دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز

"مقاله پژوهشی"

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

زهرا شیرمحمدی علی‌اکبرخانی [۱]، سید فرهاد صابرعلی [۲] و منصوره کوهی [۳]

۱- استادیار گروه مهندسی آب، مجتمع آموزش عالی تربت‌جام ، خراسان رضوی، ایران، (نویسنده مسوول: mshirmohamady@yahoo.com)
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی باغبانی، مجتمع آموزش عالی تربت‌جام، خراسان رضوی، ایران
۳- استادیار گروه پژوهشی مخاطرات و تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم شناسی
تاریخ ارسال: ۹۸/۱۰/۰۸ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۱/۰۹
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 قرارگرفته‌اند 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، ماکینک، مک گوئینز-بورنه و آبتیو، پریستلی-تیلور با روش تبخیر و تعرق پنمن مانتیث فائو در مقیاس سالانه در طول دوره آماری متفاوت با کمترین دوره آماری ۱۱ سال و بالاترین دوره آماری ۶۷ سال در سیزده ایستگاه هواشناسی در شمال شرق ایران با استفاده از شاخص‌های ضریب همبستگی، بایاس نسبی، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده 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 گلمکان روش هارگریوز سامانی عملکردی مشابه روش فائو پنمن مانتیث نشان داد درحالی‌که در تربت‌جام و خواف روش لیناکر کارایی بهتری داشت. همچنین در مشهد. گناباد، روش هامون، در نیشابور روش جنسن هیز و در تربت حیدریه روش آبتیو کارایی بهتری را نشان دادند؛ اما در شهرستان‌های فریمان، کاشمر، سرخس، سبزوار و قوچان کلیه روش‌ها در مقایسه با روش فائو پنمن مانتیث عملکرد ضعیفی داشته به‌همین دلیل در این مناطق روش قابل‌قبول برای محاسبه تبخیر و تعرق روش فائو پنمن مانتیث در مقیاس سالانه می‌باشد.**

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

## 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 روش‌های متعددی برای تخمین تبخیر و تعرق ارائه‌شده‌اند، اما با توجه به دسترسی داده‌های مشاهده شده، انتخاب یک روش مناسب دشوار است. از میان روش‌های متعدد محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش فائو پنمن مانتیث توصیه‌شده توسط فائو یا سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد و سازمان جهانی هواشناسی (WMO) به دلیل عملکرد قابل‌قبول در شرایط مختلف آب و هوایی در بسیاری از مناطق جهان و دقت قابل‌قبول با نتایج لایسیمتر (۴) بر اساس معیارهای فیزیولوژیکی و آئرودینامیکی بدون نیاز به اصلاح پارامترها برای تخمین و واسنجی، به‌عنوان یک روش استاندارد توصیه می‌شود (۱۰،۹،۶،۵،۲،۲۶). تحقیقات متعددی در مناطق مختلف جهان نیز نشان داده‌اند که روش پنمن مانتیث فائو تبخیر و تعرق را با نتایج قابل‌قبولی برآورد می‌کند (۳۱،۳۰،۲۵،۱۴،۱۱)؛ اما محدودیت اصلی این روش دشواری و عدم دسترسی به تمام داده‌های هواشناسی مورد نیاز (حدود ۱۰ متغیر) و همچنین نیاز به محاسبات پیچیده ریاضی (تقریباً ۱۶ زیرمجموعه ریاضی) می‌باشد (۲۷). لذا، توسعه معادلات تجربی ساده برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از این روش به‌عنوان روش استاندارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در نتیجه روش‌های بسیاری در دهه‌های گذشته به‌منظور تخمین تبخیر و تعرق بر اساس معادلات تجربی و یا معیارهای فیزیکی توسعه‌یافته‌اند. بااین‌حال، بسیاری از این روش‌ها برای استفاده در هر منطقه قابل‌اعتماد نبوده و نیاز به آنالیزهای محلی و اعتبارسنجی این روش‌ها خواهد بود. در ایران تحقیق‌های متعددی 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

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

رفسنجان، با ارزیابی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع شامل روش‌های پنمن اصلاح‌شده به‌وسیله فائو، روش تشعشع، روش هارگریوز سامانی، پنمن مانتیث فائو، بلانی کریدل و کیمبرلی پنمن نشان دادند که در این منطقه روش مطلوب روش پنمن مانتیث فائو می‌باشد.

این مطالعه در استان خراسان رضوی که بر اساس پهنه‌بندی اقلیمی ترنت وایت در اقلیم نیمه‌خشک قرار دارد انجام می‌گیرد. مطالعات انجام‌شده در رابطه با ارزیابی عملکرد معادلات مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با استفاده از روش استاندارد فائو–پنمن 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 فائو–پنمن 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.

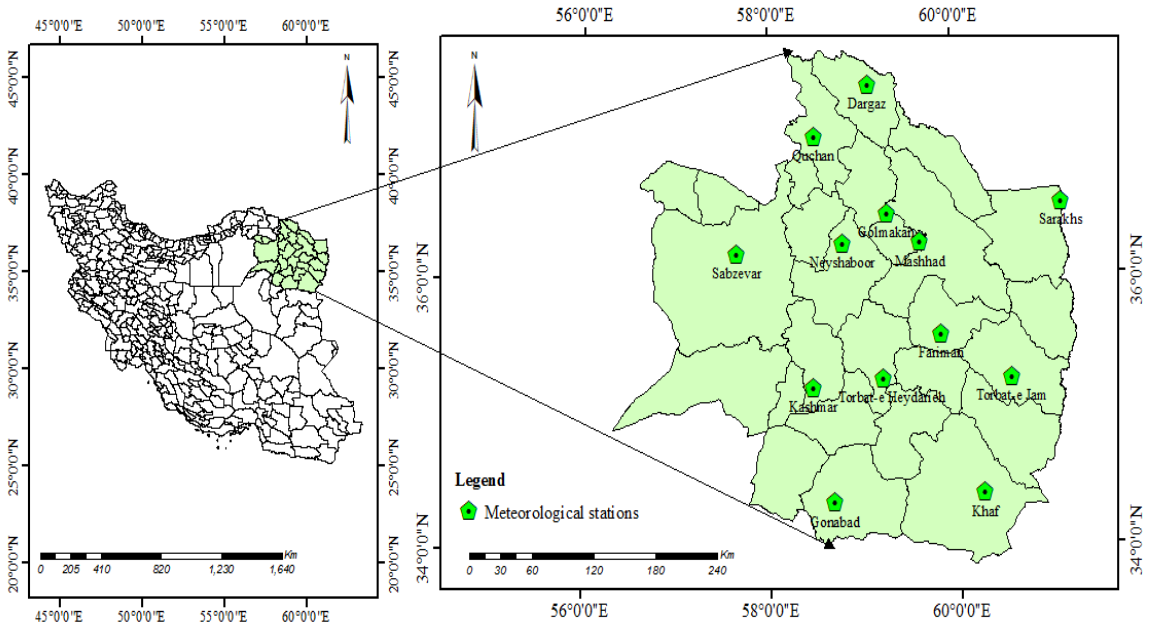
## مواد و روش‌ها

استان خراسان رضوی در شمالی شرقی ایران و در طول جغرافیایی ۶۲°– ۵۶° شرقی و در عرض جغرافیایی ۳۸°– ۳۳° شمالی با مساحت ۱۱۷۲۰۰ کیلومترمربع گسترش یافته است. متوسط سالانه بارندگی در این استان ۲۵۰ میلی‌متر گزارش‌شده 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 مورد 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 ساعات آفتابی که به‌صورت روزانه می‌باشد. سپس با استفاده از روش‌های ارائه‌شده در این بخش تبخیر و تعرق گیاه مرجع به روش‌های مختلف به‌صورت روزانه محاسبه و سپس تبدیل به میانگین سالانه گردید.

### روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع

تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع به‌صورت 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 به‌خوبی آبیاری شده و سطح سایه‌انداز کاملی بر روی زمین دارد، تعریف‌شده است (۴).




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

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

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 |
|---|---|---|---|---|
| تربت‌جام | ۶۰° ۳۵ ′ | ۳۵° ۱۶ ′ | ۹۵۰/۴ | ۱۳۷۱-۱۳۹۷ |
| تربت‌حیدریه | ۵۹° ۱۳ ′ | ۳۵° ۲۰ ′ | ۱۴۵۱ | ۱۳۳۷-۱۳۹۷ |
| خواف | ۶۰° ۹ ′ | ۳۴° ۳۵ ′ | ۹۹۸ | ۱۳۸۵-۱۳۹۷ |
| درگز | ۵۹° ۴ ′ | ۳۷° ۲۸ ′ | ۵۱۴ | 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 ′ | ۱۱۱۰ | ۱۳۶۵-۱۳۹۷ |
| گلمکان | 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 تبخیر و تعرق پنمن مانتیث فائو**[1]

این روش معادله‌ای برای محاسبه تبخیرتعرق گیاه مرجع به‌صورت زیر ارائه می‌دهد (۴).

$$ET_{PM}=\frac{0.408\Delta(R_n-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u_2(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34u_2)} \quad (۱)$$

که در آن $ET_{PM}$ تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌روش فائو پنمن مانتیث برحسب میلی‌متر در روز، $\Delta$ شیب منحنی فشار بخارآب نسبت به دما برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد، $R_n$ تابش خالص ورودی به سطح گیاه برحسب مگا ژول بر مترمربع بر روز، G شار گرمای خاک برحسب مگا ژول بر مترمربع بر روز، T میانگین روزانه دمای هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سانتی‌گراد، $u_2$ سرعت باد در ارتفاع دو متری برحسب متر بر ثانیه، $e_s$ و $e_a$ به‌ترتیب فشار بخار اشباع و واقعی هوا برحسب کیلو پاسکال، $\gamma$ ثابت سایکرومتری برحسب کیلو پاسکال بر درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

**روش هارگریوز- سامانی**[2]

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 قرارگرفته است به‌صورت زیر می‌باشد:

$$ET_{HS}=0.0023(T_{max}-T_{min})^{0.5}(T+17.8)\frac{R_a}{\lambda} \quad (۲)$$

که در آن $ET_{HS}$: تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌روش هارگریوز-سامانی برحسب میلی‌متر در روز $R_a$ تابش فرازمینی برحسب مگا ژول بر مترمربع بر روز که از روش آلن و همکاران به‌دست می‌آید. $T_{max}$ و $T_{min}$ به‌ترتیب حداکثر و حداقل درجه حرارت برحسب درجه سانتی‌گراد، T متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سانتی‌گراد، $\lambda$ گرمای نهان تبخیر برحسب مگا ژول بر کیلوگرم می‌باشد.

**روش هامون**[3]

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

$$ET_{HAM}=k*0.165*216.7*N*\left(\frac{e_s}{T+273.3}\right) \quad (۳)$$

که در آن $ET_{HAM}$ تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌روش هامون برحسب میلی‌متر در روز، N حداکثر ساعات آفتابی روزانه به‌صورت ضریبی بر ۱۲ ساعت که از روش آلن و همکاران به‌دست می‌آید، $e_s$ فشار بخار اشباع هوا برحسب میلی بار، T متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سانتی‌گراد، k ضریب تناسب مساوی ۱/۲ می‌باشد.

**روش لیناکر**[4]

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

$$ET_{LIN}=\frac{\frac{500\times(T+0.006\times A)}{100-\varphi}+15\times(T-T_d)}{80-T} \quad (۴)$$

که در آن $ET_{LIN}$ تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌روش لیناکر برحسب میلی‌متر در روز، A ارتفاع ایستگاه برحسب متر، $\varphi$ عرض جغرافیایی ایستگاه برحسب درجه، T متوسط درجه حرارت هوا در ارتفاع دو متری برحسب درجه سانتی‌گراد و $T_d$ دمای نقطه شبنم برحسب درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

**روش پریستلی-تیلور**[5]

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

$$ET_{PT}=\alpha\times\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\times\frac{(R_n+G)}{\lambda} \quad (۵)$$

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

1- FAO–Penman–Monteith method
2- Hargreaves - Samni method
3- Hamon method
4- Linacre method
5- Priestley-Taylor method
6- Makkink method

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

**روش ماکینک**[6]

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

$$ET_{MAK}=0.7\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\times\frac{R_s}{\lambda} \quad (۶)$$

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

**روش آبتیو**[1]

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

$$ET_{ABT}=k\times\frac{R_s}{\lambda} \quad (۷)$$

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

**روش جنسن هیز**[2]

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

$$ET_{JH}=\frac{0.025(T+3)R_s}{\lambda} \quad (۸)$$

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

**روش مک گوئینز – بورنه**[3]

مک گوئینز و بورنه (۱۹) معادله‌ای را برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع به‌صورت زیر ارائه کردند:

$$ET_{MB}=\frac{(T+5)}{68}\frac{R_s}{\lambda} \quad (۹)$$

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

**آنالیزهای آماری**

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

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 | مقدار 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) | $RBIAS=\frac{\sum_{n=1}^{N}(f_n-r_n)}{\sum_{n=1}^{N}r_n}\times 100\%$ | ۰ |
| ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE) | $NRMSE=\frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}(f_n-r_n)^2}}{\bar{r}}$ | ۰ |
| خطای نسبی (RE) | $RE=\frac{\sum_{n=1}^{N}(f_n-r_n)}{\sum_{n=1}^{N}r_n}$ | ۰ |

که در آن n: تعداد داده‌ها، مقادیر $r_n$ مقدار تبخیر و تعرق به روش استاندارد پنمن مانتیث فائو و $f_n$ مقادیر محاسباتی تبخیر و تعرق با استفاده از سایر روش‌های تبخیر و تعرق، n: تعداد داده‌ها

## نتایج و بحث

مقادیر محاسبه‌شده تبخیر و تعرق به روش فائو پنمن مانتیث در مقیاس سالانه در مناطق مورد مطالعه به‌شرح جدول ۳ می‌باشد. بالاترین میزان تبخیر و تعرق سالانه در این استان در شهرستان خواف به‌میزان ۲۵۴۶/۵ میلی‌متر در سال به‌دست آمد و پایین‌ترین میزان تبخیر و تعرق در این استان در شهرستان قوچان و به‌میزان ۱۳۴۱/۳ میلی‌متر در سال به‌دست آمد.

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

1-Abtew method 2- Jensen-Haise method 3- McGuinness-Bordne method

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

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 به‌دست‌آمده، در بیشتر مناطق مورد مطالعه تبخیر و تعرق محاسبه‌شده در کلیه روش‌ها به‌جز روش لیناکر مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل را کم برآورد می‌نماید. اما در 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 ذکرشده روش آبتیو و هارگریوز سامانی نیز تبخیر و تعرق را بیشتر برآورد می‌نمایند.

جدول ۳- مقادیر محاسبه‌شده تبخیر و تعرق به روش فائو پنمن مانتیث 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 فائو پنمن مانتیث در طول دوره آماری (میلی‌متر) |
|---|---|
| تربت‌جام | ۲۱۰۵/۱ |
| تربت‌حیدریه | ۱۴۶۱/۳ |
| خواف | ۲۵۴۶/۵ |
| درگز | ۱۴۵۷/۴ |
| سبزوار | ۱۷۷۷/۱ |
| سرخس | ۱۶۶۱/۷ |
| فریمان | ۱۷۰۵/۳ |
| 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 | $ET_{HS}$ | $ET_{HAM}$ | $ET_{PT}$ | $ET_{LIN}$ | $ET_{MAK}$ | $ET_{ABT}$ | $ET_{JH}$ | $ET_{MB}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تربت‌جام | −۳۳/۴۴ | −۳۸/۵۱ | −۴۶/۳۲ | ۱۶/۷۰ | −۳۷/۶۶ | −۳۱/۵۸ | −۲۶/۵۱ | −۵۳/۰۱ |
| تربت‌حیدریه | −۹/۳۰ | −۲۰/۰۱ | −۳۰/۷۷ | ۶۶/۶۳ | −۲۳/۹۷ | −۱۵/۵۵ | −۱۶/۳۴ | −۴۶/۱۶ |
| خواف | −۴۳/۶۶ | −۴۲/۲۲ | −۶۱/۷۲ | ۱۶/۷۴ | −۵۸/۰۸ | −۵۶/۲۰ | −۴۶/۱۱ | −۶۵/۸۸ |
| درگز | −۳/۹۹ | −۷/۱۷ | −۳۷/۶۳ | ۷۷/۱۳ | −۳۴/۰۱ | −۲۹/۱۴ | −۱۵/۱۵ | −۴۶/۱۹ |
| سبزوار | −۱۹/۵۴ | −۲۰/۲۴ | −۴۱/۶۰ | ۳۶/۵۹ | −۳۷/۹۶ | −۳۳/۳۵ | −۲۳/۸۳ | −۵۱/۵۱ |
| سرخس | −۸/۸۷ | −۱۰/۱۳ | −۳۳/۳۵ | ۵۲/۴۰ | −۲۲/۴۳ | −۱۶/۹۲ | ۱/۶۰ | −۳۵/۶۴ |
| فریمان | −۲۲/۶۶ | −۴۱/۳۲ | −۴۸/۱۹ | ۲۸/۳۱ | −۴۵/۸۵ | −۳۹/۶۳ | −۴۰/۹۳ | −۶۱/۹۷ |
| قوچان | −۶/۲۳ | −۲۰/۲۱ | −۲۲/۷۳ | ۴۰/۹۸ | −۱۳/۸۵ | −۱/۲۲ | −۹/۴۱ | −۴۱/۳۴ |
| کاشمر | −۷/۵۶ | −۶/۶۵ | −۲۵/۴۶ | ۹۳/۷۴ | −۱۰/۹۷ | −۵/۹۰ | ۱۰/۶۳ | −۲۹/۷۱ |
| گلمکان | −۸/۴۲ | −۲۵/۹۷ | −۳۴/۵۵ | ۶۱/۵۰ | −۲۷/۶۷ | −۲۰/۲۵ | −۱۷/۰۷ | −۴۶/۸۳ |
| گناباد | −۱۲/۶۵ | −۱۷/۷۸ | −۳۳/۳۴ | ۷۳/۰۶ | −۱۹/۴۵ | −۱۴/۶۷ | ۰/۲۹ | −۳۶/۲۹ |
| مشهد | −۹/۵۳ | −۱۷/۶۷ | −۲۸/۵۸ | ۴۷/۸۱ | −۲۱/۰۴ | −۱۱/۲۳ | −۱۱/۱۹ | −۴۲/۹۰ |
| نیشابور | ۶/۷۷ | −۱۰/۲۳ | −۱۹/۹۵ | ۷۰/۷۶ | −۷/۴۱ | ۳/۰۱ | ۳/۸۵ | −۳۳/۲۴ |

مقادیر ضریب همبستگی در روش‌های مختلف با روش فائو پنمن مانتیث در جدول ۵ آورده شده است. در شهرستان تربت‌جام در تمامی روش‌های محاسباتی تبخیر و تعرق مقدار این ضریب بالای ۰/۹ هست. در شهرستان تربت‌حیدریه پنج روش پرستلی تیلور، ماکینک، آبتیو، مک گوئینز و بورنه و جنسن هیز، ضرایب همبستگی نزدیک به هم بالاتر از ۰/۸ داشتند و بقیه روش‌ها ضریب همبستگی پایینی را نشان دادند. در شهرستان خواف چهار روش هارگریوز سامانی، هامون، لیناکر و پرستلی تیلور به‌ترتیب دارای بالاترین ضریب همبستگی نسبت به سایر روش‌ها و مقدار ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۷ بودند. در شهرستان درگز چهار روش هارگریوز سامانی، لیناکر، هامون و پرستلی تیلور به‌ترتیب دارای بالاترین ضریب همبستگی نسبت به سایر روش‌ها و مقدار ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸۸ بودند. در شهرستان‌های سبزوار و سرخس در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۸ به‌دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این دو شهرستان نسبت به سایر روش‌ها درروش هامون به‌ترتیب با مقادیر ۰/۶۴ و ۰/۶۰ به‌دست آمدند. در شهرستان‌های فریمان و قوچان در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۸ به‌دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این دو شهرستان نسبت به سایر روش‌ها در روش هارگریوز سامانی به‌ترتیب با مقادیر ۰/۷۷ و ۰/۷۸ به‌دست آمدند. در شهرستان کاشمر در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی ضریب همبستگی مطلوب

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

بالای ۰/۸ به‌دست نیامد بالاترین ضریب همبستگی در این شهرستان نسبت به سایر روش‌ها در روش هامون و مقدار ۰/۳۹ به‌دست آمد. در شهرستان گلمکان در تمامی روش‌های محاسباتی به‌جز روش ماکینک و آبتیو ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸ به‌دست آمد. بالاترین ضریب همبستگی در روش‌های هامون (۰/۸۷) و هارگریوز سامانی (۰/۸۶) به‌دست آمد. در شهرستان گناباد در هیچ‌کدام از روش‌های محاسباتی به‌جز روش هامون ضریب همبستگی مطلوب بالای ۰/۸ به‌دست 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 به‌دست آمد. در شهرستان نیشابور در تمامی روش‌های محاسباتی به‌جز روش لیناکر ضریب همبستگی بالاتر از ۰/۸، پرستلی تیلور (۰/۸۵)، جنسن هیز (۰/۸۴)، ماکینک (۰/۸۴) و مک گوئینز و بورنه (۰/۸۴) به‌دست آمد.

جدول ۵- مقادیر ضریب همبستگی در ایستگاه‌های سینوپتیک

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

| ایستگاه | $ET_{HS}$ | $ET_{HAM}$ | $ET_{PT}$ | $ET_{LIN}$ | $ET_{MAK}$ | $ET_{ABT}$ | $ET_{JH}$ | $ET_{MB}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تربت‌جام | ۰/۹۴ | ۰/۹۷ | ۰/۹۴ | ۰/۹۳ | ۰/۹۶ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ | ۰/۹۵ |
| تربت‌حیدریه | ۰/۳۴ | ۰/۵۷ | ۰/۸۰ | ۰/۵۳ | ۰/۸۱ | ۰/۸۰ | ۰/۸۱ | ۰/۸۱ |
| خواف | ۰/۹۷ | ۰/۹۶ | ۰/۸۷ | ۰/۹۴ | ۰/۷۵ | ۰/۷۴ | ۰/۷۵ | ۰/۷۵ |
| درگز | ۰/۹۴ | ۰/۹۲ | ۰/۸۸ | ۰/۹۳ | ۰/۷۸ | ۰/۷۷ | ۰/۷۸ | ۰/۷۸ |
| سبزوار | ۰/۵۶ | ۰/۶۴ | ۰/۶۰ | ۰/۴۱ | ۰/۵۸ | ۰/۵۸ | ۰/۵۹ | ۰/۵۹ |
| سرخس | ۰/۴۷ | ۰/۶۰ | ۰/۱۲ | ۰/۳۲ | ۰/۳۶ | ۰/۲۸ | ۰/۳۹ | ۰/۳۹ |
| فریمان | ۰/۷۷ | ۰/۵۲ | ۰/۶۱ | ۰/۰۵ | ۰/۵۹ | ۰/۵۸ | ۰/۵۸ | ۰/۵۸ |
| قوچان | ۰/۷۸ | ۰/۶۷ | ۰/۵۷ | ۰/۲۰ | ۰/۶۹ | ۰/۷۰ | ۰/۶۵ | ۰/۶۶ |
| کاشمر | ۰/۱۲ | ۰/۳۹ | −۰/۲۲ | ۰/۱۹ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۰۳ | ۰/۰۳ |
| گلمکان | ۰/۸۶ | ۰/۸۷ | ۰/۸۵ | ۰/۸۳ | ۰/۷۹ | ۰/۷۸ | ۰/۸۲ | ۰/۸۱ |
| گناباد | ۰/۷۴ | ۰/۸۳ | ۰/۶۹ | ۰/۴۵ | ۰/۷۵ | ۰/۷۷ | ۰/۷۰ | ۰/۷۱ |
| مشهد | ۰/۷۶ | ۰/۸۶ | ۰/۷۷ | ۰/۸۲ | ۰/۷۶ | ۰/۷۳ | ۰/۷۹ | ۰/۷۹ |
| نیشابور | ۰/۸۰ | ۰/۸۲ | ۰/۸۵ | ۰/۶۸ | ۰/۸۴ | ۰/۸۳ | ۰/۸۴ | ۰/۸۴ |

مقادیر ضریب ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده 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 تربت‌جام، 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 آبتیو، در شهرستان قوچان در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتیو و جنسن هیز، در شهرستان‌های کاشمر و نیشابور در تمامی روش‌ها به‌جز پرستلی تیلور، لیناکر و مک گوئینز و بورنه، در شهرستان گلمکان در روش هارگریوز سامانی، در شهرستان گناباد در روش‌های جنسن هیز، آبتیو و هارگریوز سامانی، در شهرستان مشهد در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و آبتیو به‌دست آمد. در بقیه شهرستان‌ها مقدار این شاخص بالاتر از ۰/۲ به‌دست آمد به‌طوری‌که در شهرستان خواف کمترین مقدار این شاخص در روش لیناکر، در شهرستان تربت‌حیدریه در روش آبتیو، در شهرستان سبزوار در روش‌های هارگریوز سامانی و هامون، در شهرستان فریمان در روش هارگریوز سامانی به دست آمدند.

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

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

| ایستگاه | $ET_{HS}$ | $ET_{HAM}$ | $ET_{PT}$ | $ET_{LIN}$ | $ET_{MAK}$ | $ET_{ABT}$ | $ET_{JH}$ | $ET_{MB}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تربت‌جام | ۰/۳۴ | ۰/۳۹ | ۰/۴۷ | ۰/۱۸ | ۰/۳۸ | ۰/۳۲ | ۰/۲۷ | ۰/۵۳ |
| تربت‌حیدریه | ۰/۲۵ | ۰/۲۸ | ۰/۳۴ | ۰/۷۰ | ۰/۲۸ | ۰/۲۲ | ۰/۲۳ | ۰/۴۸ |
| خواف | ۰/۴۶ | ۰/۴۴ | ۰/۶۳ | ۰/۳۱ | ۰/۶۰ | ۰/۵۸ | ۰/۴۸ | ۰/۶۷ |
| درگز | ۰/۱۱ | ۰/۱۴ | ۰/۳۹ | ۰/۷۹ | ۰/۳۸ | ۰/۳۴ | ۰/۲۹ | ۰/۴۸ |
| سبزوار | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰/۵۳ | ۰/۵۰ | ۰/۴۸ | ۰/۴۴ | ۰/۳۸ | ۰/۵۹ |
| سرخس | ۰/۱۴ | ۰/۱۴ | ۰/۳۵ | ۰/۵۴ | ۰/۲۵ | ۰/۲۰ | ۰/۱۱ | ۰/۳۷ |
| فریمان | ۰/۲۴ | ۰/۴۲ | ۰/۴۹ | ۰/۴۴ | ۰/۴۹ | ۰/۴۵ | ۰/۴۶ | ۰/۶۳ |
| قوچان | ۰/۱۵ | ۰/۲۶ | ۰/۲۹ | ۰/۵۴ | ۰/۲۱ | ۰/۱۶ | ۰/۱۹ | ۰/۴۴ |
| کاشمر | ۰/۱۵ | ۰/۱۳ | ۰/۳۰ | ۰/۹۷ | ۰/۱۸ | ۰/۱۶ | ۰/۱۹ | ۰/۳۳ |
| گلمکان | ۰/۱۶ | ۰/۲۹ | ۰/۳۷ | ۰/۶۷ | ۰/۳۲ | ۰/۲۷ | ۰/۲۵ | ۰/۴۹ |
| گناباد | ۰/۱۹ | ۰/۲۱ | ۰/۳۶ | ۰/۸۲ | ۰/۲۴ | ۰/۱۹ | ۰/۱۶ | ۰/۳۹ |
| مشهد | ۰/۱۷ | ۰/۲۱ | ۰/۳۲ | ۰/۴۹ | ۰/۲۶ | ۰/۲۰ | ۰/۱۸ | ۰/۴۴ |
| نیشابور | ۰/۱۵ | ۰/۱۷ | ۰/۲۳ | ۰/۷۶ | ۰/۱۴ | ۰/۱۳ | ۰/۱۳ | ۰/۳۵ |

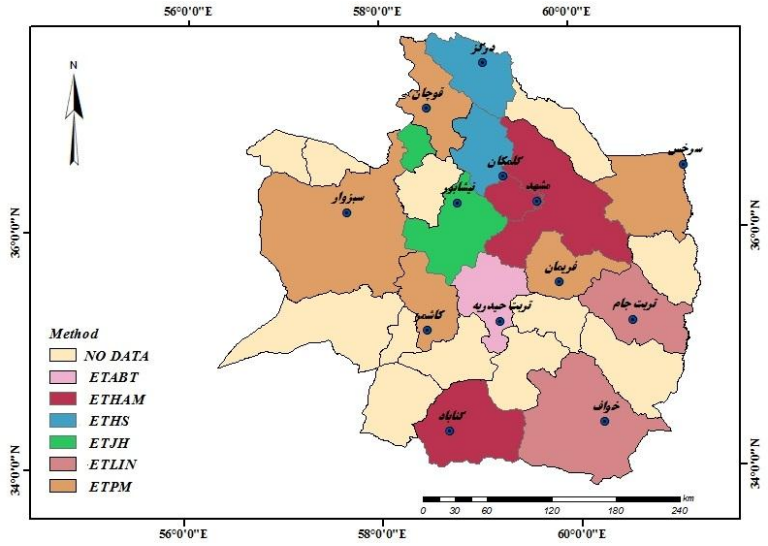
[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

مقادیر شاخص خطای 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 ۰/۲ قرار گیرد و هر چه به صفر نزدیک‌تر گردد مقدار مطلوب‌تری را نشان می‌دهد. همچنان که در جدول ۷ نشان داده‌شده است. در شهرستان تربت‌جام و خواف بهترین مقدار این شاخص در روش لیناکر، در شهرستان تربت‌حیدریه، مشهد و سرخس در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتیو، جنسن هیز و هامون، در شهرستان‌های قوچان، کاشمر و گناباد در روش‌های هارگریوز سامانی، آبتیو، جنسن هیز، ماکینگ و هامون، در شهرستان‌های سبزوار در روش‌های هارگریوز سامانی و هامون، در شهرستان درگز در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و هامون، در شهرستان گلمکان در روش‌های هارگریوز سامانی، جنسن هیز و آبتیو، در شهرستان نیشابور در تمام روش‌ها به‌جز لیناکر و مک گوئینز و بورنه به دست آمد. در شهرستان فریمان شاخص قدر مطلق نسبی خطا در هیچ‌کدام از روش‌ها کمتر از ۰/۲ به دست نیامد. کمترین مقدار این شاخص در این شهرستان در روش هارگریوز سامانی به میزان ۰/۲۳ حاصل شد. در شکل ۲ نقشه روش‌های مناسب تبخیر و تعرق در مقیاس سالانه در نواحی مورد مطالعه آورده شده است.

جدول ۷- مقادیر خطای نسبی سالانه در ایستگاه‌های سینوپتیک

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

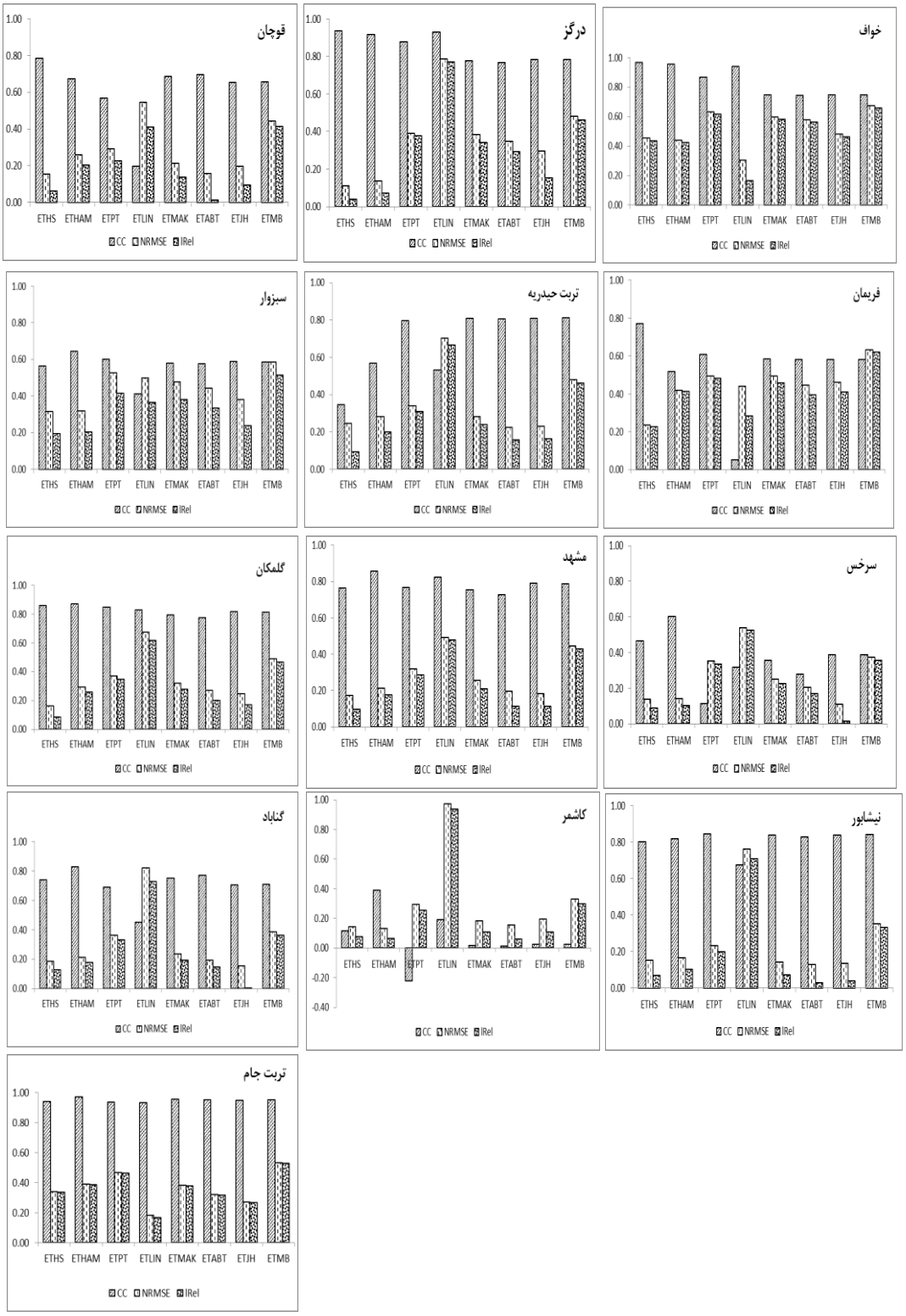
| ایستگاه | $ET_{HS}$ | $ET_{HAM}$ | $ET_{PT}$ | $ET_{LIN}$ | $ET_{MAK}$ | $ET_{ABT}$ | $ET_{JH}$ | $ET_{MB}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| تربت‌جام | -۰/۳۳ | -۰/۳۹ | -۰/۴۶ | ۰/۱۷ | -۰/۳۸ | -۰/۳۲ | -۰/۲۷ | -۰/۵۳ |
| تربت‌حیدریه | -۰/۰۹ | -۰/۲۰ | -۰/۳۱ | ۰/۶۷ | -۰/۲۴ | -۰/۱۶ | -۰/۱۶ | -۰/۴۶ |
| خواف | -۰/۴۴ | -۰/۴۲ | -۰/۶۲ | ۰/۱۷ | -۰/۵۸ | -۰/۵۶ | -۰/۴۶ | -۰/۶۶ |
| درگز | -۰/۰۴ | -۰/۰۷ | -۰/۳۸ | ۰/۷۷ | -۰/۳۴ | -۰/۲۹ | -۰/۱۵ | -۰/۴۶ |
| سبزوار | -۰/۲۰ | -۰/۲۰ | -۰/۴۲ | ۰/۳۷ | -۰/۳۸ | -۰/۳۳ | -۰/۲۴ | -۰/۵۱ |
| سرخس | -۰/۰۹ | -۰/۱۰ | -۰/۳۳ | ۰/۵۲ | -۰/۲۲ | -۰/۱۷ | ۰/۰۲ | -۰/۳۶ |
| فریمان | -۰/۲۳ | -۰/۴۱ | -۰/۴۸ | ۰/۲۸ | -۰/۴۶ | -۰/۴۰ | -۰/۴۱ | -۰/۶۲ |
| قوچان | -۰/۰۶ | -۰/۲۰ | -۰/۲۳ | ۰/۴۱ | -۰/۱۴ | -۰/۰۱ | -۰/۰۹ | -۰/۴۱ |
| کاشمر | -۰/۰۸ | -۰/۰۶ | -۰/۲۵ | ۰/۹۳ | -۰/۱۰ | -۰/۰۶ | ۰/۱۱ | -۰/۳۰ |
| گلمکان | -۰/۰۸ | -۰/۲۶ | -۰/۳۵ | ۰/۶۲ | -۰/۲۸ | -۰/۲۰ | -۰/۱۷ | -۰/۴۷ |
| گناباد | -۰/۱۳ | -۰/۱۸ | -۰/۳۳ | ۰/۷۳ | -۰/۱۹ | -۰/۱۵ | ۰/۰۰۳ | -۰/۳۶ |
| مشهد | -۰/۱۰ | -۰/۱۸ | -۰/۲۹ | ۰/۴۸ | -۰/۲۱ | -۰/۱۱ | -۰/۱۱ | -۰/۴۳ |
| نیشابور | -۰/۰۷ | -۰/۱۰ | -۰/۲۰ | ۰/۷۱ | -۰/۰۷ | ۰/۰۳ | ۰/۰۴ | -۰/۳۳ |




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

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]




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

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

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 بنیادی‌ترین 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 تجزیه‌وتحلیل آماری جداول ۷-۴، 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 به‌دست آمد، به‌نظر می‌رسد که نتوان از هیچ‌یک از این روش‌ها به‌عنوان روش جایگزین فائو پنمن مانتیث 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 توسعه‌یافته‌اند. به‌همین دلیل در مناطق مختلف و آب‌وهوای متغیر هرکدام از آن‌ها نتایج متفاوتی خواهند 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. ازآنجاکه این پارامتر به‌غیراز روش فائو پنمن مانتیث در هیچ‌یک از روش‌های دیگر به‌صورت مستقیم وارد نمی‌گردد شاید بتوان آن را یکی از مهم‌ترین دلایل کاهش ضریب همبستگی و عملکرد ضعیف مدل‌ها نسبت به‌روش فائو پنمن مانتیث دانست. لانگ و همکاران (۱۶) نیز در مطالعات خود در مقیاس سالانه در بعضی از مناطق مورد مطالعه ضریب همبستگی بسیار پایینی به‌دست آوردند که آن را به توپوگرافی پیچیده، تغییرپذیری آب‌وهوا در این مناطق مرتبط دانستند.

در بقیه مناطق مورد مطالعه به‌جای روش فائو پنمن مانتیث 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 خواف و تربت‌جام، روش هامون در شهرستان‌های گناباد و مشهد، روش جنسن هیز در شهرستان نیشابور و روش آبتیو در شهرستان تربت‌حیدریه استفاده نمود. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش‌های مبتنی‌بر درجه حرارت (مانند هارگریوز سامانی، هامون و لیناکر) در بیشتر مناطق این استان کارایی بالاتری نسبت به روش‌های مبتنی‌بر تابش (جنسن هیز و آبتیو) دارند، که این نتیجه با یافته‌های سایر محققان در مناطق خشک و دارای بادهایی با سرعت‌های بالا مشابهت دارد (۴، ۳۰، ۳۱). در بین روش‌های مبتنی‌بر تابش فقط روش جنسن هیز و آبتیو در مناطق مرکزی این استان نتایج خوبی را از خود نشان دادند این دو روش خطای کمتر و همبستگی بیشتری با روش فائو پنمن مانتیث نشان دادند. روش‌های مبتنی‌بر درجه حرارت در نواحی شمالی، شرقی و جنوب شرقی این استان نتایج قابل‌قبول‌تری 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 اعتبارسنجی در مناطق مختلف دارند.

مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع با ۸ روش مختلف با روش فائو پنمن مانتیث در مقیاس سالانه مقایسه گردید. نتایج نشان داد که به‌جای روش فائو پنمن مانتیث در مقیاس سالانه می‌توان از روش هارگریوز سامانی در شهرستان‌های درگز و گلمکان، از روش لیناکر در شهرستان‌های خواف و تربت‌جام، از روش هامون در شهرستان‌های گناباد و مشهد، از روش جنسن هیز در شهرستان نیشابور و از روش آبتیو در شهرستان تربت‌حیدریه استفاده نمود و در شهرستان‌های کاشمر، سبزوار، سرخس، فریمان و قوچان بهترین روش در مقیاس سالانه، روش فائو پنمن مانتیث 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 اجراشده از محل اعتبارات معاونت پژوهشی مجتمع آموزش عالی کشاورزی و دامپروری تربت‌جام می‌باشد. بدین‌وسیله از حمایت مالی این مجتمع تقدیر و تشکر می‌گردد.

## 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-Ghobari, 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 ofseveral 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: Guidelinse for Computing Crop Water Requirements. Fao Irrigation and Drainage, FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nations Rome: 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.

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

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. Makkink, 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. Akbari and Y. 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. Badieheneshin 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 ETo 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. Dehghanisanij. 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.
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.


[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

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

**Zahra Shirmohammadi-Aliakbarkhani[1], Seyed Farhad Saberali[2] and Mansoureh Kouhi[3]**

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

[ Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-02 ]
[ DOR: 20.1001.1.22516174.1399.11.22.2.8 ]
[ DOI: 10.52547/jwmr.11.22.199 ]

**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, Northestern Iran, Potential Evapotranspiration, Radiation, Temperature