های متعدد محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش فائق پنمن مانتیث توصیه شده توسط فائق پنمن و سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و سازمان جهانی هواشناسی (WMO) به دلیل عملکرد قابل قبول در شرایط مختلف آب و هوایی در بسیاری از مناطق جهان و دقت قابل قبول با نتایج لایسیمتر (۴) بر اساس معیارهای فیزیولوژیکی و آئرودینامیکی بدون نیاز به اصلاح پارامترها برای تخمین و واسنجی، به عنوان یک روش استاندارد توصیه می‌شود (۱۰،۹،۶،۵،۲۶). تحقیقات متعددی در مناطق مختلف جهان نیز نشان داده‌اند که روش پنمن مانتیث فائق تبخیر و تعرق را با نتایج قابل قبولی برآورد می‌کند

است. متوسط سالانه بارندگی در این استان ۲۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در شکل ۱ آورده شده است. این پژوهش با استفاده از داده‌های هواشناسی روزانه در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک این استان شامل فریمان، گلمکان، نیشابور، سرخس، تربت‌حیدریه، تربت‌جام، قوچان، مشهد، سبزوار، کاشمر، گناباد، در طول دوره آماری مختلف انجام شده است. در میان ایستگاه‌ها مشهد با ۶۹ سال آمار بالاترین دوره آماری و درگز با ۱۲ سال آمار کمترین دوره آماری را داشتند.

اطلاعات جغرافیایی و طول دوره آماری ایستگاه‌های مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

داده‌های دریافتی از ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه شامل حداقل و حداکثر درجه حرارت، حداقل و حداکثر رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعت‌آفتابی که به صورت روزانه می‌باشد. سپس با استفاده از روش‌های ارائه شده در این بخش تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش‌های مختلف به صورت روزانه محاسبه و سپس تبدیل به میانگین سالانه گردید.

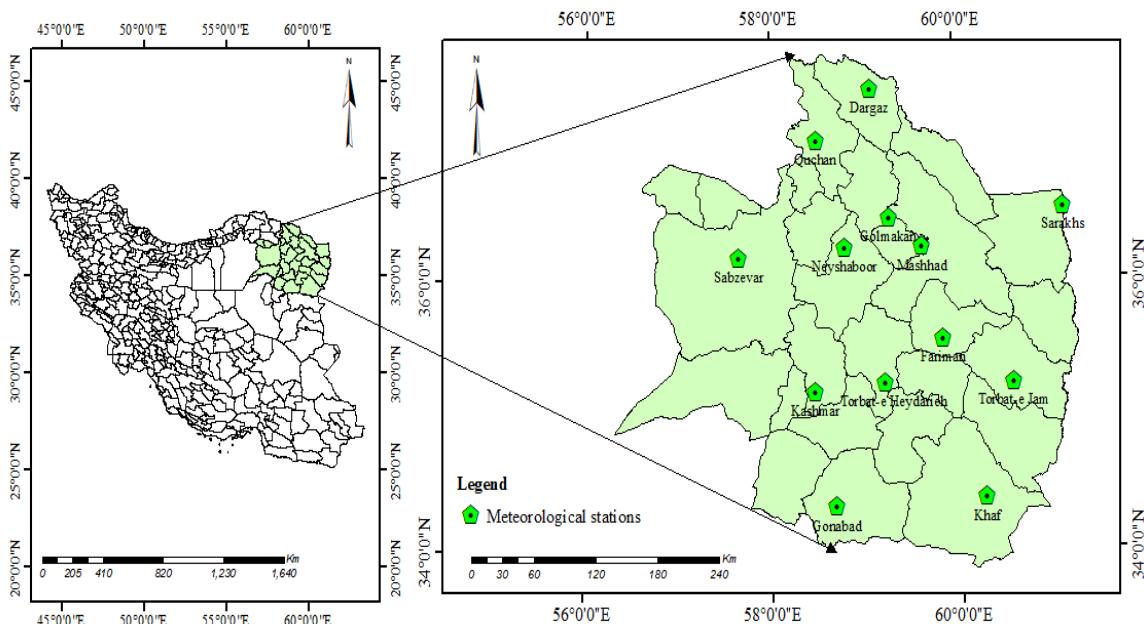
**روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع**  
تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع به صورت تبخیر و تعرق یک سطح فرضی پوشیده از چمن با ارتفاع یکنواخت ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب بازتاب ۰/۲۳ با رشد فعال که به خوبی آبیاری شده و سطح سایه‌انداز کاملی بر روی زمین دارد، تعریف شده است<sup>(۴)</sup>.

رسنجان، با ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع شامل روش‌های پمن اصلاح شده به‌وسیله فائق، روش تشبع، روش هارگریوز سامانی، پمن مانتیث فائق، بلانی کریدل و کیمبلی پمن نشان دادند که در این منطقه روش مطلوب روش پمن مانتیث فائق می‌باشد.

این مطالعه در استان خراسان رضوی که بر اساس پهنه‌بندی اقلیمی ترنت وایت در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد انجام می‌گیرد. مطالعات انجام شده در رابطه با ارزیابی عملکرد معادلات مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از روش استاندارد فائق-پمن مانتیث توسط شاخص‌های تحلیل آماری در این منطقه در منابع نادر است. در تحقیق حاضر عملکرد هشت روش ساده محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل را با روش فائق-پمن مانتیث، مورد مقایسه قرار گرفته است. همچنین برای تعیین بهترین روش از شاخص‌های آماری استفاده شد. با توجه به اهمیت زیاد تبخیر و تعرق پتانسیل در پایش خشک‌سالی و فراوان بودن خشک‌سالی‌های ناشی از تغییرات آب و هوایی در این استان، برآورد دقیق تبخیر و تعرق پتانسیل برای پیش‌بینی‌های خشک‌سالی در استان خراسان رضوی سودمند خواهد بود.

## مواد و روش‌ها

استان خراسان رضوی در شمالی شرقی ایران و در طول جغرافیایی  $56^{\circ} - 62^{\circ}$  شرقی و در عرض جغرافیایی  $33^{\circ} - 38^{\circ}$  شمالی با مساحت ۱۱۷۲۰ کیلومتر مربع گسترش یافته



شکل ۱- نقشه توزیع مکانی ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه  
Figure 1. Layout of the Study area with the spatial distribution of meteorological stations

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و تعداد سال‌های آماری مورد استفاده در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه  
Table 1. Specifications and number of years used in synoptic stations

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	سال‌های آماری
تربیت‌جام	۶۰° ۳۵'	۲۵° ۱۶'	۹۵۰/۴	۱۳۷۱-۱۳۹۷
تریت‌جیدریه	۵۹° ۱۳'	۳۵° ۲۰'	۱۴۵۱	۱۳۳۷-۱۳۷
خواف	۶۰° ۹'	۳۳° ۳۵'	۹۹۸	۱۳۸۵-۱۳۹۷
درگز	۵۹° ۴'	۳۷° ۲۸'	۵۱۶	۱۳۸۶-۱۳۹۷
سبزوار	۵۷° ۳۹'	۳۶° ۱۲'	۹۶۲	۱۳۳۳-۱۳۹۷
سرخس	۶۱° ۱۰'	۳۶° ۳۲'	۲۳۵	۱۳۶۳-۱۳۹۷
فریمان	۵۹° ۵۰'	۳۵° ۳۵'	۱۴۶۰	۱۳۸۵-۱۳۹۷
قوچان	۵۸° ۳۰'	۳۷° ۴'	۱۲۷۸	۱۳۶۲-۱۳۹۷
کاشمر	۵۸° ۲۸'	۳۵° ۱۶'	۱۱۰	۱۳۶۵-۱۳۹۷
گلستان	۵۹° ۱۷'	۳۶° ۲۹'	۱۱۷۶	۱۳۶۵-۱۳۹۷
گناباد	۵۸° ۴۱'	۳۴° ۲۱'	۱۰۵۶	۱۳۶۵-۱۳۹۷
مشهد	۵۹° ۳۸'	۳۶° ۱۴'	۹۹۹/۲	۱۳۲۹-۱۳۹۷
نیشابور	۵۸° ۴۸'	۳۶° ۱۶'	۱۲۱۳	۱۳۶۹-۱۳۹۷

### روش هامون<sup>۳</sup>

هامون (۱۲) معادله‌ای را برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه کرد:

$$ET_{HAM}=k \cdot 0.165 \cdot 216.7 \cdot N \cdot \left( \frac{e_s}{T+273.3} \right) \quad (3)$$

که در آن  $ET_{HAM}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش هامون بر حسب میلی‌متر در روز،  $N$  حداکثر ساعت‌آفتابی روزانه به صورت ضریبی بر ۱۲ ساعت که از روش آن و همکاران بدست می‌آید،  $e_s$  فشار بخار اشباع هوا بر حسب میلی‌بار،  $T$  متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متري بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $k$  ضریب تناسب مساوی ۱/۲ می‌باشد.

### روش لیناکر<sup>۴</sup>

ليناکر (۱۷) معادله‌ای بر اساس دمای هوا و نقطه شبنم برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه داد.

$$ET_{LIN}=\frac{\frac{500 \times (T+0.006 \times A)}{100-\varphi} + 15 \times (T-T_d)}{80-T} \quad (4)$$

که در آن  $ET_{LIN}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش لیناکر بر حسب میلی‌متر در روز،  $A$  ارتفاع ایستگاه بر حسب مترا،  $\varphi$  عرض جغرافیایی ایستگاه بر حسب درجه،  $T$  متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متري بر حسب درجه سانتی‌گراد و  $T_d$  دمای نقطه شبنم بر حسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

### روش پریستلی-تیلور<sup>۵</sup>

پریستلی و تیلور (۲۴) معادله‌ای را برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه کردند:

$$ET_{PT}=\alpha \times \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \times \frac{(R_n+G)}{\lambda} \quad (5)$$

که در آن  $ET_{PT}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش پریستلی-تیلور بر حسب میلی‌متر در روز،  $\alpha$  ضریب واسنجی برابر با ۱/۲۶ می‌باشد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد.

### روش تبخیر و تعرق پمن مانثیت فائو<sup>۶</sup>

این روش معادله‌ای برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه می‌دهد (۴).

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

که در آن  $ET_{PM}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش فائو پمن مانثیت بر حسب میلی‌متر در روز،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد،  $R_n$  تابش خالص ورودی به سطح گیاه بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز،  $G$  شار گرمایی هاک بر حسب دو متری بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $T$  میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $u_2$  سرعت باد در ارتفاع اشباع و واقعی هوا بر حسب کیلو پاسکال،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

### روش هارگریوز-سامانی<sup>۷</sup>

هارگریوز و سامانی معادلات متعددی برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه نمودند (۱۳). یکی از این معادلات که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است به صورت زیر می‌باشد:

$$ET_{HS}=0.0023 (T_{max}-T_{min})^{0.5} (T+17.8) \frac{R_a}{\lambda} \quad (2)$$

که در آن  $ET_{HS}$ : تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش هارگریوز-سامانی بر حسب میلی‌متر در روز  $R_a$  تابش فرازمنی بر حسب مگاژول بر مترمربع بر روز که از روش آن و همکاران به دست می‌آید.  $T_{max}$  و  $T_{min}$  به ترتیب حداقل و حداقل درجه حرارت بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $T$  متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متري بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگاژول بر کیلوگرم می‌باشد.

$$ET_{JH} = \frac{0.025(T+3)R_s}{\lambda} \quad (8)$$

که در آن  $JH$  ET تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش جنسن هیز بر حسب میلی‌متر در روز،  $R_s$  تابش خورشیدی بر حسب مگا ژول بر مترمربع بر روز،  $T$  متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگا ژول بر کیلوگرم می‌باشد.

**روش مک گوئینز - بورنه<sup>۳</sup>**  
مک گوئینز و بورنه<sup>(۹)</sup> معادله‌ای را برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به صورت زیر ارائه کردند:

$$ET_{MB} = \frac{(T+5) R_s}{68 \lambda} \quad (9)$$

که در آن  $ET_{MB}$  ET تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش مک گوئینز و بورنه بر حسب میلی‌متر در روز،  $R_s$  تابش خورشیدی بر حسب مگا ژول بر مترمربع بر روز،  $T$  متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری بر حسب درجه سانتی‌گراد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگا ژول بر کیلوگرم می‌باشد.

**آنالیزهای آماری**  
برای ارزیابی و انتخاب بهترین روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی (CC)، بایاس نسی (RBIAS)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) و خطای نسبی (RE) استفاده گردید جدول (۲). بهترین تطابق آماری بین مقادیر مدل و مقادیر مشاهداتی زمانی می‌باشد که قدر مطلق خطای نسی و ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده بین صفر تا ۰/۰ بوده و ضریب همبستگی بین ۰/۸ و ۱ قرار گیرد (۱۶). برای محاسبه مقادیر این پارامترها از نرم‌افزار متلب نسخه R2013a استفاده گردید.

### روش ماکینک<sup>۴</sup>

برای تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلی‌متر در روز ماکینک در سال ۱۹۵۷ معادله زیر را پیشنهاد نمود (۱۸).

$$ET_{MAK} = 0.7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_s}{\lambda} \quad (6)$$

که در آن  $ET_{MAK}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش ماکینک بر حسب میلی‌متر در روز،  $R_s$  تابش خورشیدی بر حسب مگا ژول بر مترمربع بر روز،  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار آب نسبت به دما بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری بر حسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگا ژول بر کیلوگرم می‌باشد.

### روش آبتویو

این روش با استفاده از تابش خورشیدی معادله‌ای برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه می‌دهد (۱).

$$ET_{ABT} = k \times \frac{R_s}{\lambda} \quad (7)$$

که در آن  $ET_{ABT}$  تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش آبتویو بر حسب میلی‌متر در روز،  $R_s$  تابش خورشیدی بر حسب مگا ژول بر مترمربع بر روز،  $\lambda$  گرمای نهان تبخیر بر حسب مگا ژول بر کیلوگرم و ضریب  $k$  ضریب بدون بعد مساوی ۰/۵۳ می‌باشد.

### روش جنسن هیز<sup>۲</sup>

این روش با استفاده از تابش خورشیدی و درجه حرارت معادله‌ای برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه می‌دهد (۱۵).

جدول ۲- شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش بهمنظور ارزیابی روش‌های مختلف تبخیر و تعرق  
Table 2. The Statistical indicators used in this research to assess the different methods of evapotranspiration

شاخص‌های آماری	معادله	مقادیر مطلوب
ضریب همبستگی (CC)	$CC = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(r_n - \bar{r})}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})^2} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_n - \bar{r})^2}}$	۱
بایاس نسبی (RBIAS)	$RBIAS = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - r_n)}{\sum_{n=1}^N r_n} \times 100\%$	.
ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)	$NRMSE = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - r_n)^2}{\bar{r}}}$	.
خطای نسبی (RE)	$RE = \frac{\sum_{n=1}^N (f_n - r_n)}{\sum_{n=1}^N r_n}$	.

که در آن  $n$ : تعداد داده‌ها، مقادیر  $r_n$  مقدار تبخیر و تعرق به روش استاندارد پنمن مانیث فاؤ و  $f_n$ : مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق با استفاده از سایر روش‌های تبخیر و تعرق،  $\bar{f}$ : میانگین مقادیر تبخیر و تعرق در این استان در  $n$ : تعداد داده‌ها

به دست آمد و پایین‌ترین میزان تبخیر و تعرق در این استان در شهرستان قوچان و بهمیزان ۱۳۴۱/۳ میلی‌متر در سال به دست آمد.

نتایج آنالیز آماری مقایسه تبخیر و تعرق در مقیاس سالانه بهروش پنمن مانیث فاؤ با سایر روش‌ها در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در ۴ جدول جداول (۷-۱۴) جداول (۷-۱۴)

### نتایج و بحث

مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق به روش فاؤ پنمن مانیث در مقیاس سالانه در مناطق مورد مطالعه به شرح جدول ۳ می‌باشد. بالاترین میزان تبخیر و تعرق سالانه در این استان در شهرستان خوف بهمیزان ۲۵۴۶/۵ میلی‌متر در سال

شهرستان‌های سرخس، کاشمر و گناباد علاوه‌بر روش لیناکر روش جنسن هیز نیز مقدار تبخیر و تعرق را بیشتر برآورد می‌نماید. در شهرستان نیشابور علاوه بر دو روش ذکر شده روش آبتهیو و هارگریوز سامانی نیز تبخیر و تعرق را بیشتر برآورد می‌نمایند.

آورده شده است. در جدول ۴ مقادیر بایاس نسبی (RBIAS) در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه نشان داده شده است. همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌گردد با توجه به شاخص آماری بایاس نسبی به دست آمده، در بیشتر مناطق مورد مطالعه تبخیر و تعرق محاسبه شده در کلیه روش‌ها به جز روش لیناکر مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را کم برآورد می‌نماید. اما در

جدول ۳- مقادیر محاسبه شده تبخیر و تعرق به روش فاؤ پنمن مانتبث در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های خراسان رضوی

Table 3. Annual ET estimated by FAO-PM method in Khorasan Razavi stations

ایستگاه	متوسط مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل سالانه با استفاده از روش فاؤ پنمن مانتبث در طول دوره آماری (میلی‌متر)
تریت‌جام	۲۱۰۵/۱
تریت‌جدریه	۱۴۶۱/۳
خواف	۲۵۴۶/۵
درگز	۱۴۵۷/۴
سیزوار	۱۷۷۷/۱
سرخس	۱۶۶۱/۷
فریمان	۱۷۰۵/۴
قوچان	۱۳۴۱/۳
کاشمر	۱۵۲۶/۹
گلمکان	۱۴۵۳/۷
گناباد	۱۷۰۲/۴
مشهد	۱۴۳۰/۲
نیشابور	۱۳۴۴/۸

جدول ۴- مقادیر بایاس نسبی سالانه در ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 4. Annual relative bias values (RBIAS) at the synoptic stations

ایستگاه	ET <sub>MB</sub>	ET <sub>JH</sub>	ET <sub>ABT</sub>	ET <sub>MAK</sub>	ET <sub>LIN</sub>	ET <sub>PT</sub>	ET <sub>HAM</sub>	ET <sub>HS</sub>
تریت‌جام	-۵۳/۱۰	-۲۶/۵۱	-۳۱/۵۸	-۳۷/۶۶	۱۶/۷۰	-۴۶/۳۲	-۳۸/۵۱	-۳۳/۴۴
تریت‌جدریه	-۴۶/۱۶	-۱۶/۳۴	-۱۵/۵۵	-۲۳/۹۷	۵۶/۶۳	-۳۰/۷۷	-۲۰/۰۱	-۹/۳۰
خواف	-۶۵/۸۸	-۴۶/۱۱	-۵۶/۲۰	-۵۸/۰۸	۱۶/۷۴	-۶۱/۷۲	-۴۲/۲۲	-۴۳/۶۶
درگز	-۴۶/۱۹	-۱۵/۱۵	-۲۹/۱۴	-۳۴/۱۱	۷۷/۱۳	-۳۷/۶۳	-۷/۱۱	-۳۹/۹۹
سیزوار	-۵۱/۵۱	-۲۳/۸۳	-۳۳/۴۵	-۳۷/۹۶	۳۶/۵۹	-۴۱/۶۰	-۲۰/۲۴	-۱۹/۵۴
سرخس	-۳۵/۶۴	۱/۶۰	-۱۶/۹۲	-۲۲/۴۳	۵۲/۴۰	-۳۳/۳۵	-۱۰/۱۳	-۸/۸۷
فریمان	-۶۱/۹۷	-۴۰/۹۳	-۳۹/۶۳	-۴۵/۸۵	۲۸/۳۱	-۴۸/۱۹	-۴۱/۳۲	-۲۲/۶۶
قوچان	-۴۱/۴۴	-۹/۴۱	-۱/۴۲	-۱۳/۸۵	۴۰/۹۸	-۲۲/۷۳	-۲۰/۲۱	-۶/۲۳
کاشمر	-۲۹/۷۱	۱۰/۶۳	-۵/۹۰	-۱۰/۹۷	۹۳/۷۴	-۲۵/۴۶	-۶/۶۵	-۷/۵۶
گلمکان	-۴۶/۸۳	-۱۷/۰۷	-۲۰/۲۵	-۲۷/۶۷	۶۱/۵۰	-۳۴/۵۵	-۲۵/۹۷	-۸/۴۲
گناباد	-۳۶/۲۹	۰/۲۹	-۱۴/۶۷	-۱۹/۴۵	۷۳/۰۶	-۳۳/۳۴	-۱۷/۷۸	-۱۲/۶۵
مشهد	-۴۲/۹۰	-۱۱/۱۹	-۱۱/۲۳	-۲۱/۰۴	۴۷/۸۱	-۲۸/۵۸	-۱۷/۶۷	-۹/۵۳
نیشابور	-۳۳/۲۴	۳/۸۵	۳/۰۱	-۷/۴۱	۷۰/۷۶	-۱۹/۹۵	-۱۰/۲۳	۶/۷۷

ضریب همبستگی نسبت به سایر روش‌ها و مقدار ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۸ بودند. در شهرستان‌های سیزوار و سرخس در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۰ به دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۸ به دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این دو شهرستان نسبت به سایر روش‌ها درروش هامون به ترتیب با مقادیر ۰/۰۶۰ و ۰/۰۶۰ به دست آمدند. در شهرستان‌های فریمان و قوچان در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۰ به دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این دو شهرستان نسبت به سایر روش‌ها درروش هامون به ترتیب با مقادیر ۰/۰۷۷ و ۰/۰۷۸ به دست آمدند. در شهرستان کاشمر در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب

مقادیر ضریب همبستگی در روش‌های مختلف با روش فاؤ پنمن مانتبث در جدول ۵ آورده شده است. در شهرستان تربیت‌جام در تمامی روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق مقدار این ضریب بالای ۰/۰ هست. در شهرستان تربیت‌جدریه پنج روش پرسنلی تیلور، ماکینک، آبتهیو، مک گوئینز و بورنه و جنسن هیز، ضرایب همبستگی نزدیک به هم بالاتر از ۰/۰/۸ داشتند و بقیه روش‌ها ضریب همبستگی پایینی را نشان دادند. در شهرستان خوف چهار روش هارگریوز سامانی، هامون، لیناکر و پرسنلی تیلور به ترتیب دارای بالاترین ضریب همبستگی نسبت به سایر روش‌ها و مقدار ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۰/۸۷ بودند. در شهرستان درگز چهار روش هارگریوز سامانی، لیناکر، هامون و پرسنلی تیلور به ترتیب دارای بالاترین

به دست نیامد. در شهرستان مشهد بالاترین میزان همبستگی در روش هامون (۰/۸۶) و لیناکر (۰/۸۲) مشاهده گردید و در بقیه روش‌ها ضریب همبستگی پایین‌تر از ۰/۸ به دست آمد. در شهرستان نیشابور در تمامی روش‌های محاسباتی به جز روش لیناکر ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸، پرستلی تیلور (۰/۸۵)، جنسن هیز (۰/۸۴)، مک‌گوئینز و بورنه (۰/۸۴) به دست آمد.

بالای ۰/۸ به دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این شهرستان نسبت به سایر روش‌ها در روش هامون و مقدار ۰/۹۰ به دست آمد. در شهرستان گلمکان در تمامی روش‌های محاسباتی به جز ماکینک و آبتویو ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸ به دست آمد. بالاترین ضریب همبستگی در روش‌های هامون (۰/۸۷) و هارگریوز سامانی (۰/۸۶) به دست آمد. در شهرستان گناباد در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی به جز روش هامون ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۸

جدول ۵- مقادیر ضریب همبستگی در ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 5. Annual correlation coefficient values (CC) at the synoptic stations

ایستگاه	تریت‌جام	تریت‌حیدریه	خواف	درگز	سیزوار	سرخس	فریمان	قوچان	کاشمر	گلمکان	گناباد	مشهد	نیشابور
ET <sub>MB</sub>	ET <sub>JH</sub>	ET <sub>ABT</sub>	ET <sub>MAK</sub>	ET <sub>LIN</sub>	ET <sub>PT</sub>	ET <sub>HAM</sub>	ET <sub>HS</sub>						
۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۷	۰/۹۴						
۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۸۰	۰/۸۱	۰/۵۳	۰/۸۰	۰/۵۷	۰/۳۴						
۰/۷۵	۰/۷۵	۰/۷۴	۰/۷۵	۰/۹۴	۰/۸۷	۰/۹۶	۰/۹۷						
۰/۷۸	۰/۷۸	۰/۷۷	۰/۷۸	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۹۲	۰/۹۴						
۰/۵۹	۰/۵۹	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۶۰	۰/۶۴	۰/۵۶						
۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۳۶	۰/۳۳	۰/۱۲	۰/۶۰	۰/۴۷						
۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۹	۰/۰۵	۰/۶۱	۰/۵۲	۰/۷۷						
۰/۶۶	۰/۶۵	۰/۷۰	۰/۶۹	۰/۲۰	۰/۵۷	۰/۶۷	۰/۷۸						
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۱۹	-۰/۲۲	۰/۳۹	۰/۱۲						
۰/۸۱	۰/۸۲	۰/۷۸	۰/۷۹	۰/۸۳	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۶						
۰/۷۱	۰/۷۰	۰/۷۷	۰/۷۵	۰/۴۵	۰/۶۹	۰/۸۳	۰/۷۴						
۰/۷۹	۰/۷۹	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۸۲	۰/۷۷	۰/۸۶	۰/۷۶						
۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۸۳	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۸۵	۰/۸۲	۰/۸۰						

پرستلی تیلور، لیناکر و مک‌گوئینز و بورنه، در شهرستان گلمکان در روش هارگریوز سامانی، در شهرستان گناباد در روش‌های جنسن هیز، آبتویو و هارگریوز سامانی، در شهرستان مشهد در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و آبتویو به دست آمد. در بقیه شهرستان‌ها مقدار این شاخص بالاتر از ۰/۲ به دست آمد به طوری که در شهرستان خوف کمترین مقدار این شاخص در روش لیناکر، در شهرستان تربیت‌حیدریه در روش آبتویو، در شهرستان سیزوار در روش‌های هارگریوز سامانی و هامون، در شهرستان سرخس در روش‌های جنسن هیز، هارگریوز سامانی، هامون و آبتویو، در شهرستان قوچان در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتویو و جنسن هیز، در شهرستان‌های کاشمر و نیشابور در تمامی روش‌ها به جز

مقادیر ضریب ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در مناطق مورد مطالعه در جدول ۶ آورده شده است. مقادیر مطلوب این ضریب زمانی است که این ضریب بین صفر تا ۰/۲ قرار گیرد. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌گردد در شهرستان تربیت‌جام، مطلوب‌ترین مقدار این شاخص در روش لیناکر، در شهرستان درگز در روش‌های هارگریوز سامانی و هامون، در شهرستان سرخس در روش‌های جنسن هیز، هارگریوز سامانی، هامون و آبتویو، در شهرستان قوچان در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتویو و جنسن هیز، در شهرستان‌های کاشمر و نیشابور در تمامی روش‌ها به جز

جدول ۶- مقادیر ضریب ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده در ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 6. Annual Normalized Root Mean Square Error values (NRMSE) at the synoptic stations

ایستگاه	تریت‌جام	تریت‌حیدریه	خواف	درگز	سیزوار	سرخس	فریمان	قوچان	کاشمر	گلمکان	گناباد	مشهد	نیشابور
ET <sub>MB</sub>	ET <sub>JH</sub>	ET <sub>ABT</sub>	ET <sub>MAK</sub>	ET <sub>LIN</sub>	ET <sub>PT</sub>	ET <sub>HAM</sub>	ET <sub>HS</sub>						
۰/۵۳	۰/۲۷	۰/۲۲	۰/۳۸	۰/۱۸	۰/۴۷	۰/۳۹	۰/۳۴						
۰/۴۸	۰/۲۳	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۷۰	۰/۳۴	۰/۲۸	۰/۲۵						
۰/۶۷	۰/۴۸	۰/۵۸	۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۶۳	۰/۴۴	۰/۴۶						
۰/۴۸	۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۳۸	۰/۷۹	۰/۳۹	۰/۱۴	۰/۱۱						
۰/۵۹	۰/۲۸	۰/۴۴	۰/۴۸	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۳۲	۰/۳۲						
۰/۳۷	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۵۴	۰/۳۵	۰/۱۴	۰/۱۴						
۰/۶۳	۰/۴۶	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۴۴	۰/۴۹	۰/۲۲	۰/۲۴						
۰/۴۴	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۲۱	۰/۵۴	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۱۵						
۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۱۶	۰/۱۸	۰/۹۷	۰/۳۰	۰/۱۳	۰/۱۵						
۰/۴۹	۰/۲۵	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۶۷	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۱۶						
۰/۳۹	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۸۲	۰/۳۶	۰/۲۱	۰/۱۹						
۰/۴۴	۰/۱۸	۰/۲۰	۰/۲۶	۰/۴۹	۰/۳۲	۰/۲۱	۰/۱۷						
۰/۳۵	۰/۱۳	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۷۶	۰/۲۳	۰/۱۷	۰/۱۵						

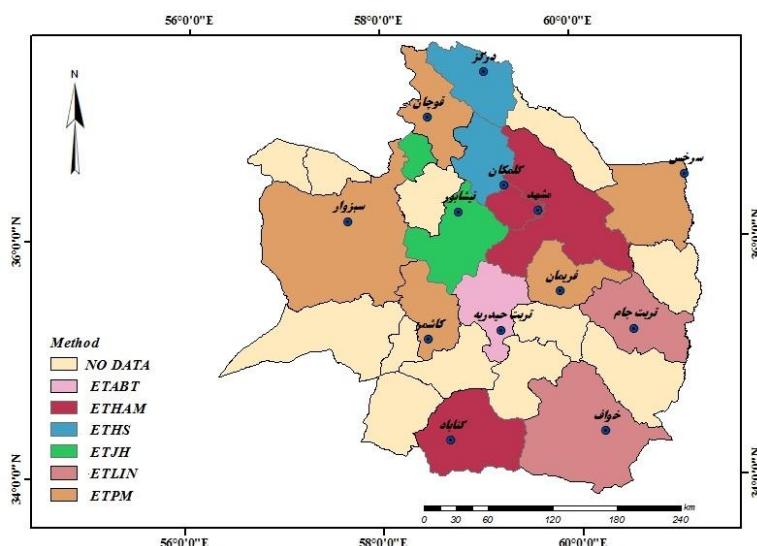
هامون، در شهرستان درگز در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و هامون، در شهرستان گلستان گلمکان در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و آبتو، در شهرستان نیشابور در تمام روش‌ها به جز لیناکر و مک گوئینز و بورنه به دست آمد. در شهرستان فریمان شاخص قدر مطلق نسبی خطا در هیچ‌کدام از روش‌ها کمتر از  $1/2$  به دست نیامد. کمترین مقدار این شاخص در این شهرستان در روش هارگریوز سامانی به میزان  $23/0$  حاصل شد. در شکل ۲ نقشه روش‌های مناسب تبخیر و تعرق در مقیاس سالانه در نواحی مورد مطالعه آورده شده است.

مقدادیر شاخص خطا نسبی در مناطق مورد مطالعه در جدول ۷ ارائه شده است. مطلوب‌ترین مقدار این شاخص زمانی است که قدر مطلق این شاخص بین صفر تا  $1/0$  قرار گیرد و هر چه به صفر نزدیک‌تر گردد مقدار مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. همچنان که در جدول ۷ نشان داده شده است. در شهرستان تربت‌جام و خوف بهترین مقدار این شاخص در روش لیناکر، در شهرستان تربت‌جیدریه، مشهد و سرخس در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتو، جنسن هیز و هامون، در شهرستان‌های قوچان، کاشمر و گناباد در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتو، جنسن هیز، ماکینگ و هامون، در شهرستان‌های سبزوار در روش‌های هارگریوز سامانی و

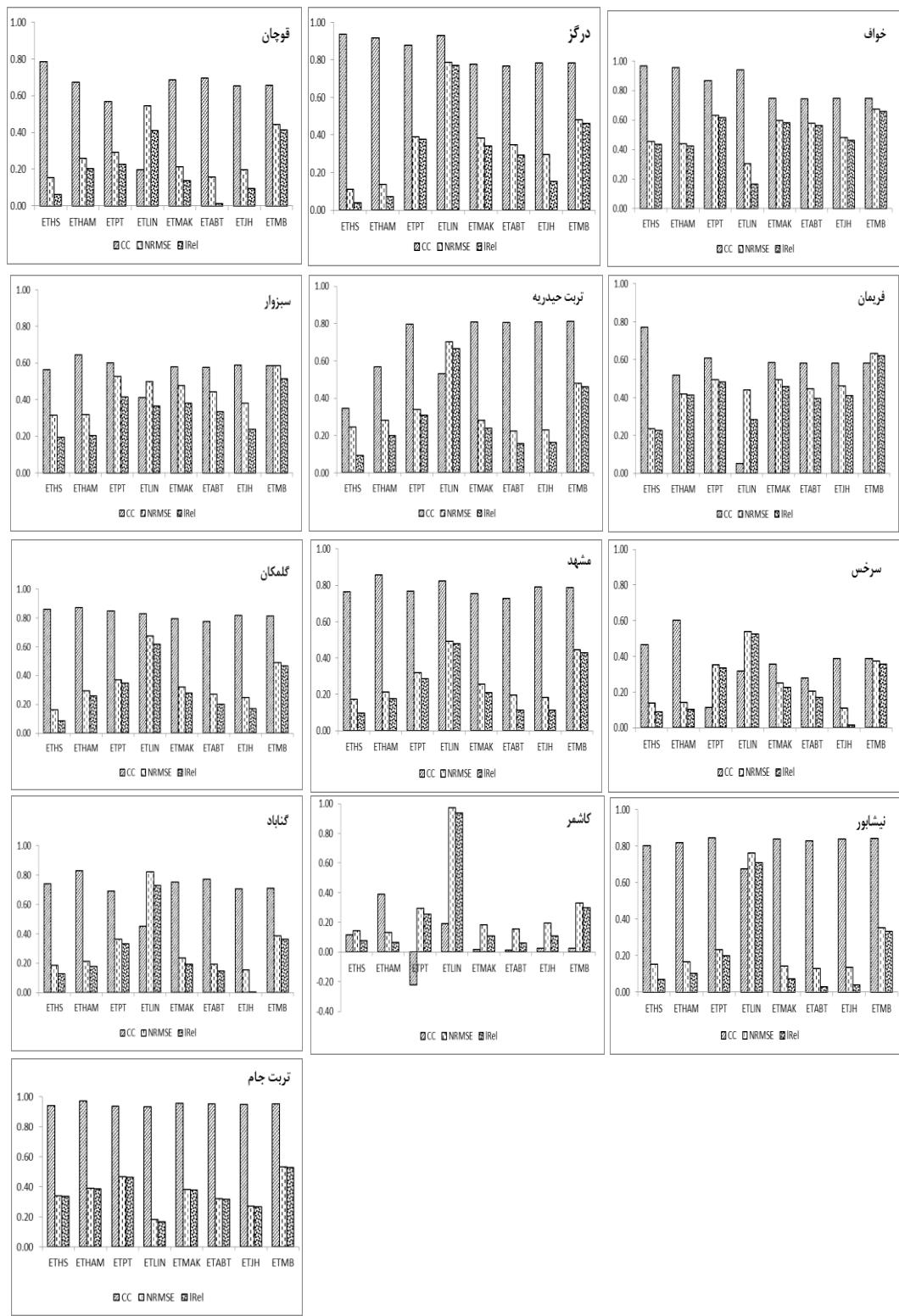
جدول ۷- مقدادیر خطا نسبی سالانه در ایستگاه‌های سینوپتیک

Table 7. Annual relative error values (RE) at the synoptic stations

ایستگاه	تربت‌جام	تربت‌جیدریه	خوف	درگز	سبزوار	سرخس	فریمان	قوچان	کاشمر	گلستان	گناباد	مشهد	نیشابور
ET <sub>MB</sub>	ET <sub>JH</sub>	ET <sub>ABT</sub>	ET <sub>MAK</sub>	ET <sub>LIN</sub>	ET <sub>PT</sub>	ET <sub>HAM</sub>	ET <sub>HS</sub>						
-0/53	-0/27	-0/32	-0/38	0/17	-0/46	-0/19	-0/33						
-0/46	-0/16	-0/16	-0/24	0/87	-0/31	-0/20	-0/09						
-0/66	-0/46	-0/56	-0/58	0/17	-0/62	-0/22	-0/44						
-0/46	-0/15	-0/29	-0/34	0/77	-0/38	-0/07	-0/04						
-0/51	-0/14	-0/33	-0/38	0/17	-0/44	-0/10	-0/20						
-0/36	0/02	-0/17	-0/22	0/52	-0/33	-0/10	-0/09						
-0/62	-0/41	-0/40	-0/46	0/28	-0/48	-0/41	-0/23						
-0/41	-0/09	-0/01	-0/14	0/41	-0/23	-0/20	-0/06						
-0/30	0/11	-0/06	-0/10	0/93	-0/25	-0/06	-0/08						
-0/47	-0/17	-0/20	-0/28	0/82	-0/35	-0/26	-0/08						
-0/36	0/003	-0/15	-0/19	0/73	-0/33	-0/18	-0/13						
-0/43	-0/11	-0/11	-0/21	0/48	-0/29	-0/18	-0/10						
-0/33	0/04	0/03	-0/07	0/71	-0/20	-0/10	-0/07						



شکل ۲- نقشه روش‌های مناسب محاسبه تبخیر و تعرق در مقیاس سالانه در منطقه مورد مطالعه  
Figure 2. Map of suitable methods for calculating evapotranspiration in annually timescale in the study area



شکل ۳- نتایج آنالیز آماری مقایسه تبخیر و تعرق در مقیاس سالانه در منطقه مورد مطالعه  
Figure 3. The results of statistical analysis comparison of evapotranspiration  
in annually timescale in the study area

در شهرستان‌های گناباد و مشهد، روش جنسن هیز در شهرستان نیشابور و روش آبتو در شهرستان تربت‌حیدریه استفاده نمود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش‌های مبتنی بر درجه حرارت (مانند هارگریوز سامانی، هامون و لیناکر) در بیشتر مناطق این استان کارایی بالاتری نسبت به روش‌های مبتنی بر تابش (جنسن هیز و آبتو) دارند، که این نتیجه با یافته‌های سایر محققان در مناطق خشک و دارای بادهایی با سرعت‌های بالا مشابه است (۳۱، ۴۰، ۴۱). در بین روش‌های مبتنی بر تابش فقط روش جنسن هیز و آبتو در مناطق مرکزی این استان نتایج خوبی را از خود نشان دادند این دو روش خطای کمتر و همبستگی بیشتری با روش فائق پمن ماننتیث نشان دادند. روش‌های مبتنی بر درجه حرارت در نواحی شمالی، شرقی و جنوب شرقی این استان نتایج قابل قبول‌تری از خود نشان دادند. دلیل این نتایج متفاوت ممکن است این باشد که روش مشابه نتایج متفاوتی را تحت شرایط آب و هوایی مختلف و محیط‌های جغرافیایی متفاوت از خود نشان می‌دهند، بنابراین استفاده از روش‌های تجربی تبخیر و تعرق نیاز به اعتبارستحی در مناطق مختلف دارد.

مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرتع با روش مختلف با روش فائق پمن ماننتیث در مقیاس سالانه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که بهجای روش جنسن هیز در شهرستان‌های سالانه می‌توان از روش هارگریوز سامانی در شهرستان‌های درگز و گلمکان، از روش لیناکر در شهرستان‌های خوف و تربت‌جام، از روش هامون در شهرستان‌های گناباد و مشهد، از روش جنسن هیز در شهرستان نیشابور و از روش آبتو در شهرستان تربت‌حیدریه استفاده نمود و در شهرستان‌های کاشمر، سبزوار، سرخس، فریمان و قوچان بهترین روش در مقیاس سالانه، روش فائق پمن ماننتیث می‌باشد. پیشنهاد می‌گردد که مطالعات جامع‌تری در بازه زمانی فصلی و روزانه نیز با استفاده از این روش‌ها انجام گیرد.

### تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از نتایج طرح تحقیقاتی اجرشده از محل اعتبارات معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری تربت‌جام می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت مالی این مجتمع تقدیر و تشکر می‌گردد.

در شکل ۳ نمودار نتایج آنالیز آماری مقایسه روش‌های مختلف تبخیر و تعرق در مناطق مورد مطالعه آورده شده است. تبخیر و تعرق (ET) یکی از بینایی‌ترین فرآیندهای است که تحت تأثیر آب‌وهوا و اقلیم در دو مقیاس محلی و جهانی قرار دارد. در این مطالعه تغییرات مکانی تبخیر و تعرق در استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران در مقیاس سالانه مورد بررسی قرارگرفته است. همچنان که نتایج تجزیه و تحلیل آماری جداول ۴-۷، شکل ۲ و ۳ نشان داد در شهرستان‌های کاشمر، سبزوار و سرخس مطلوب‌ترین مقادیر شاخص‌های آماری خطا در روش هامون و در شهرستان‌های فریمان و قوچان در روش هارگریوز سامانی به دست آمد اما نظر به اینکه ضریب همبستگی در کلیه روش‌ها کمتر از ۰/۸ به دست آمد، به نظر می‌رسد که نتوان از هیچ‌یک از این روش‌ها به عنوان روش جایگزین فائق پمن ماننتیث در مقیاس سالانه در این مناطق استفاده نمود.

از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد هر مدل، پارامترهای ورودی به آن مدل می‌باشد. هرکدام از مدل‌های تبخیر و تعرق نیاز به ورودی‌های متفاوتی داشته و این روش‌ها در شرایط مکانی و اقلیمی متفاوت توسعه یافته‌اند. به همین دلیل در مناطق مختلف و آب‌وهوایی متغیر هرکدام از آن‌ها نتایج متفاوتی خواهد داشت. در بین مناطق مورد مطالعه نیز در شهرستان‌های سبزوار، سرخس، فریمان، قوچان و بهخصوص کاشمر پارامتر سرعت باد در طول سال‌های مورد مطالعه تغییرپذیری زیادی داشته است. ازانجاکه این پارامتر به غیراز روش فائق پمن ماننتیث در هیچ‌یک از روش‌های دیگر به صورت مستقیم وارد نمی‌گردد شاید بتوان آن را یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش ضریب همبستگی و عملکرد ضعیف مدل‌ها نسبت به روش فائق پمن ماننتیث دانست. لازگ و همکاران (۱۶) نیز در مطالعات خود در مقیاس سالانه در بعضی از مناطق مورد مطالعه ضریب همبستگی بسیار پایینی به دست آورده که آن را به توپوگرافی پیچیده، تغییرپذیری آب‌وهوا در این مناطق مرتبط دانستند.

در بقیه مناطق مورد مطالعه بهجای روش فائق پمن ماننتیث که روشی با داده‌های هواشناسی زیاد و محاسبات پیچیده ریاضی می‌باشد می‌توان از روش‌های تجربی ساده‌تری مانند روش هارگریوز سامانی در شهرستان‌های درگز و گلمکان، روش لیناکر در شهرستان‌های خوف و تربت‌جام، روش هامون

### منابع

1. Abtew, W. 1996. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. Journal of the American Water Resources Association, 32: 465-473.
2. Al-Ghabari, H.M. 2000. Estimation of reference evapotranspiration for southern region of Saudi Arabia. Irrigation Science, 19: 81-86.
3. Alkaeed, O., C. Flores, K. Jinno and A. Tsutsumi. 2006. Comparison of several reference evapotranspiration methods for Itoshima Peninsula area. Fukuoka, Japan. Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, 66: 1-14.
4. Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop Evapotranspiration: Guideline for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: Italy, 56.
5. Allen, R.G., A.J. Clemmens, C.M. Burt, K. Solomon and T. O'Halloran. 2005. Prediction accuracy for projectwide evapotranspiration using crop coefficients and reference evapotranspiration. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 131: 24-36.

6. Allen, R.G., W.O. Pruitt, J.L. Wright, T.A. Howell, F. Ventura and R.A. Snyder. 2006. Recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETO by the FAO 56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management*, 81: 1-22.
7. Amiri, M. and H.R. Pourghasemi. 2019. Comparing Different Methods of Potential Evapotranspiration and Studying Temporal and Spatial Changes in the Mahalou Watershed using GIS. *Journal of Watershed Management Research*, 10(19): 22-35 (In Persian).
8. Braun, P., B. Maurer, G. Muller, P. Gross, G. Heinemann and C. Simmer. 2001. An integrated approach for the determination of regional evapotranspiration using mesoscale modelling, remote sensing and boundary layer measurements. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 76: 83-105.
9. De Bruin, H.A.R. and J.N.M. Stricker. 2000. Evaporation of grass under non-restricted soil moisture conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 45: 391-406.
10. Garcia, M., D. Raes, R. Allen and C. Herbas. 2004. Dynamics of reference evapotranspiration in the Bolivian highlands (Altiplano). *Agricultural and Forest Meteorology*, 125: 67-82.
11. Gong, L., C.Y. Xu, D. Chen, S. Halldin and Y.D. Chen. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. *Journal of Hydrology*, 329: 620-629.
12. Hamon, W.R. 1963. Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *International Association of Hydrologic Sciences Publication*, 63: 52-62.
13. Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2): 96-99.
14. Jacobs, J.M. and S.R. Satti. 2001. Evaluation of Reference Evapotranspiration Methodologies and Afsirs Crop Water Use Simulation Model: Final Report; University of Florida: Gainesville, FL, USA.
15. Jensen, M.E. and H.R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. In *Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89: 15-41.
16. Lang, D., J. Zheng, J. Shi, F. Liao, X. Ma, W. Wang , X. Chen and M. Zhang. 2017. A comparative study of potential evapotranspiration estimation by eight methods with FAO Penman-Monteith method in southwestern China. *Water (Switzerland)*, 9. <https://doi.org/10.3390/w9100734>.
17. Linacre, E.T. 1977. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18(6): 409-424.
18. Makink, G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11: 277-288.
19. McGuinness, J.L. and E.F. Bordne. 1972. A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values. In *Technical Bulletin 1452*, Agricultural Research Service; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
20. Mirmosavi, M.H., H. Panahi, H. Akbarzadeh. 2012. Calibration estimating methods for potential evapotranspiration and calculating the water requirement of the olive plant in Kermanshah province. *Geography and environmental sustainability*, 2(3): 45-65 (In Persian).
21. Modiri, E. 2018. Estimation of reference crop evapotranspiration ( $ET_0$ ) at synoptic stations of Tehran province. *Human and Environment*, 46: 127-134 (In Persian).
22. Mousavi-Baygi, M., M. Erfanian and M. Sarmad. 2009. Estimation of Reference crop Evapotranspiration Using the Least Meteorological Data (Case Study: Khorasan Razavi Province). *Journal of Water and Soil*. 23: 91-99 (In Persian).
23. Noory, H., A. Badiehneshin and A. Mohammadi Mohammad Abadi. 2017. Evaluation of reference evapotranspiration calculation methods and determination of Pistachio evapotranspiration in Rafsanjan. *Journal of Agricultural Meteorology*, 4(2): 77-81 (In Persian).
24. Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100: 81-92.
25. Raziei, T. and L.S. Pereira. 2013. Estimation of ET<sub>0</sub> with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121: 1-18.
26. Samadianfard, S. and S. Panahi. 2018. Estimating Daily Reference Evapotranspiration using Data Mining Methods of Support Vector Regression and M5 Model Tree. *Journal of Watershed Management Research*, 10(18): 157-167 (In Persian).
27. Silva, H.J.F. da, M.S. dos Santos, J.B. Cabral Junior and M.H.C. Spyrides. 2016. Modeling of reference evapotranspiration by multiple linear regression. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6(1): 44-58. <https://doi.org/10.5935/2237-2202.20160005>.
28. Soltani, A., S.M. Mirlatifi and H. Dehghanianj. 2012. Estimating Reference Evapotranspiration Using Limited Weather Data under Different Climatic Conditions. *Journal of Water and Soil*, 26: 139-149 (In Persian).
29. Some'e, B.S., A. Ezani and H. Tabari. 2012. Spatiotemporal trends and change point of precipitation in Iran. *Atmospheric Research*, 133: 1-12.
30. Temesgen, B., S. Eching, B. Davidoff and K. Frame. 2005. Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437.1\(73\); 131](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437.1(73); 131).
31. Todorovic, M., B. Karic and L.S. Pereira. 2013. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, 481: 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.034>.

## Evaluation of Different Methods of Calculating the Potential Evapotranspiration at the Annual Timescale in the Northeast of Iran

Zahra Shirmohammadi-Aliakbarkhani<sup>1</sup>, Seyed Farhad SaberAli<sup>2</sup> and Mansoureh Kouhi<sup>3</sup>

1- Assistant Professor, Department of Water Engineering, University of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran,

(Corresponding Author: mshirmohamady@yahoo.com)

2- Assistant Professor, Department of horticulture science and engineering, University of Torbat-e Jam, Khorasan Razavi, Iran

3- Assistant Professor - Climatological Research Institute (CRI)

Received: December 29, 2019 Accepted: March 28, 2020

### Accepted

One of the most fundamental processes, which influence climate and weather, both global and local scales that a fact which gives it the status of agriculture, is Evapotranspiration (ET). In irrigation and water resources management, ecosystem modelers, environmental assessment and solar energy system, accurate assessment of evapotranspiration is essential. Potential evapotranspiration (ET) has commonly applied to calculate the actual evapotranspiration, which was difficult to estimate by lysimeter measurement and water balance approach under field conditions. Until now, many methods have reported to estimating ET, however, due to the availability of the observed data, it is difficult to choose the optimal method. In this study, to determination of the best potential evapotranspiration method for the Khorasan Razavi Province, three temperature-based methods, Hargreaves–Samani (HS), Hamon (HAM) and Linacre (LIN) and five radiation-based methods, Jensen-Haise (JH), Makkink (MAK), McGuinness and Bordne (MB), Abtew (ABT), and Priestley–Taylor (PT), were compared with PM at yearly scale, using long-term (11-67 years) data from 13 meteorology stations. Indicators, viz. The correlation coefficient (CC), Relative bias (BIAS), normalized root mean squared error (NRMSE) and Relative error(Re) were used to evaluate the performance of ET estimations by the above-mentioned eight methods. The results showed that the performance of the methods in ET estimation varied among regions;  $ET_{LIN}$  overestimated ET, while others underestimated. In Dargaz and Golmakan,  $ET_{HS}$  yielded similar estimations to that of  $ET_{PM}$ , while, in Torbate-jam and Khaf,  $ET_{LIN}$  showed better performances. Also in Mashhad and Gonabad,  $ET_{HAM}$ , in Neyshabour,  $ET_{JH}$  and in Torbat-e Heydarieh,  $ET_{ABT}$  showed better performances. But in Fariman, Kashmar, Sabzevar, Sarakhs and Quchan, all methods showed poor performance. It indicated that  $ET_{PM}$  is acceptable for ET simulation for the yearly timescale in these areas.

**Keywords:** FAO-Penman-Monteith, Northeastern Iran, Potential Evapotranspiration, Radiation, Temperature