Climatic Assessment of FAO WaPOR Reference Evapotranspiration Product

Fatemeh Khayat[1], **Seyed Majid Mirlatifi** [2✉], **Hossein Shafizadeh-Moghadam**[3], **Seyed Hasan Tabatabaii** [4]

1. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: fatemehkhayat@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: mirlat_m@modares.ac.ir
3. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: h_shafizadeh@modares.ac.ir
4. Department of Water Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: hasan.tabatabaii@gmail.com

ABSTRACT

This study evaluates the accuracy and performance of the FAO WaPOR version 2 model product for reference evapotranspiration ($ET_{0\ WaPOR}$) in comparison with corresponding estimates derived from the FAO Penman-Monteith equation using meteorological station data across various climate zones in Iran. A total of 42 stations located in northern and northeastern provinces of the country, with recorded data from 2009 to 2022, were selected for the analysis. Comparisons were conducted at daily, dekadal, and monthly time scales. To assess the role of climate, regions were classified based on the UNEP aridity index. Furthermore, the impact of radiative and convective components on evapotranspiration estimation accuracy in the WaPOR model was investigated. Results showed that the WaPOR model performed well in arid and semi-arid climates, with an average R^2 of 0.91 and an average nRMSE of approximately 20%. In contrast, in humid and sub-humid climates, the R^2 and nRMSE were 0.83 and 26%, respectively. The model's bias was negative in arid climates and positive in humid ones, indicating overestimation under humid conditions. Additionally, the analysis of the radiative and convective contributions to evapotranspiration estimation revealed that model accuracy decreased with increasing radiative dominance, particularly in humid regions. Overall, the WaPOR model, based on remote sensing, can be considered a reliable tool for irrigation planning in arid and semi-arid regions, especially during the wheat growing season. However, its performance in humid climates requires further optimization.

Introduction:

Water is a fundamental agricultural input and the most limiting factor for production in arid and semi-arid regions. In Iran, with its diverse climatic zones, water resources are under increasing pressure due to population growth, reduced per capita water availability, and the intensification of agricultural activities. Inefficient water use and irrigation practices exacerbate these challenges, making it essential to optimize irrigation systems for sustainable water management. Reference evapotranspiration (ET_0) plays a critical role in estimating crop water requirements, influencing irrigation scheduling and water resource management. The FAO Penman-Monteith equation, widely recognized as the most accurate method for ET_0 estimation, requires extensive meteorological data that may not always be readily available. This limitation has led to the use of satellite-based data, such as those provided by the WaPOR platform, which offers free, daily ET_o data with a 20 km spatial resolution since 2009. This study aims to assess the performance of WaPOR's ET_o data by comparing it with ground-based measurements across various climatic zones in Iran, providing insights into its potential for improving water management in agriculture.

Method:

This study was conducted in six northern and northeastern provinces of Iran, including Gilan, Mazandaran, Golestan, Semnan, North Khorasan, and Razavi Khorasan, which have diverse climates and rainfall amounts. Meteorological data, including minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, sunshine hours, and precipitation, were collected from 42 synoptic stations in the region over a 14-year period (2009–2022). The Aridity Index (AI) for each station was calculated using the FAO Penman-Monteith equation, and the climates were classified into humid, semi-humid, dry semi-humid, dry, and semi-arid categories. Additionally, reference evapotranspiration (ET_o WaPOR) data from the WaPOR platform with a 20 km spatial resolution were obtained for further analysis. These data were extracted on a daily, ten-day, and monthly basis and compared with station data to assess the accuracy and performance of $ET_{o\ WaPOR}$. To balance the results, four stations from each climate zone were selected and analyzed. Moreover, the radiative and convective components of ET_o were calculated to distinguish between dry and humid climates. Finally, reference evapotranspiration ($ET_{o\ WaPOR}$) data during the wheat and rice growing seasons were analyzed to evaluate the accuracy of the WaPOR model using four statistical indices, including (R^2), (RMSE), (nRMSE), and (MBE).

Results:

The results of the study indicate that the performance of the $ET_{o\ WaPOR}$ product in estimating reference evapotranspiration (ET_o) is influenced by climatic conditions. At different time scales, especially the daily scale, the correlation between WaPOR data and station values is generally high, but this correlation is higher in dry climates compared to humid climates. In dry climates, the coefficient of determination (R^2) was on average 0.86, and the nRMSE was around 25%, whereas in humid climates, these values decreased to 0.82 and 39%, respectively. These differences emphasize the importance of considering climatic characteristics when using remote sensing products. Additionally, the bias error analysis indicates that in humid climates, WaPOR tends to overestimate values, and this tendency increases with higher humidity in the climate.

Conclusion:

The results of this study indicate that the WaPOR model performs better, especially in dry and semi-arid regions, and shows higher accuracy in estimating reference evapotranspiration (ET_o) at longer time scales, such as the monthly scale. This improved performance is due to the reduction of short-term fluctuations and sampling errors at larger time scales. However, in more humid climates, the WaPOR model requires further adjustments, as the correlation between satellite data and ground-based values decreases and errors increase. Specifically, in more humid climates with higher radiative flux, the model's accuracy decreases, whereas in drier climates with higher convective flux, the model's accuracy improves. These findings emphasize that the WaPOR model requires bias correction and model optimization in humid regions. Furthermore, the results suggest that for the effective use of WaPOR data in management and agricultural studies, emphasis on regional accuracy and bias correction is essential, especially in humid climates where overestimation tendencies exist. Ultimately, this research can serve as a foundation for designing more accurate models to predict evapotranspiration under different climatic conditions and demonstrates that the WaPOR model is a suitable tool for irrigation planning in dry and semi-arid regions, but requires further optimization in humid areas.

Author Contributions:

F.K: Data preparation and review, software programming, resource provision, results interpretation, writing the original draft, visualization, and project management. **S.H.T:** Methodology design, formal analysis and data investigation, final review. **S.M.M:** Results interpretation, review, and editing and supervision. **H.S.M:** Manuscript review, results interpretation.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

This paper is published as part of a Master's thesis at Tarbiat Modares University, Iran. The authors would like to thank the Iranian Meteorological Organization for their valuable collaboration and support.

Ethical considerations:

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this manuscript. In addition, the ethical issues, including plagiarism, informed consent, misconduct, data fabrication and/or falsification, double publication and/or submission, and redundancies have been fully observed by the authors.

Conflict of interest:

The authors declare no conflict of interest.

ارزیابی اقلیمی محصول تبخیر–تعرق مرجع WaPOR فائو

فاطمه خیاط[1] | سید مجید میرلطیفی✉ | حسین شفیع‌زاده مقدم[3] | سید حسن طباطبایی[4]

۱. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: fatemehkhayat@modares.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: mirlat_m@modares.ac.ir

۳. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: h_shafizadeh@modares.ac.ir

۴. گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: h.tabatabaii@modares.ac.ir

چکیده

این پژوهش به ارزیابی دقت و عملکرد محصول تبخیر–تعرق مرجع مدل WaPOR نسخه ۲ فائو ($ET_{o\ WaPOR}$) در مقایسه با مقادیر متناظر برآورد شده بر پایه معادله فائو پنمن–مانتیث و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی در اقلیم‌های مختلف ایران می‌پردازد. ۴۲ ایستگاه در استان‌های شمال و شمال شرق ایران، که دارای داده‌های ثبت شده از سال ۲۰۰۹ الی ۲۰۲۲ بودند، انتخاب شدند و مقایسه‌ها در سه مقیاس زمانی روزانه، ده‌روزه و ماهانه انجام گرفت. به منظور تحلیل نقش اقلیم، طبقه‌بندی مناطق بر اساس شاخص خشکی UNEP صورت گرفت. همچنین، تأثیر سهم تابشی و انتقال همرفتی در فرایند تبخیر–تعرق بر دقت برآوردهای مدل WaPOR مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل WaPOR در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک عملکرد مطلوبی داشته و میانگین شاخص R^2 برابر با ۰/۹۱ و میانگین nRMSE حدود ۲۰ درصد به دست آمد، در حالی‌که در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب شاخص‌های R^2 و nRMSE به‌ترتیب ۰/۸۳ و ۲۶ درصد بودند. همچنین خطای اریب مدل در اقلیم‌های خشک منفی و در اقلیم‌های مرطوب مثبت بود که نشان‌دهنده بیش‌برآورد در شرایط مرطوب است. بررسی سهم تابشی و همرفتی در برآورد تبخیر–تعرق نیز نشان داد با افزایش سهم تابشی (ویژه مناطق مرطوب)، دقت مدل کاهش می‌یابد. در مجموع، مدل WaPOR با تکیه بر سنجش از دور می‌تواند در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه برای برنامه‌ریزی آبیاری در فصل رشد گندم، ابزار مناسبی تلقی شود، اما در اقلیم‌های مرطوب نیازمند بهینه‌سازی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: *اقلیم، سنجش از دور، شاخص خشکی UNEP، معادله فائو پنمن مانتیث، محصولات تبخیر–تعرق*

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب یکی از اساسی‌ترین نهاده‌های مورد نیاز برای تولیدات کشاورزی و در عین حال مهم‌ترین عامل محدودکننده‌ی آن به شمار می‌رود. روند فزاینده‌ی رشد جمعیت، کاهش سرانه‌ی آب و فشار مضاعف بر منابع آبی، برنامه‌ریزی برای استفاده‌ی بهینه از آب در بخش کشاورزی را به ضرورتی انکارناپذیر تبدیل کرده است (Xie et al., 2018). افزایش بهره‌وری مصرف آب از طریق بهینه‌سازی زمان و عمق آبیاری، می‌تواند به طور مستقیم منجر به کاهش برداشت یا افزایش عملکرد در واحد آب مصرفی شود (Yue et al., 2025).

برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان، گامی کلیدی در طراحی سامانه‌های آبیاری و مدیریت منابع آب است. شاخص تبخیر–تعرق مرجع (ET_0)، به عنوان معیار پایه در این محاسبات، به‌شدت به شرایط اقلیمی وابسته است و دقت آن نقش تعیین‌کننده‌ای در تحلیل بیلان آب و مطالعات کشاورزی–اقلیمی دارد (Xiang et al., 2020؛ Samani, 2000). در میان روش‌های موجود، معادله‌ی فائو پنمن–مانتیث به عنوان دقیق‌ترین روش جهانی در اقلیم‌های مختلف شناخته می‌شود (Allen et al., 1998)، مطالعات متعددی در ایران نیز کاربرد معادله پنمن–مانتیث را در اقلیم‌های مختلف کشور تایید کرده‌اند (Shirmohammadi-Aliakbarkhani & Saberali, 2020; Nazari et al., 2020; Farzanpour et al., 2019). با این حال، اجرای آن نیازمند داده‌های کامل هواشناسی مانند تابش خورشیدی، دمای هوا، رطوبت نسبی و سرعت باد است؛ داده‌هایی که به دلیل محدودیت ایستگاه‌های هواشناسی، هزینه‌بر بودن، یا عدم دسترسی عمومی، در بسیاری از مناطق در دسترس نیستند. با پیشرفت فناوری سنجش از دور، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان راهکاری جایگزین برای برآورد ET_0 مطرح شده است. پایگاه WaPOR ، از جمله سامانه‌های توسعه یافته در این حوزه است که داده‌های ET_0 را از سال ۲۰۰۹ با تفکیک مکانی ۲۰ کیلومتر و به‌صورت روزانه و رایگان ارائه می‌دهد (FAO, 2020b).

روش پنمن–مانتیث به طور گسترده به عنوان استاندارد جهانی برای برآورد ET_0 شناخته می‌شود. این معادله، اثرات تابش خالص، دما، رطوبت نسبی و سرعت باد را به‌صورت یکپارچه در قالب یک مدل فیزیکی–آیرودینامیکی در نظر می‌گیرد. نسبت به روش‌های قدیمی‌تر مانند بلانی–کلیدر و هارگریوز، روش پنمن–مانتیث دقت بالاتری دارد و وابستگی کمتری به شرایط محلی نشان می‌دهد. به همین دلیل، این معادله به‌عنوان روش مرجع بین‌المللی برای محاسبه ET_0 پذیرفته شده و امکان مقایسه‌پذیری نتایج در مناطق و اقلیم‌های مختلف را فراهم می‌کند.(Allen et al., 1998)

مطالعات مقایسه‌ای بین پنمن–مانتیث و مدل‌های ساده‌تر نیز کارایی بالای این روش را تأیید می‌کنند. در مطالعه‌ای در تبریز، پنمن–مانتیث نسبت به روش هارگریوز دارای RMSE حدود ۱/۰۷ میلی‌متر در روز و خطای مطلق تقریباً ۲۰ درصد کمتر بود (Abedi-Koupai et al., 2022). همچنین، در حوضه آمل، اختلاف ET_0 محاسبه‌شده با پنمن–مانتیث و مقادیر لایسیمتر تنها حدود ۴ الی ۵ درصد گزارش شده است (Zareabayneh et al., 2011). این شواهد نشان می‌دهد که پنمن–مانتیث نه تنها دقیق و معتبر است، بلکه قابلیت تعمیم نتایج به استان‌ها و اقلیم‌های مختلف ایران را نیز داراست و می‌تواند به عنوان مبنای قابل اعتماد برای مطالعات هیدرولوژیک و مدیریت منابع آب مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی دقت داده‌های تبخیر–تعرق مرجع پایگاه داده WaPOR ($ET_{0\ \mathrm{WaPOR}}$) در برآورد تبخیر–تعرق مرجع (ET_0) انجام شده است. در این راستا، داده‌های $ET_{0\ \mathrm{WaPOR}}$ طی دوره‌ی زمانی ۲۰۰۹ الی ۲۰۲۲ با داده‌های محاسبه شده از معادله‌ی فائو پنمن–مانتیث ($ET_{0\ \mathrm{Stations}}$)، بر اساس اطلاعات ۴۲ ایستگاه سینوپتیک کشور واقع در استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، خراسان شمالی، خراسان رضوی و سمنان مقایسه گردید. انتخاب این استان‌ها با هدف پوشش طیف وسیعی از اقلیم‌های ایران انجام شده و ایستگاه‌ها بر اساس شاخص خشکی UNEP در پنج گروه اقلیمی (خشک، نیمه‌خشک، خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و مرطوب) طبقه بندی شدند. انتخاب ۴۲ ایستگاه با هدف پوشش تمامی گروه‌های اقلیمی صورت گرفته است تا امکان تعمیم این‌داده‌ها به سایر نقاط کشور نیز میسر شود. ارزیابی دقت $ET_{0\ \mathrm{WaPOR}}$ برای هر اقلیم به صورت جداگانه و در سه مقیاس زمانی روزانه، ده‌روزه و ماهانه با استفاده از شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2) ، خطای نسبی (nRMSE) و خطای اریب (MBE) انجام شد. همچنین، برای تحلیل دقیق‌تر، درصد مشارکت اجزای تابشی و همرفتی از کل مقدار ET_0 برای هر ایستگاه استخراج و با استفاده از شاخص R^2 بررسی

شد تا دقت مدل WaPOR در شرایط اقلیمی مختلف مشخص گردد. تحلیل هم‌زمان سهم اجزای تابشی و همرفتی در ساختار ET_0 و ارتباط آن با دقت مدل WaPOR یکی از جنبه‌های نوآورانه این مطالعه محسوب می‌شود که در ادبیات علمی پیشین مورد توجه قرار نگرفته است. علاوه بر این، دقت داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ در طول دوره‌ی رشد دو محصول گندم (در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک) و برنج (در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب) به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفت.

پیشینه پژوهشی

در سال‌های اخیر، استفاده از داده‌های سنجش از دور برای برآورد ET_0 به دلیل پوشش مکانی گسترده و در دسترس بودن در مناطق فاقد داده‌های زمینی، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. یکی از مهم‌ترین پایگاه‌های داده در این زمینه، پایگاه WaPOR سازمان فائو است که در مطالعات متعددی در ایران ارزیابی شده است.

مطالعات متعددی دقت داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ را با داده‌های $ET_{0\ Stations}$ مقایسه کرده‌اند. باریده و ویسی (۱۴۰۰) داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ را با داده‌های ۲۴ ایستگاه هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه طی بازه زمانی ۱۳۸۹ الی ۱۳۹۸ در مقیاس‌های روزانه و ماهانه مقایسه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقدار میانگین nRMSE در بررسی روزانه و ماهانه ET_0 به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۵ و مقدار میانگین R^2 به ترتیب ۰/۹۰ و ۰/۹۷ بوده است. کماجیان (۱۴۰۱) نیز در استان قزوین نتایجی مشابه گزارش داد و میانگین R^2 روزانه بین داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ و $ET_{0\ Stations}$ را برابر ۰/۹ به‌دست آورد. همچنین در مقیاس ماهانه خطای مطلق میانگین ۲۳/۹۲ میلی‌متر و شاخص توافق ۰/۹۵ به‌دست آمد. پژوهشگر مذکور اظهار داشت از داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ می‌توان در شرایط نبود داده‌ی کافی به عنوان جایگزین داده‌های مشاهده‌ای استفاده کرد. گروهی دیگر از پژوهش‌ها به بررسی عملکرد WaPOR در مناطق خشک و کم‌داده پرداختند. گله‌بان و همکاران (۱۴۰۱) در استان سیستان و بلوچستان نشان دادند که داده‌های $ET_{0\ WaPOR}$ محصول WaPOR با میانگین کلی بالای R^2 برابر ۰/۶۹ توانسته‌اند ET_0 را در این منطقه برآورد کنند و ضریب تعیین در برخی ایستگاه‌ها تا ۰/۸۳ نیز رسیده است. این مطالعه همچنین گزارش کرد که در فصل زراعی گرم (۱۵ خرداد تا ۱۵ آبان)، همبستگی بیشتری میان داده‌های WaPOR و مشاهدات زمینی وجود دارد. در همین راستا، Fakhar et al. (2024) عملکرد WaPOR را در اقلیم‌های مختلف کشور ارزیابی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که بیشترین دقت روزانه ET_{0WaPOR} در مناطق نیمه‌خشک با R^2 برابر ۰/۹۵ و RMSE برابر ۰/۴۳ حاصل شد، در حالی‌که در اقلیم مرطوب دقت به R^2 برابر ۰/۶۹ و RMSE برابر ۰/۹۵ کاهش یافت. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که دقت ET_{0WaPOR} در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم‌های مرطوب است.

مطالعات دیگری نیز عملکرد WaPOR را در مقایسه با سایر پایگاه‌های داده ارزیابی کرده‌اند. ویسی و همکاران (۲۰۲۳) داده‌های WaPOR و ERA5 را در ۶۴ ایستگاه واقع در حوضه دریای خزر مقایسه کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که WaPOR اغلب ET_0 را بیش‌برآورد کرده، در حالی که ERA5 آن را کمتر از مقدار واقعی تخمین زده است؛ با این حال ترکیب دو پایگاه می‌تواند برآورد دقیق‌تری فراهم کند. به طور مشابه، Veysi et al., (2024) در ارزیابی سه پایگاه داده ERA5، ERA5-Land و WaPOR در مناطق جنوبی کشور دریافتند که هیچ‌یک از داده‌ها به تنهایی برای همه ایستگاه‌ها دقت لازم را ندارند، اما عملکرد WaPOR در مناطق کوهستانی با توپوگرافی ناهمگن مطلوب‌تر بوده است.

در برخی مطالعات، داده‌های WaPOR به عنوان ورودی در روش‌های ترکیبی به‌کار رفته‌اند. Golabi et al. (2020) با استفاده از داده‌های WaPOR، عملکرد دو روش کوهلی–فرنکن (KF) و نسخه اصلاح‌شده آن (MKF) را برای برآورد تبخیر از مخازن در ۱۷ ایستگاه در ایران بررسی کردند. ضرایب معادله MKF در این پژوهش برای تمامی ایستگاه‌ها دارای R بیشتر از ۰/۸۷ بودند و بهبود عملکرد روش KF با استفاده از WaPOR بین ۰/۱۱ تا ۲۸/۹ درصد گزارش شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های WaPOR با مدل‌های تجربی می‌تواند موجب افزایش دقت در تخمین تبخیر شود.

در مطالعه‌ای دیگر، Geshnigani et al. (2021) دقت ET_{0WaPOR} روزانه را با روش‌های پنمن–مانتیث و هارگریوز مقایسه کرده و با استفاده از ET_0 برآورد شده فائو پنمن مانتیث به عنوان مرجع، مقدار R^2 برابر ۰/۹۷ برای WaPOR گزارش کردند که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای آن در مقایسه با سایر روش‌ها است. همچنین، Barideh et al. (2022) با استفاده از داده‌های لایسیمتری در ایستگاه‌های

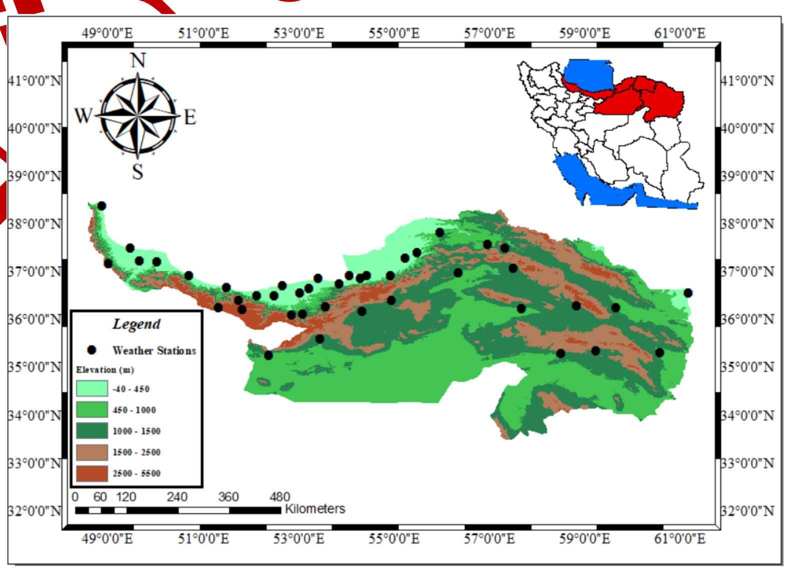
خسروشهر و کهریز، نشان دادند که WaPOR به‌طور متوسط ۱۵ درصد بیش‌برآورد دارد و دقت آن به‌ویژه به دمای حداکثر، سرعت باد و ساعات آفتابی وابسته است. آن‌ها پیشنهاد کردند که برای افزایش دقت، از داده‌های هواشناسی با وضوح بالاتر مانند ERA5-Land استفاده شود.

در مجموع، مرور پژوهش‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که داده‌های ET_{0WaPOR} در اغلب مناطق ایران از دقت مناسبی برای برآورد تبخیر–تعرق مرجع برخوردارند و می‌توانند در شرایط کمبود داده‌های زمینی به‌عنوان جایگزینی قابل اعتماد مورد استفاده قرار گیرند. با این حال، بیشتر مطالعات پیشین به ارزیابی این داده‌ها در بازه‌های زمانی محدود، تعداد معدودی از ایستگاه‌ها یا تنها در یک یا چند اقلیم خاص پرداخته‌اند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ، به بررسی جامع دقت داده‌های تبخیر–تعرق مرجع WaPOR نسخه دوم طی دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ در ۴۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در شش استان شمالی و شرقی کشور می‌پردازد. این مطالعه با در نظر گرفتن تنوع اقلیمی (پنج گروه اقلیمی بر اساس شاخص خشکیUNEP) و مقیاس‌های زمانی مختلف (روزانه، ده‌روزه و ماهانه)، تلاش می‌کند تا تصویری دقیق‌تر از عملکرد WaPOR در شرایط اقلیمی گوناگون ارائه دهد. همچنین با تحلیل اجزای تابشی و همرفتی ET_0 و ارزیابی دقت WaPOR در طول فصل رشد دو محصول شاخص گندم و برنج به درک بهتر عملکرد این پایگاه داده در شرایط اقلیمی مختلف کمک کرده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد بررسی

محدوده مطالعاتی شامل استان‌های گیلان، مازندران، گلستان، سمنان، خراسان شمالی و خراسان رضوی می‌باشد که در شمال و شمال شرق ایران واقع شدند. وسعت این شش استان به ترتیب (استان‌های گیلان، گلستان، مازندران، خراسان شمالی، سمنان و خراسان رضوی) ۱۴۰۴۲، ۲۰۳۶۷ ، ۲۳۸۴۲ ، ۲۸۴۳۴، ۹۷۴۹۱ و ۱۱۸۸۵۱ کیلومتر مربع و میزان بارش سالانه این شش استان به ترتیب حدود ۱۳۰۶، ۵۱۴، ۶۷۳، ۲۰۱، ۱۰۹ و ۱۶۳ میلی‌متر می‌باشد. به منظور محاسبه ET_0 و شاخص خشکی سازمان ملل متحد در ایستگاه‌های مذکور، داده‌های هواشناسی روزانه شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، میانگین سرعت باد، ساعت آفتابی و بارش از ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه برای یک دوره ۱۴ ساله (۲۰۲۲–۲۰۰۹) از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. پراکندگی ۴۲ ایستگاه سینوپتیک مورد استفاده در این پژوهش در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱– پراکندگی ۴۲ ایستگاه هواشناسی مورد استفاده

شاخص خشکی سازمان ملل متحد

شاخص خشکی (Aridity Index) توسط برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد (UNEP)، یکی از پر کاربردترین شاخص‌ها در ارزیابی شرایط اقلیمی در مناطق جغرافیایی مختلف، به صورت نسبت بارندگی سالانه به تبخیر–تعرق مرجع سالانه، که در این پژوهش از معادله فائو پنمن مانتیث استفاده شد، تعریف شده است (رابطه ۱). این شاخص یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها در ارزیابی شرایط اقلیمی در مناطق مختلف جغرافیایی است و مناطق را از منظر اقلیمی به شش دسته فرا خشک، خشک، نیمه خشک، خشک نیمه مرطوب، نیمه مرطوب و مرطوب طبقه‌بندی می‌کند (جدول ۱).

$$AI=P/ET_0 \qquad \text{(رابطه ۱)}$$

در این معادله AI شاخص خشکی ، P بارندگی سالانه (mm/year) و ET_0 تبخیر–تعرق مرجع سالانه (mm/year) است. بارش و تبخیر–تعرق مرجع دو پارامتر کلیدی برای محاسبه شاخص خشکی هستند. کاهش شاخص خشکی می‌تواند به دلیل افزایش ET_0 همراه با ثابت ماندن یا کاهش بارندگی سالانه رخ دهد و یا به دلیل کاهش بارندگی سالانه در حالی که ET_0 ثابت مانده یا افزایش یافته است. برعکس، افزایش شاخص خشکی ممکن است ناشی از افزایش بارندگی سالانه همراه با ثابت ماندن یا کاهش ET_0، یا افزایش همزمان بارندگی سالانه و کاهش ET_0 باشد.

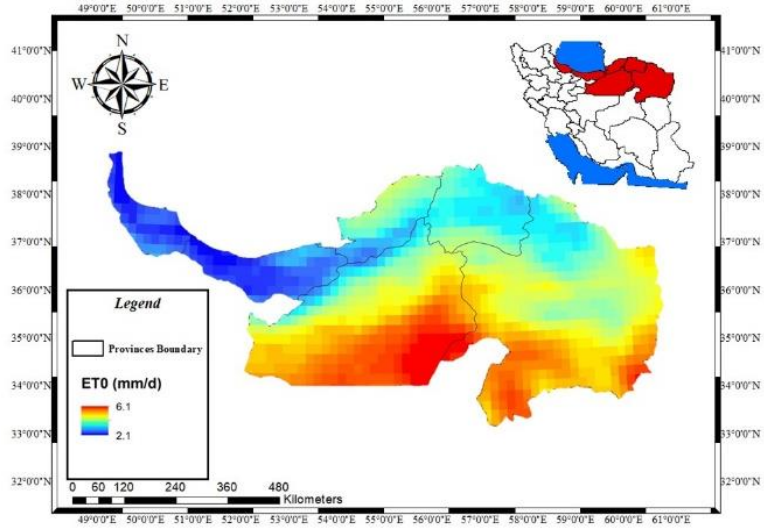
جدول ۱– شاخص خشکی سازمان ملل متحد (Yavaşlı, and Erlat., 2023)

Climate Class	اقلیم	حدود شاخص خشکی
Humid	مرطوب	AI > 1
Sub-Humid	نیمه مرطوب	0.65 < AI ≤ 1
Dry Sub-humid	خشک نیمه مرطوب	0.5 < AI ≤ 0.65
Semi-Arid	نیمه خشک	0.2 < AI ≤ 0.5
Arid	خشک	0.05< AI ≤ 0.2
Hyper-Arid	فرا خشک	AI ≤ 0.05

شاخص خشکی ۴۲ ایستگاه مورد بررسی، بر اساس اطلاعات هواشناسی بلند مدت اخذ شده از ایستگاه‌ها مذکور، محاسبه شد (جدول ۲). از میان شش نوع اقلیم ممکن، پنج نوع اقلیم در این پژوهش شناسایی شد که هفت ایستگاه در اقلیم مرطوب، پنج ایستگاه در اقلیم نیمه‌مرطوب، چهار ایستگاه در اقلیم خشک نیمه‌مرطوب، ۱۱ ایستگاه در اقلیم نیمه‌خشک، و ۱۵ ایستگاه در اقلیم خشک قرار گرفتند. اقلیم فراخشک در این پژوهش مشاهده نشد.

داده‌های تبخیر–تعرق مرجع سامانه WaPOR

از داده‌های تبخیر–تعرق مرجع روزانه نسخه ۲/۱ سامانه WaPOR ($ET_{0_{WaPOR}}$) استفاده شد. WaPOR تبخیر–تعرق مرجع را به عنوان تبخیر–تعرق (ET) از یک سطح چمن آبیاری شده فرضی تعریف می‌کند و قابل استفاده برای محاسبه ET محصولات مختلف می‌باشد (FAO, 2020a). در WaPOR، ET_0 به روشی مشابه معادله پنمن–مونتیث محاسبه می‌شود. داده‌های $ET_{0_{WaPOR}}$ از درگاه اینترنتی سامانه، https://WaPOR.apps.fao.org/home ، با قدرت تفکیک مکانی 20km و به صورت روزانه دریافت گردید و به منظور تطبیق با داده‌های ایستگاهی، مختصات جغرافیایی هر ایستگاه در سامانه مشخص گردید و مقادیر $ET_{0_{WaPOR}}$ مستقیماً از پیکسل متناظر با همان مختصات استخراج گردید. داده‌ها $ET_{0_{WaPOR}}$ در سه حالت سری زمانی نقطه‌ای، سری زمانی ناحیه‌ای و فایل رستری منطقه قابل بارگیری هستند (شکل۲).



شکل ۲– متوسط تبخیر-تعرق مرجع روزانه در بازه سال‌های ۲۰۰۹ الی ۲۰۲۲

جدول ۲– مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده

ردیف	استان	ایستگاه	مختصات جغرافیایی: طول جغرافیایی	مختصات جغرافیایی: عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	میانگین دما هوا (درجه سانتیگراد): کمینه	میانگین دما هوا (درجه سانتیگراد): بیشینه	میانگین مجموع بارش سالانه (میلی متر)	اقلیم منطقه بر اساس شاخص خشکی UNEP	شاخص خشکی
۱	خراسان رضوی	تربت جام	۶۰/۵۶	۳۵/۲۹	۹۵۰	۱۰	۲۳	۱۵۹	خشک	۰/۰۸
۲	خراسان رضوی	سبزوار	۵۷/۶۵	۳۶/۲۱	۹۶۲	۱۲	۲۵	۱۷۵	خشک	۰/۰۹
۳	خراسان رضوی	سرخس	۶۱/۱۵	۳۶/۵۴	۲۷۸	۱۲	۲۶	۱۹۴	خشک	۰/۱۱
۴	خراسان رضوی	کاشمر	۵۸/۴۷	۳۵/۲۷	۱۱۱۰	۱۳	۲۴	۱۷۸	خشک	۰/۱۲
۵	خراسان رضوی	تربت حیدریه	۵۹/۲۱	۳۵/۳۳	۱۴۵۱	۸	۲۲	۲۲۷	خشک	۰/۱۴
۶	خراسان رضوی	مشهد	۵۹/۶۳	۳۶/۲۴	۹۹۹	۱۰	۲۳	۲۳۰	خشک	۰/۱۴
۷	خراسان رضوی	نیشابور	۵۸/۸۰	۳۶/۲۷	۱۲۱۳	۷	۲۳	۲۳۹	خشک	۰/۱۷
۸	خراسان شمالی	جاجرم	۵۶/۳۳	۳۶/۹۵	۹۸۴	۱۰	۲۳	۱۳۳	خشک	۰/۰۷
۹	خراسان شمالی	اسفراین	۵۷/۴۸	۳۷/۰۵	۱۲۱۶	۹	۲۲	۱۹۲	خشک	۰/۱۳
۱۰	خراسان شمالی	مانه و سملقان	۵۶/۸۶	۳۷/۵۱	۸۹۰	۱۰	۲۳	۲۴۵	خشک	۰/۱۷
۱۱	خراسان شمالی	بجنورد	۵۷/۳۰	۳۷/۴۹	۱۰۶۵	۷	۲۱	۲۲۴	خشک	۰/۱۸
۱۲	سمنان	گرمسار	۵۲/۳۶	۳۵/۲۴	۹۰۰	۱۴	۲۶	۱۰۵	خشک	۰/۰۵
۱۳	سمنان	دامغان	۵۴/۳۲	۳۶/۱۵	۱۱۵۵	۱۱	۲۳	۹۶	خشک	۰/۰۶
۱۴	سمنان	سمنان	۵۳/۴۲	۳۵/۵۹	۱۱۲۷	۱۳	۲۵	۱۱۸	خشک	۰/۰۸
۱۵	سمنان	شاهرود	۵۴/۹۳	۳۶/۳۸	۱۳۲۵	۱۰	۲۱	۱۴۱	خشک	۰/۱۰
۱۶	گلستان	مراوه تپه	۵۵/۹۴	۳۷/۸۰	۴۶۰	۱۴	۲۴	۳۷۰	نیمه‌خشک	۰/۲۴
۱۷	گلستان	گنبد کاووس	۵۵/۲۱	۳۷/۲۷	۳۷	۱۳	۲۵	۴۲۹	نیمه‌خشک	۰/۳۴
۱۸	گلستان	گرگان هاشم آباد	۵۴/۲۷	۳۶/۸۵	۱۳	۱۳	۲۴	۴۶۶	نیمه‌خشک	۰/۳۹
۱۹	گلستان	بندر ترکمن	۵۴/۰۵	۳۶/۹۱	۰	۱۴	۲۳	۴۵۱	نیمه‌خشک	۰/۴۱
۲۰	گلستان	گرگان	۵۴/۴۱	۳۶/۹۱	۰	۱۲	۲۴	۴۸۳	نیمه‌خشک	۰/۴۱
۲۱	گلستان	کلاله	۵۵/۴۶	۳۷/۳۸	۱۲۸/۸۰	۱۳	۲۵	۵۹۸	نیمه‌خشک	۰/۴۸

۲۲	گلستان	علی آباد کتول	۵۴/۸۸	۳۶/۹۰	۱۸۴	۱۳	۲۳	۶۷۳	خشک نیمه‌مرطوب	۰/۶۰
۲۳	مازندران	بلده	۵۱/۸۰	۳۶/۲۰	۲۱۲۰	۳	۱۷	۳۱۸	نیمه‌خشک	۰/۲۵
۲۴	مازندران	کجور	۵۱/۷۳	۳۶/۳۹	۱۵۵۰	۶	۱۸	۳۲۰	نیمه‌خشک	۰/۲۷
۲۵	مازندران	سیاه بیشه	۵۱/۳۰	۳۶/۲۳	۱۸۵۵/۴۰	۷	۱۶	۵۳۹	نیمه‌خشک	۰/۴۷
۲۶	مازندران	کیاسر	۵۳/۵۵	۳۶/۲۵	۱۲۹۴/۳۰	۹	۱۹	۵۳۳	نیمه‌خشک	۰/۴۹
۲۷	مازندران	پل سفید	۵۳/۰۸	۳۶/۱۳	۶۱۰	۱۱	۲۱	۵۷۲	نیمه‌خشک	۰/۵۰
۲۸	مازندران	گلوگاه	۵۳/۸۴	۳۶/۷۴	−۱۰	۱۳	۲۳	۵۷۵	خشک نیمه‌مرطوب	۰/۵۶
۲۹	مازندران	آلاشت	۵۲/۸۴	۳۶/۰۷	۱۸۰۵	۷	۱۶	۵۳۵	خشک نیمه‌مرطوب	۰/۵۸
۳۰	مازندران	ساری(دشت ناز)	۵۳/۲۰	۳۶/۶۴	۱۶/۷۰	۱۳	۲۳	۶۴۷	خشک نیمه‌مرطوب	۰/۵۹
۳۱	مازندران	بندر امیر آباد	۵۳/۳۹	۳۶/۸۶	−۲۰	۱۴	۲۲	۵۲۷	نیمه‌مرطوب	۰/۶۵
۳۲	مازندران	قرخیل قائمشهر	۵۲/۷۷	۳۶/۴۵	۱۴/۷۰	۱۳	۲۳	۶۸۷	نیمه‌مرطوب	۰/۷۰
۳۳	مازندران	آمل	۵۲/۳۸	۳۶/۴۷	۲۳/۷۰	۱۳	۲۳	۶۸۶	نیمه‌مرطوب	۰/۷۱
۳۴	مازندران	ساری	۵۲/۹۹	۳۶/۵۴	۲۳	۱۴	۲۳	۷۵۲	نیمه‌مرطوب	۰/۷۷
۳۵	مازندران	بابلسر	۵۲/۶۴	۳۶/۷۰	−۲۱	۱۵	۲۲	۸۵۱	نیمه‌مرطوب	۰/۹۸
۳۶	مازندران	رامسر	۵۰/۶۸	۳۶/۹۰	−۲۰	۱۴	۲۱	۱۲۸۹	مرطوب	۱/۵۵
۳۷	مازندران	نوشهر	۵۱/۴۷	۳۶/۶۶	−۲۰,۹	۱۴	۲۱	۱۳۲۷	مرطوب	۱/۵۶
۳۸	گیلان	ماسوله	۴۸/۹۸	۳۷/۱۵	۱۰۸۱	۸	۱۶	۹۲۷	مرطوب	۱/۰۶
۳۹	گیلان	رشت(کشاورزی)	۴۹/۶۵	۳۷/۲۰	۲۵	۱۲	۲۲	۱۲۰۱	مرطوب	۱/۲۴
۴۰	گیلان	لاهیجان	۵۰/۰۲	۳۷/۱۹	۳۴	۱۲	۲۲	۱۳۷۷	مرطوب	۱/۴۳
۴۱	گیلان	آستارا	۴۸/۸۵	۳۸/۳۷	−۲۱/۱۰	۱۲	۲۰	۱۳۷۹	مرطوب	۱/۶۱
۴۲	گیلان	بندر انزلی	۴۹/۴۶	۳۷/۴۸	−۲۳/۶۰	۱۵	۲۰	۱۷۷۰	مرطوب	۲/۰۴

برآورد تبخیر–تعرق مرجع مبتنی بر داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک

برای برآورد تبخیر–تعرق مرجع (ET_0)، داده‌های هواشناسی شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی حداقل و حداکثر، میانگین سرعت باد و ساعت آفتابی از ۴۲ ایستگاه سینوپتیک طی یک دوره آماری ۱۴ ساله (۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ میلادی) به‌صورت روزانه گردآوری شد. سپس با استفاده از معادله فائو پنمن–مانتیث، مقادیر روزانه ET_0 محاسبه شد (رابطه ۲).

$$ET_0 = (0.408\ \Delta\ (R_n - G_e) + \gamma\ 900/(T+273)\ u_2\ (e_s - e_a))/(\Delta + \gamma(1+0.34\ u_2)) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

که در رابطه فوق ET_0 تبخیر–تعرق گیاه مرجع ($mm.d^{-1}$)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع ($kPa.°C^{-1}$)، R_n شار تابش خالص($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)، G_e شار حرارت خاک ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$)، γ ثابت سایکرومتری ($kPa.°C^{-1}$)، T میانگین دمای هوا در ارتفاع دو متری ($°C$)، u_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری ($m.s^{-1}$)، e_s فشار بخار اشباع (kPa)، e_a فشار بخار واقعی هوا (kPa)، $(e_s - e_a)$ کمبود فشار بخار اشباع (kPa)، u_2 سرعت روزانه باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین ($m.s^{-1}$) و ۰/۳۴ ضریب باد برای گیاه مرجع ($s.m^{-1}$) می‌باشد. در این پژوهش G_e صفر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که استاندارد بودن داده‌های هواشناسی اخذ شده برای محاسبه ET_0، بر اساس روش توصیه شده در پیوست ۶ نشریه فائو ۵۶ (Allen et al., 1998) ارزیابی و در موارد لازم اصلاح شدند.

بخش تابشی و همرفتی معادله فائو پنمن مانتیث

معادله فائو پنمن مانتیث از دو بخش تابشی[1] (ET_{0Rad}) و همرفتی[2]($ET_{0\,Adv}$) تشکیل شده است (روابط ۳ و ۴). درصد وزنی بخش $ET_{0\,Adv}$ در معادله فائو پنمن مانتیث برای اقلیم‌های خشک و درصد وزنی بخش ET_{0Rad} برای اقلیم‌های مرطوب بیشتر است. بخش تابشی به انرژی تابشی دریافتی از خورشید اشاره دارد که باعث تبخیر آب از سطح خاک و گیاهان می‌شود. در اقلیم‌های مرطوب، فشار بخار اشباع نسبتا بالا است و انرژی تابشی سهم بیشتری در کل تبخیر–تعرق مرجع دارد. در این شرایط، انرژی تابشی به عنوان عامل اصلی در تحریک تبخیر عمل می‌کند، زیرا بخار آب به راحتی به جو منتقل می‌شود. بخش همرفتی مربوط به جابه‌جایی حرارت و رطوبت به وسیله جریانات هوایی است. همرفتی تحت تأثیر عواملی مانند سرعت باد و دما قرار دارد و در شرایط خشک، نقش مهمی در تبخیر ایفا می‌کند. در این اقلیم‌ها، به دلیل بالا بودن کمبود فشار بخار، جابه‌جایی حرارت و رطوبت می‌تواند نقش بیشتری داشته باشد، چرا که سرعت باد و دما بالا به انتقال سریع‌تر بخار آب به جو کمک می‌کند. در این پژوهش درصد وزنی هر یک از این دو بخش از کل مقدار تبخیر–تعرق مرجع برای هر ایستگاه محاسبه و با شاخص‌های آماری R^2 و RMSE مقایسه شد تا عملکرد مدل WaPOR در هر یک از این بخش‌ها بررسی شود.

$$ET_{0Rad} = (0.408\,\Delta\,(R_n - G_e)) / (\Delta + \gamma\,(1+0.34\,u_2)) \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$ET_{0Adv} = (\gamma\,(900/(T+273))\,u_2\,(e_s - e_a)) / (\Delta + \gamma(1+0.34\,u_2)) \quad \text{رابطه ۴)}$$

روش ارزیابی

شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه نرمال شده میانگین مربعات خطا (nRMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) $ET_{0_{WaPOR}}$ و ET_0 بدست آمده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی ($ET_{0Stations}$) محاسبه شد (روابط ۵ الی ۸).

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})\,(P_i - \bar{P})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2\,\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2}} \quad \text{رابطه ۵)}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۶)}$$

$$nRMSE = 100 \times \frac{RMSE}{\bar{O}} \quad \text{رابطه ۷)}$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)}{n} \quad \text{رابطه ۸)}$$

که در این روابط R^2 ضریب تعیین، O_i مقادیر $ET_{0Stations}$ ، $\bar{O}$ میانگین $ET_{0Stations}$ ، P_i مقادیر $ET_{0_{WaPOR}}$ ، $\bar{P}$ میانگین $ET_{0_{WaPOR}}$ ، n تعداد داده‌ها، RMSE ریشه میانگین مربعات خطا (میلی‌متر در روز) ، nRMSE ریشه نرمال شده میانگین مربعات خطا (درصد) و MBE میانگین انحراف خطا (میلی‌متر در روز) است.

نتایج و بحث

[1] Radiation

[2] Advection

نتایج حاصل از تحلیل دقت محصول $ET_{0_{WaPOR}}$ در اقلیم‌های مختلف نشان می‌دهد که عملکرد این پایگاه داده در برآورد مقادیر ET_0 به صورت معناداری تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد. برای بررسی دقیق‌تر، داده‌های ایستگاه‌های هم‌اقلیم تجمیع و تحلیل آماری در سه مقیاس زمانی روزانه، ده‌روزه و ماهانه انجام شد.

در مقیاس روزانه، شاخص ضریب تعیین (R^2) نشان‌دهنده همبستگی مناسب داده‌های $ET_{0_{WaPOR}}$ در مقایسه با $ET_{0Stations}$ در اقلیم‌های خشک (۰/۸۶)، خشک نیمه‌مرطوب (۰/۸۵)، نیمه‌مرطوب (۰/۸۳) و مرطوب (۰/۸۲) بود. اقلیم نیمه‌خشک با R^2 معادل ۰/۸۰ کمترین میزان تطابق را به‌نمایش گذاشت. این یافته بیانگر آن است که دقت WaPOR در مناطق خشک نسبت به مناطق با رطوبت بالاتر بیشتر بوده و همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی با افزایش رطوبت اقلیم کاهش می‌یابد.

بررسی خطای نسبی نرمال‌شده (nRMSE) نیز مؤید همین روند بود؛ به‌طوری‌که در اقلیم خشک مقدار این شاخص ۲۵ درصد و در اقلیم نیمه‌خشک ۲۹ درصد به‌دست آمد که نسبت به سایر اقلیم‌ها پایین‌تر است. در مقابل، در اقلیم‌های خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و مرطوب، nRMSE به‌ترتیب ۳۰ درصد ، ۳۹ درصد و ۳۹ درصد بدست آمد. این افزایش خطا در اقلیم‌های مرطوب‌تر، ضرورت توجه به دقت منطقه‌ای محصولات سنجش از دور را در مطالعات مدیریتی دوچندان می‌سازد.

از منظر اریب نیز، شاخص MBE نشان داد که WaPOR در تمامی اقلیم‌ها گرایش به بیش‌برآورد دارد، هرچند شدت آن متأثر از شرایط اقلیم‌های متفاوت است. مقدار MBE در اقلیم خشک ۰/۰۷ (میلی‌متر در روز) بود، در حالی‌که در اقلیم نیمه‌مرطوب و مرطوب به ترتیب به ۰/۸۳ و ۰/۴۴ (میلی‌متر در روز) افزایش یافت. این نتایج حاکی از آن است که با افزایش رطوبت اقلیم، انحراف پیش‌بینی WaPOR از داده‌های زمینی بیشتر می‌شود و کاربرد مستقیم آن بدون تصحیح اریب می‌تواند منجر به تصمیم‌گیری‌های نادقیق گردد.

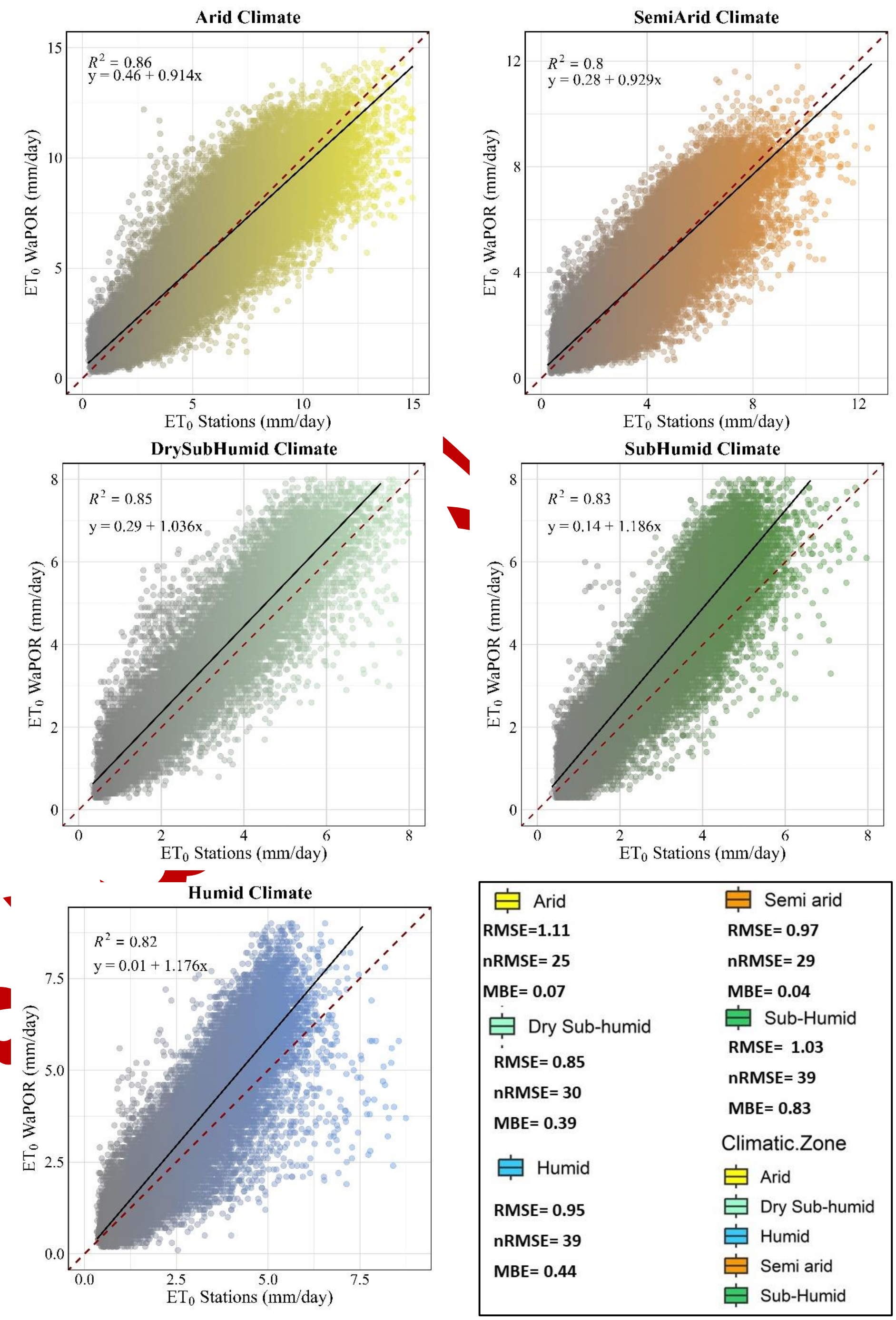
گرایش WaPOR به بیش‌برآورد در اقلیم‌های مرطوب را می‌توان با منابع داده‌های مورد استفاده مدل توضیح داد. جزء تابشی (ET_{0Rad}) که شامل تابش خالص و شاخص‌های پوشش گیاهی است، از داده‌های ماهواره‌ای استخراج می‌شود، در حالی که جزء آیرودینامیک (ET_{0Adv}) شامل سرعت باد و اختلاف فشار بخار از داده‌های بازتحلیل جهانی تأمین می‌گردد. در مناطق مرطوب، سهم جزء تابشی غالب است و حساسیت مدل به تابش و پوشش گیاهی، همراه با محدودیت دقت داده‌های ماهواره‌ای، باعث بیش‌برآورد ET_0 و افزایش MBE می‌شود. در مقابل، در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، سهم جزء آیرودینامیک بیشتر است و داده‌های بازتحلیل نسبتاً دقیق‌تر هستند، بنابراین خطای اریب کمتر است.

یافته‌های این پژوهش با نتایج تحقیقات پیشین نیز همخوان است. به عنوان نمونه Fakhar et al. (2024) گزارش کردند که بیشترین دقت روزانه ET_{0WaPOR} در اقلیم نیمه‌خشک با R^2 برابر ۰/۹۵ و RMSE برابر ۰/۴۳ میلی‌متر در روز حاصل شد، در حالی که در اقلیم مرطوب دقت به طور چشمگیری با R^2 ۰/۶۹ و RMSE برابر ۰/۹۵ کاهش یافته و به همین ترتیب ویسی و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه خزر نشان دادند که WaPOR غالباً ET_0 را بیش‌برآورد می‌کند، در حالی‌که ERA5 تمایل به کم‌برآورد دارد. نتیجه آن‌ها ترکیب دو پایگاه برای افزایش دقت بود. این شواهد نشان می‌دهد که الگوی بیش‌برآورد WaPOR در اقلیم‌های مرطوب یک مسئله محلی یا موردی نیست، بلکه در مطالعات متعدد در ایران و سایر کشورها نیز مشاهده شده است. بنابراین، تأکید بر لزوم تصحیح اریب پیش از کاربرد عملی WaPOR در مدیریت منابع آب، کاملاً ضروری است.

تحلیل فراوانی نسبی مقادیر ET_{0WaPOR} نیز مؤید همین جهت‌گیری بود. در اقلیم‌های مرطوب (۷۰ درصد)، نیمه‌مرطوب (۷۸ درصد) و خشک نیمه‌مرطوب (۷۱ درصد)، اغلب مقادیر ET_{0WaPOR} بالاتر از داده‌های $ET_{0Stations}$ بود؛ درحالی‌که در اقلیم خشک (۴۵ درصد) و نیمه‌خشک (۴۸ درصد)، قابل توجهی از مقادیر ET_{0WaPOR} کمتر از مقادیر $ET_{0Stations}$ مشاهده شد.

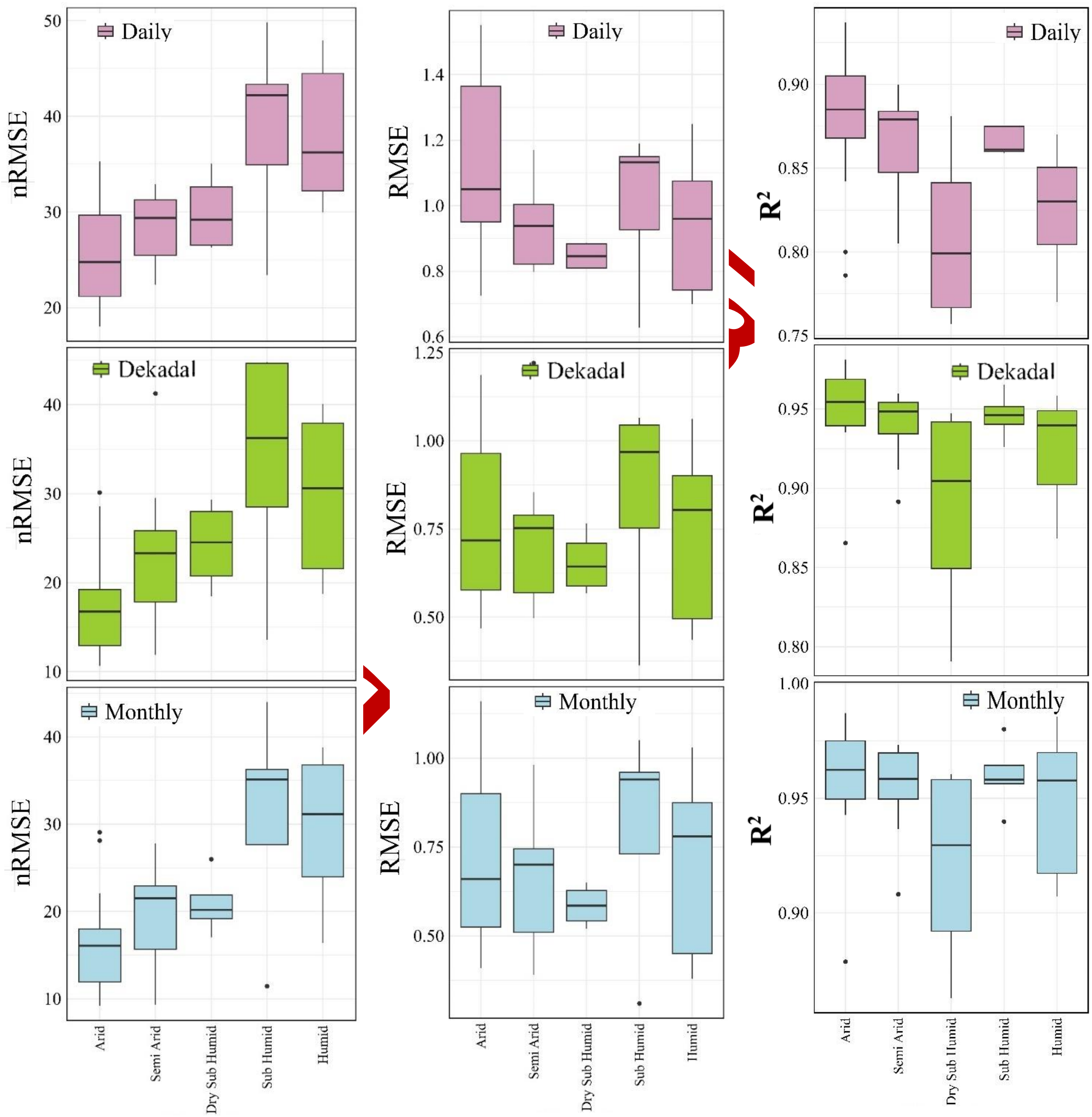
مقایسه یافته‌های حاضر با نتایج مطالعات پیشین، از جمله پژوهش‌های Barideh et al. (2022) در حوضه دریاچه ارومیه و ویسی و همکاران (۲۰۲۳) در حوضه دریای خزر، حاکی از آن است که گرایش به بیش‌برآورد در اقلیم‌های مرطوب پدیده‌ای رایج در عملکرد WaPOR می‌باشد. با این حال، شواهدی از مطالعات گله‌بان و همکاران (۱۴۰۱) در استان سیستان و بلوچستان و کماجیان (۱۴۰۱) در استان قزوین وجود دارد که به کم‌برآورد در برخی مناطق خشک کشور اشاره دارند. این اختلافات احتمالاً ناشی از ترکیب عوامل اقلیمی، توپوگرافی، دقت داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و ویژگی‌های مدل‌سازی WaPOR است.

برای درک بهتر نحوه تغییرات دقت ET_{0WaPOR} در اقلیم‌های مختلف، شکل ۳ پراکندگی داده‌های روزانه ET_{0WaPOR} و $ET_{0Station}$ را به تفکیک اقلیم‌های ایستگاه‌های هواشناسی نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، الگوی همبستگی بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی در تمامی اقلیم‌ها نسبتاً پایدار بوده و تفاوت‌های اصلی در میزان پراکندگی و شیب نقاط نسبت به خط یک‌به‌یک مشاهده می‌شود. این روند در مقیاس‌های زمانی ده‌روزه و ماهانه نیز مشابه بوده و تغییر محسوسی در ترتیب یا عملکرد اقلیم‌ها نسبت به یکدیگر دیده نمی‌شود.



شکل ۳–مقایسه ET_{0WaPOR} و $ET_{0Stations}$ روزانه به تفکیک طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی

به‌منظور ارزیابی دقیق‌تر عملکرد WaPOR در هر مقیاس زمانی، شکل ۴ نتایج شاخص‌های آماری R^2، RMSE و nRMSE را برای پنج طبقه اقلیمی در قالب نمودارهای جعبه‌ای ارائه می‌دهد. در این نمودارها، محور افقی اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و مرطوب و محور عمودی هر یک از شاخص‌های آماری را نشان می‌دهد. نتایج به‌خوبی نشان می‌دهند که R^2 در تمامی اقلیم‌ها به طور میانگین بالاتر از ۰/۸۳ بوده که دلالت بر همبستگی مناسب داده‌های WaPOR با مقادیر برآورد شده از ایستگاه‌های زمینی دارد.

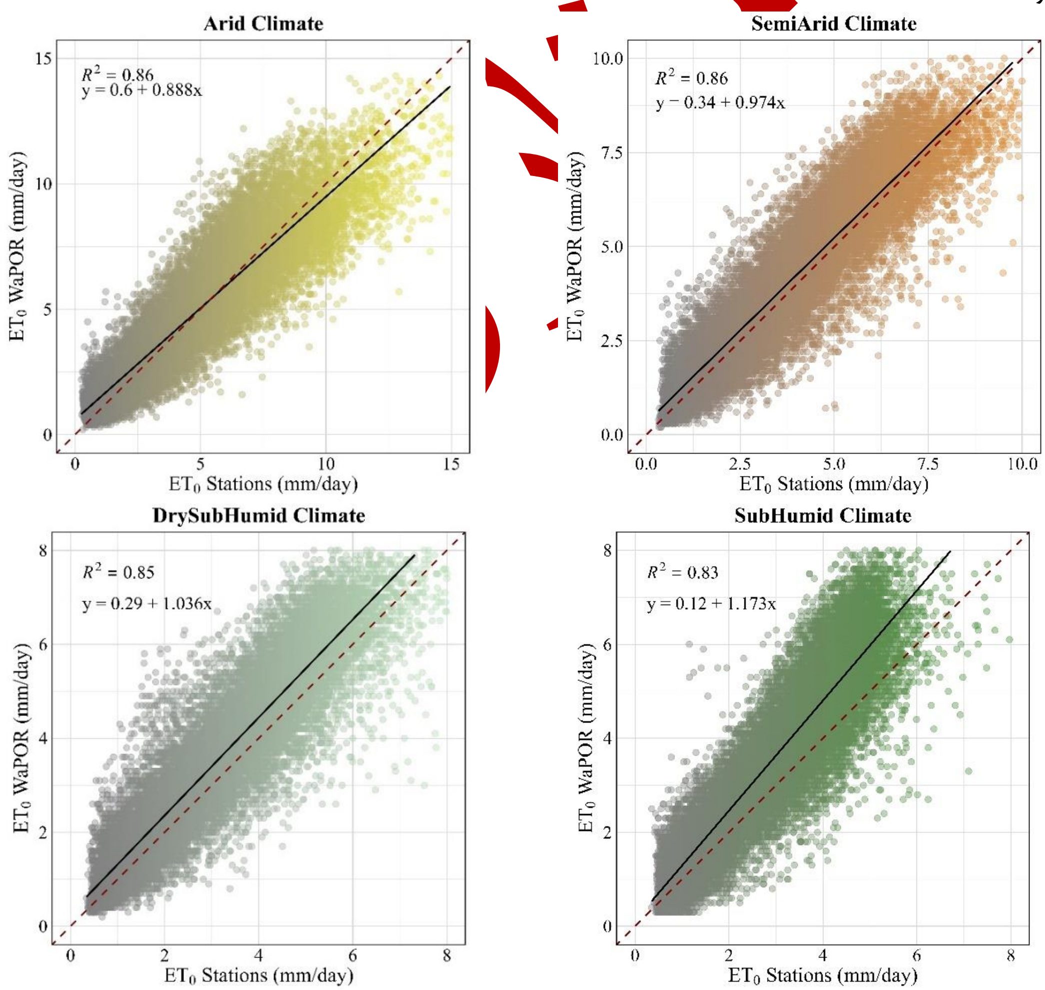


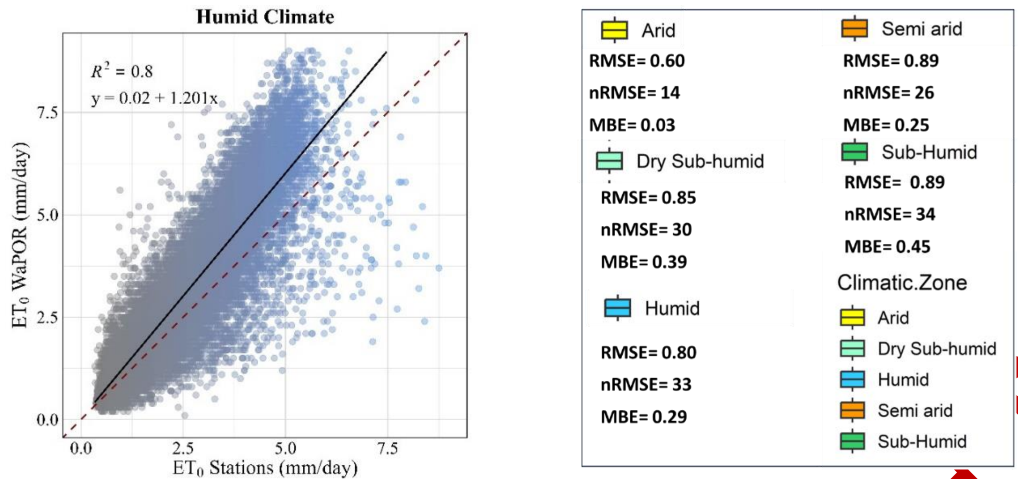
ج- nRMSE　　　ب- RMSE　　　الف- R^2

شکل ۴- شاخص‌های آماری حاصل از مقایسه ET_{0WaPOR} و $ET_{0\ Station}$ در مقیاس‌های روزانه، ده روزه و ماهانه در اقلیم‌های مختلف

در مقیاس ماهانه، متوسط R^2 به ۰/۹۶ افزایش یافت، در حالی که RMSE و nRMSE به‌ترتیب به ۰/۸ میلی‌متر در روز و ۳۱ درصد حاصل شد. این نتایج مؤید آن است که با افزایش مقیاس زمانی، دقت برآورد WaPOR بهبود می‌یابد. بیشترین درصد بهبود R^2 از مقیاس روزانه به ماهانه، معادل ۱۳ درصد، در اقلیم‌های مرطوب و خشک نیمه‌مرطوب مشاهده شد. این افزایش نشان می‌دهد که WaPOR در اقلیم‌های مرطوب‌تر و نیز در بازه‌های زمانی بلندمدت‌تر، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد؛ چرا که اثر نوسانات کوتاه‌مدت و خطاهای مقطعی در مقیاس‌های زمانی بلندمدت کاهش می‌یابد.

برای تحلیل دقیق‌تر اثر اقلیم بر دقت محصول WaPOR و کنترل نوسانات ناشی از تعداد مختلف ایستگاه‌ها در اقلیم‌های متفاوت، تعداد ایستگاه‌ها در هر اقلیم به صورت یکنواخت، چهار ایستگاه برای هر اقلیم، تنظیم شد (شکل۵). در این مرحله، نتایج نشان داد که در اقلیم نیمه‌خشک، به‌ویژه در استان‌های گلستان و مازندران، برخی ایستگاه‌ها رفتار مشابهی با اقلیم‌های نیمه‌مرطوب و مرطوب از خود نشان می‌دهند. این وضعیت به دلیل تغییرات سالانه شاخص خشکی بود که در برخی سال‌ها این ایستگاه‌ها ویژگی‌های اقلیم‌های خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و حتی مرطوب را داشتند. به همین دلیل، برای جلوگیری از تأثیرات این تغییرات و دستیابی به نتایج دقیق‌تر، ایستگاه‌هایی که در طول زمان بیشتر ویژگی‌های اقلیم خشک یا نیمه‌خشک را داشته‌اند، انتخاب شدند. این روش به مقایسه دقیق‌تر و معتبرتر نتایج در مقیاس‌های زمانی روزانه کمک کرد و از سوگیری‌های احتمالی ناشی از نوسانات شرایط اقلیمی در ایستگاه‌ها جلوگیری کرد.



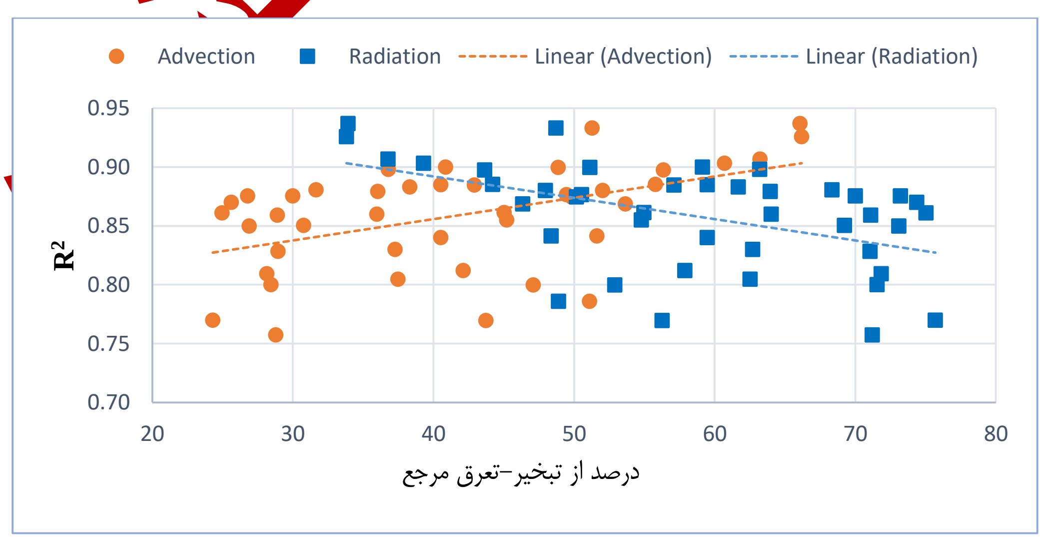


شکل ۵– مقایسه ET_0 WaPOR و ET_0 Stations روزانه در ایستگاه‌های هواشناسی به تفکیک اقلیم‌های مختلف (هر اقلیم ۴ ایستگاه)

نتایج نشان داد که R^2 در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ۰/۸۶ بوده، در حالی که برای اقلیم‌های خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و مرطوب به‌ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸۳ و ۰/۸۰ به‌دست آمد. شاخص nRMSE در اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب و خشک نیمه‌مرطوب به ترتیب ۳۳، ۳۴ و ۳۰ درصد و در اقلیم‌های نیمه‌خشک و خشک ۲۶ و ۱۴ درصد بود.

از نظر RMSE نیز، کمترین مقدار در اقلیم خشک (۰/۶ میلی‌متر در روز) مشاهده شد. این شاخص در اقلیم‌های نیمه‌خشک، خشک نیمه‌مرطوب، نیمه‌مرطوب و مرطوب به ترتیب ۰/۸۹، ۰/۸۰، ۰/۸۵و ۰/۸۵ میلی‌متر در روز بود. بر اساس این نتایج، می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که عملکرد WaPOR در برآورد ET_0 در اقلیم‌های خشک از دقت بالاتری نسبت به اقلیم‌های مرطوب برخوردار است. این اختلافات عملکرد می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های اقلیمی، پوشش گیاهی متراکم، رطوبت نسبی بالا و نیز اریب‌های ذاتی مدل WaPORدر مناطق مرطوب باشد.

در تحلیل اثر سهم جزء تابشی و همرفتی در ET_0، نتایج نشان می‌دهد که این دو عامل می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر دقت مدل WaPOR داشته باشند. به طور خاص، در اقلیم‌های خشک که بخاطر افزایش نقصان فشار بخار هوا سهم جزء همرفتی بیشتر است، دقت مدل افزایش می‌یابد، در حالی که در اقلیم‌های مرطوب‌تر سهم جزء تابشی غالب است، دقت کاهش می‌یابد. تغییرات آماری R^2 که در نمودار پراکندگی شکل ۶ نمایش داده شده، این تمایز را به وضوح نشان می‌دهد.

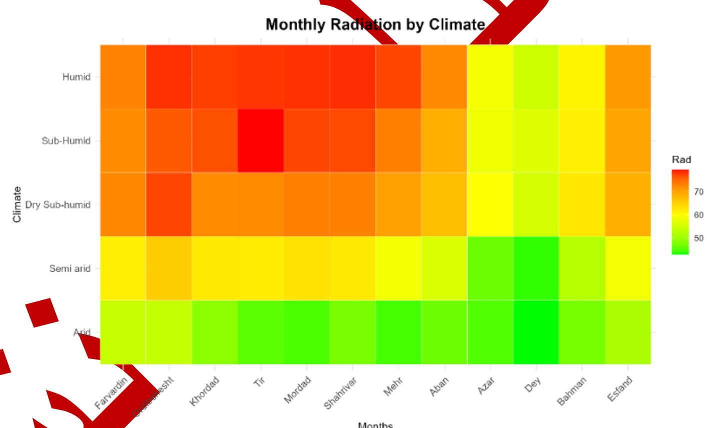


شکل ۶– سهم بخش تابشی و همرفتی از تبخیر–تعرق مرجع روزانه $ET_{0Stations}$

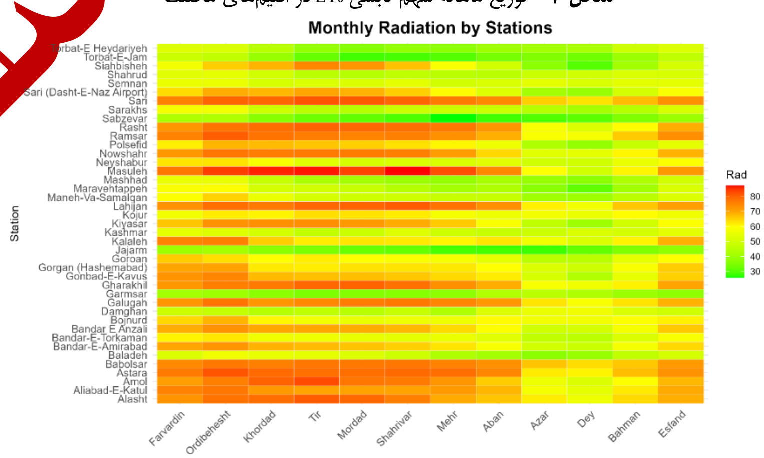
در این بخش، برای محاسبه سهم‌های جزء تابشی و همرفتی از معادله فائو پنمن مانتیث استفاده شد و مقادیر آن‌ها برای ایستگاه‌ها طی ۱۴ سال محاسبه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش سهم جزء تابشی، که معمولاً در اقلیم‌های مرطوب بیشتر مشاهده می‌شود، دقت پیش‌بینی کاهش می‌یابد، به طوری که شیب نمودار پراکندگی R^2 کاهشی است. در مقابل، در اقلیم‌های خشک که سهم جزء همرفتی بیشتر است، دقت پیش‌بینی مدل افزایش می‌یابد و شیب نمودار R^2 به طور مثبت تغییر می‌کند.

به طور کلی، شیب مثبت برای سهم همرفتی نشان‌دهنده بهبود دقت پیش‌بینی با افزایش سهم همرفتی در تبخیر–تعرق است. در حالی که شیب منفی برای سهم تابشی تأیید می‌کند که در اقلیم‌های مرطوب‌تر با افزایش سهم تابشی، دقت مدل کاهش می‌یابد. نتایج این بخش حاکی از این است که با افزایش یک درصد سهم همرفتی، شاخص R^2 به طور متوسط ۰/۱۸ درصد افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده بهبود دقت پیش‌بینی در شرایط خشک‌تر است. در نتیجه، می‌توان گفت که در اقلیم‌های خشک با سهم بیشتر همرفتی، دقت مدل WaPOR بیشتر از اقلیم‌های مرطوب با سهم بیشتر تابشی است.

به منظور بررسی تأثیر سهم تابشی بر دقت برآوردهای مدل WaPOR ، نقشه هیت‌مپی برای ۴۲ ایستگاه مورد بررسی تهیه شد که سهم تابشی را بر اساس ماه‌های شمسی و اقلیم‌های مختلف نشان می‌دهد (شکل ۷ و ۸). نتایج نشان می‌دهند که در ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های مرطوب، سهم تابشی در ماه‌های گرم به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد که این امر با کاهش دقت مدل در همان دوره‌ها همزمان است. در مقابل، در ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های خشک، سهم تابشی کمتر و سهم همرفتی بیشتر است که با دقت بالاتر مدل همراه است. این نتایج نشان می‌دهند که سهم تابشی به‌طور معناداری بر تغییرات دقت ET_0 اثرگذار است و تحلیل فصلی آن می‌تواند در بهینه‌سازی و کاربرد دقیق‌تر مدل در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی نقش مؤثری داشته باشد.



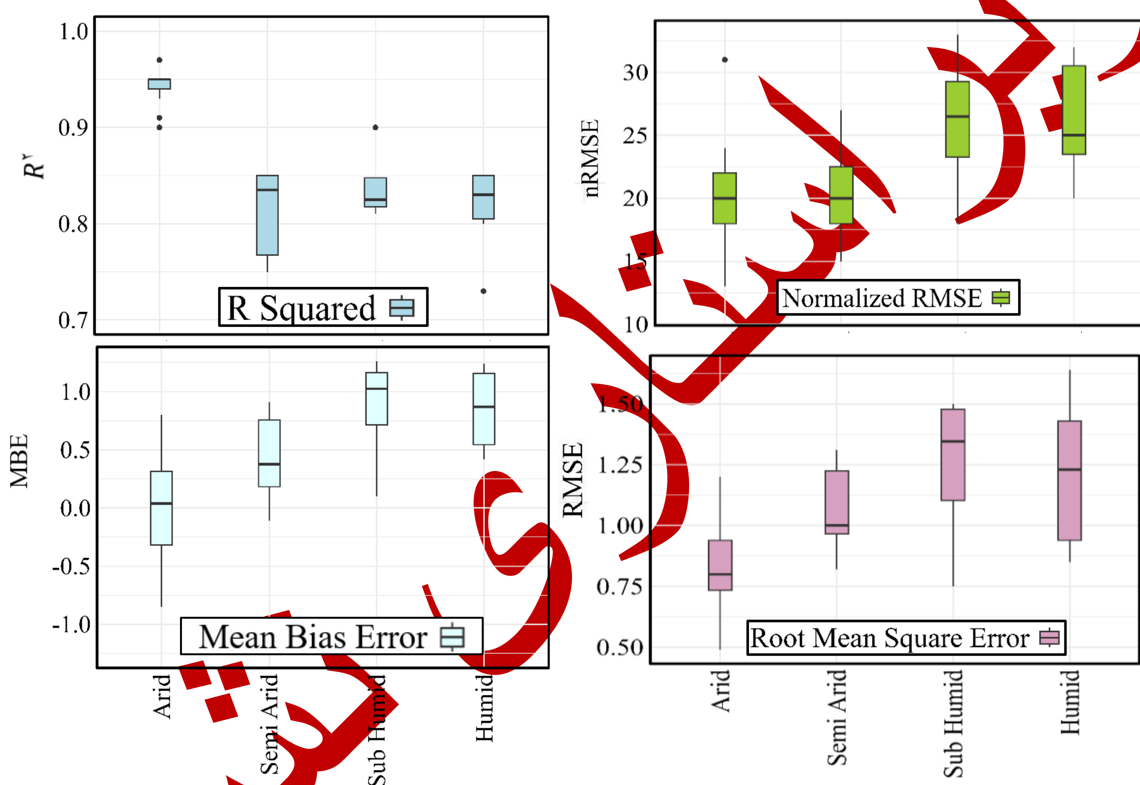
شکل ۷– توزیع ماهانه سهم تابشی ET_0 در اقلیم‌های مختلف



شکل ۸– توزیع ماهانه سهم تابشی در ET_0 برای ایستگاه‌های مورد بررسی

عملکرد مدل WaPOR در طول فصل رشد گندم در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک و فصل رشد برنج در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب بررسی شد (شکل ۹). برای ارزیابی دقت مدل، چهار شاخص آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطا نرمال شده (nRMSE) و متوسط خطای اریب (MBE) محاسبه شدند. تاریخ کشت گندم از اوایل مهر تا اواخر خرداد ماه و تاریخ کشت برنج از اوایل اردیبهشت تا اواخر شهریور ماه در نظر گرفته شد.

نتایج در اقلیم خشک و نیمه‌خشک نشان داد که مدل WaPOR توانسته است ۹۱ درصد از واریانس داده‌های واقعی را توضیح دهد. شاخص R^2 برابر با ۰/۹۱ دلالت بر تطابق مطلوب مدل با داده‌های واقعی در اقلیم‌های مذکور دارد. همچنین، میانگین شاخص‌های nRMSE و RMSE به ترتیب ۲۰ درصد و ۰/۹۱ (میلی‌متر در روز) نشان‌دهنده خطای نسبتا کم و عملکرد خوب مدل WaPOR در برآورد ET_0 بود. شاخص MBE نیز ۰/۱۲- (میلی‌متر در روز) بدست آمد که نشان می‌دهد مدل WaPOR به طور متوسط ET_0 را کمتر از مقادیر $ET_{0\ Stations}$ برآورد کرده است.



شکل ۹– نمودار جعبه‌ای نتایج آماری در اقلیم‌های مختلف در فصل‌های رشد گندم (خشک و نیمه‌خشک) و برنج (مرطوب و نیمه‌مرطوب)

در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب، دقت مدل WaPOR کمی کاهش یافت. میانگین R^2 برابر با ۰/۸۳ نشان می‌دهد که مدل ۸۳ درصد از واریانس داده‌های واقعی را توضیح می‌دهد، که اگرچه تطابق خوبی را نشان می‌دهد، اما کمتر از اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک است. میانگین شاخص‌های RMSE برابر ۱/۲۲ (میلی‌متر در روز) و MBE برابر ۰/۸۵ (میلی‌متر در روز) نشان می‌دهد که مدل در این اقلیم‌ها به طور متوسط ET_0 را بیشتر از مقادیر واقعی پیش‌بینی کرده است و خطای مدل بیشتر است. میانگین شاخص nRMSE برابر با ۲۶ درصد به دست آمد که بیانگر این است که خطای داده‌های WaPOR در این اقلیم بیشتر از اقلیم خشک و نیمه‌خشک است.

در نهایت، نتایج نشان می‌دهد که مدل WaPOR در اقلیم خشک و نیمه‌خشک عملکرد بهتری در فصل رشد گندم داشته است. این امر با مقایسه مقادیر R^2 ، nRMSE، RMSE و MBE تأیید می‌شود که نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل در اقلیم‌های مذکور است. بر اساس این نتایج، می‌توان از داده‌های روزانه ET_{0WaPOR} برای برنامه‌ریزی آبیاری در فصل رشد گندم در اقلیم‌های خشک استفاده کرد. همچنین، همانطور که در جدول ۳ نشان داده شد، ایستگاه آستارا در اقلیم مرطوب، ایستگاه قراخیل در اقلیم نیمه مرطوب و ایستگاه شاهرود در اقلیم خشک بهترین نتایج را در فصل رشد گندم و برنج نشان دادند.

جدول ۳- نتایج شاخص‌های آماری در فصل رشد گندم و برنج

ایستگاه	اقلیم	شاخص آماری				ایستگاه	اقلیم	شاخص آماری			
		R^2	RMSE	nRMSE	MBE			R^2	RMSE	nRMSE	MBE
آستارا	مرطوب	۰/۸۵	۰/۸۵	۲۰	۰/۴۲	سیاه بیشه	نیمه‌خشک	۰/۴۹	۱/۲۰	۲۷	۰/۱۸
بندر انزلی	مرطوب	۰/۸۰	۱/۵۳	۳۲	۱/۲۰	بجنورد	خشک	۰/۹۵	۰/۶۸	۲۰	−۰/۴۳
ماسوله	مرطوب	۰/۸۳	۱/۳۳	۳۰	۱/۱۱	دامغان	خشک	۰/۹۰	۱/۲۰	۳۱	−۰/۴۴
لاهیجان	مرطوب	۰/۸۵	۱/۲۳	۲۵	۱/۸۷	اسفراین	خشک	۰/۹۵	۰/۶۹	۱۸	۰/۱۱
نوشهر	مرطوب	۰/۸۱	۰/۹۴	۲۳	۰/۶۱	گرمسار	خشک	۰/۹۵	۱/۰۵	۲۴	−۰/۸۵
رامسر	مرطوب	۰/۷۳	۰/۹۴	۲۴	۰/۴۸	جاجرم	خشک	۰/۹۷	۰/۸۳	۲۰	−۰/۶۷
رشت	مرطوب	۰/۸۵	۱/۶۴	۳۱	۱/۲۴	کاشمر	خشک	۰/۹۵	۰/۹۹	۲۲	−۰/۸۰
آمل	نیمه‌مرطوب	۰/۸۳	۱/۲۲	۲۵	۰/۹۲	مانه و سملقان	خشک	۰/۹۴	۰/۷۰	۲۰	۰/۰۵
بابلسر	نیمه‌مرطوب	۰/۹۰	۱/۵۰	۳۳	۱/۲۶	مشهد	خشک	۰/۹۴	۰/۸۰	۲۰	۰/۰۴
قرخیل	نیمه‌مرطوب	۰/۸۲	۰/۷۵	۱۸	۰/۱۰	نیشابور	خشک	۰/۹۴	۰/۸۰	۲۲	−۰/۳۰
ساری	نیمه‌مرطوب	۰/۸۱	۱/۴۷	۲۸	۱/۱۳	سبزوار	خشک	۰/۹۷	۰/۷۷	۱۷	−۰/۵۹
بندر ترکمن	نیمه‌خشک	۰/۷۵	۱/۳۱	۲۴	−۰/۹۱	سرخس	خشک	۰/۹۳	۰/۱۴	۲۳	−۰/۶۰
گنبد کاووس	نیمه‌خشک	۰/۸۵	۱/۲۵	۲۰	−۰/۸۸	تربت جام	خشک	۰/۹۵	۰/۸۸	۱۸	−۰/۲۰
گرگان (هاشم آباد)	نیمه‌خشک	۰/۸۲	۰/۹۵	۱۷	−۰/۳۸	سمنان	خشک	۰/۹۱	۰/۷۹	۱۹	−۰/۲۷
کیاسر	نیمه‌خشک	۰/۷۵	۰/۹۸	۲۱	−۰/۳۷	شاهرود	خشک	۰/۹۷	۰/۴۹	۱۳	۰/۰۴
مراوه تپه	نیمه‌خشک	۰/۸۵	۱/۰۰	۱۵	۰/۱۲	تربت حیدریه	خشک	۰/۹۵	۰/۸۹	۱۸	−۰/۳۳
پل سفید	نیمه‌خشک	۰/۸۵	۰/۸۲	۱۹	۰/۱۱						

نتیجه‌گیری

هدف این پژوهش، ارزیابی دقت مدل تبخیر-تعرق مرجع WaPOR در مقایسه با داده‌های واقعی ایستگاه‌های هواشناسی، در اقلیم‌های مختلف ایران، به‌ویژه در فصل رشد گندم و برنج بود. در ابتدا، نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، مدل WaPOR قادر است ۹۱ درصد از واریانس داده‌های واقعی را با استفاده از شاخص R^2 توضیح دهد. میانگین شاخص nRMSE در این مناطق ۲۰ درصد بود که نشان‌دهنده خطای نسبتا کم مدل در برآورد ET_0 است. همچنین میانگین RMSE برابر با ۰/۹۱ میلی‌متر در روز و MBE برابر با ۰/۱۲− میلی‌متر در روز بود که نشان می‌دهد مدل WaPOR به‌طور متوسط تبخیر-تعرق مرجع را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل WaPOR در شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در فصل رشد گندم است.

در مقابل، در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب، میانگین R^2، ۰/۸۳ بدست آمد که نشان‌دهنده توضیح ۸۳ درصدی واریانس داده‌های واقعی است، که نسبت به اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک کمتر است. میانگین RMSE در این اقلیم‌ها ۱/۲۲ میلی‌متر در روز و MBE ۰/۸۵ میلی‌متر در روز حاصل شد. این مقادیر مثبت دلالت بر اریب بیشتر مدل WaPOR در این مناطق به بیش‌برآورد نمودن ET_0 دارد. میانگین nRMSE نیز در اقلیم‌ها ۲۶ درصد بود که نسبت به اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر است و به‌ویژه در فصل رشد برنج در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب، مدل دقت کمتری در برآورد تبخیر-تعرق مرجع از خود نشان داد.

به طور کلی، نتایج این مطالعه نشان داد که هرچند مدل WaPOR قادر است در برخی شرایط اقلیمی برآورد قابل قبولی از ET_0 ارائه دهد، اما میزان اریب آن تحت تأثیر نوع اقلیم متفاوت است. بر این اساس، استفاده مستقیم از داده‌های WaPOR بدون اعمال روش‌های تصحیح اریب، به‌ویژه در مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب، ممکن است منجر به تصمیم‌گیری‌های نادقیق در برنامه ریزی آبیاری گردد. توصیه می‌شود که در مطالعات آینده، روش‌های تصحیح اریب مختلف به کار گرفته شوند تا قابلیت اعتماد این پایگاه داده در کاربردهای عملی و برنامه‌ریزی آبیاری افزایش یابد.

تحلیل سهم اجزای تابشی و همرفتی در فرآیند تبخیر–تعرق نشان داد که افزایش سهم تابشی با کاهش دقت مدل WaPOR همراه است، در حالی که افزایش سهم همرفتی موجب بهبود دقت پیش‌بینی می‌شود. برای بررسی دقیق‌تر اثر سهم تابشی بر دقت مدل، نتایج ET_0 در ۴۲ ایستگاه تحلیل شد و برای نمایش الگوهای ماهانه، هیت‌مپی تهیه و ارائه گردید که سهم تابشی را برای ایستگاه‌ها و اقلیم‌های مختلف در ماه‌های سال نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل حاکی از آن است که در ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های مرطوب، سهم تابشی در ماه‌های گرم به بیش از ۶۰ درصد می‌رسد و با کاهش دقت مدل در همان دوره‌ها همزمان است، در حالی که در ایستگاه‌های واقع در اقلیم‌های خشک سهم تابشی کمتر و سهم همرفتی بیشتر است که با دقت بالاتر مدل همراه است. این یافته‌ها بر نقش معنادار سهم تابشی در تغییرات دقت ET_0 تأکید دارند و تحلیل فصلی آن می‌تواند در بهینه‌سازی و کاربرد دقیق‌تر مدل در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مؤثر باشد.

با این حال، در اقلیم‌های مرطوب‌تر، به ویژه در دوره‌های رشد محصولاتی مانند برنج، دقت مدل کاهش یافته و نیازمند بهینه‌سازی بیشتری برای تطبیق با شرایط اقلیمی این مناطق است. بنابراین، استفاده از مدل WaPOR در چنین اقلیم‌هایی نیازمند تنظیمات دقیق‌تر و بازبینی است. با توجه به کمبود داده‌های ایستگاهی در برخی مناطق، مدل WaPOR می‌تواند به عنوان جایگزینی برای برآورد ET_0 به کار رود، هرچند دقت آن در اقلیم‌های مختلف ممکن است نیازمند اصلاحات و بازبینی بیشتر باشد.

"هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

منابع

باریده، رحمان و ویسی، شادمان (۱۴۰۰). ارزیابی تبخیر و تعرق مرجع محصول سنجش از دوری WaPOR در مقیاس روزانه با استفاده از داده های میدانی در حوضه دریاچه ارومیه. هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه تجدید حیات حکیمانه خاک و حکمروائی حکیمانه آب، کرج.

کماجیان، سروش (۱۴۰۱). برآورد تبخیر و تعرق مرجع ET_0 با استفاده از داده‌های WAPOR فائو در سطح استان قزوین در سامانه‌ی سنجش از دور Google Earth Engine، چهارمین کنفرانس ملی هیدرولوژی ایران، شهرکرد.

ویسی، شادمان، نوری و جباری (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد پایگاه داده‌های WaPOR و ERA5 با هدف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در حوضه آبریز دریای خزر. پژوهش آب در کشاورزی, ۳۷(۲), ۱۹۳-۲۰۶.

اسلام گله بان، سعید حمزه، شادمان ویسی، سید کاظم علوی پناه (۱۴۰۱) . برآورد تبخیر و تعرق مرجع روزانه با استفاده از داده های سنجش از دور (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان)، فصلنامه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۴(۲) ، ۳۷-۵۰.

REFERENCE

Abedi-Koupai, J., Dorafshan, M.M., Javadi, A. et al., (2022). Estimating potential reference evapotranspiration using time series models (case study: synoptic station of Tabriz in northwestern Iran). Applied Water Science, 12, p.212.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Barideh, R., & Veysi, Sh. (2021). Evaluation of reference evapotranspiration from WaPOR remote sensing product at a daily scale using field data in the Urmia Lake Basin. Proceedings of the 17th Iranian Soil Science Congress and the 4th National Conference on On-Farm Water Management: Wise Soil Regeneration and Wise Water Governance, Karaj. [In Persian].

Barideh, R., Veysi, S., Ebrahimipak, N., & Davatgar, N. (2022). The challenge of reference evapotranspiration between the WaPOR data set and geostatistical methods. Irrigation and Drainage, 71(5), 1268-1279.

Fakhar, M.S. and Kaviani, A., (2024). Estimation of water consumption volume and water efficiency in irrigated and rainfed agriculture based on the WaPOR database in Iran. Journal of Water and Climate Change, 15(6), pp.2731-2752.

FAO. (2020a). WaPOR database methodology: Version 2 release, April 2020. Rome.

FAO. (2020b). WaPOR V2 quality assessment – Technical Report on the Data Quality of the WaPOR FAO Database version 2. Rome.

Farzanpour, H., Shiri, J., Sadraddini, A. A., & Trajkovic, S. (2019). Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. Hydrology Research, 50(1), 282-300.

Geshnigani, F.S., Mirabbasi, R. and Golabi, M.R., (2021). Evaluation of FAO's WaPOR product in estimating the reference evapotranspiration for stream flow modeling. Theoretical and Applied Climatology, 144, pp.191-201.

Ghaleban, S., Hamzeh, S., Veysi, Sh., and Alavipanah, S.K., (2022). Estimation of daily reference evapotranspiration using remote sensing data (Case Study: Sistan and Baluchestan Province). Iranian Journal of Remote Sensing and GIS, 2, pp.37-50. [In Persian].

Golabi, M.R., Niksokhan, M.H. and Radmanesh, F., (2020). Estimating reservoir evaporation: fusing Kohli and Frenken method and the FAO's WaPOR Product. Arabian Journal of Geosciences, 13, pp.1-9.

Khamajian, S. (2022). Estimation of reference evapotranspiration (ET_0) using FAO WaPOR data in Qazvin Province through Google Earth Engine remote sensing system. Proceedings of the 4th National Conference on Hydrology of Iran, Shahrekord. [In Persian].

Nazari, M., Chaichi, M. R., Kamel, H., Grismer, M., & Sadeghi, S. M. M. (2020). Evaluation of estimation methods for monthly reference evapotranspiration in arid climates. Arid Ecosystems, 10(4), 329-336.

Samani, Z. (2000). Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. Journal of irrigation and drainage engineering, 126(4), 265-267.

Shirmohammadi-Aliakbarkhani, Z., & Saberali, S. F. (2020). Evaluating of eight evapotranspiration estimation methods in arid regions of Iran. Agricultural Water Management, 239, 106243.

Veysi, S., Nouri, M., and Jabbari, A., (2024). Reference evapotranspiration estimation using reanalysis and WaPOR products in dryland croplands. Heliyon, 10(4).

Veysi, S., Nouri, M., and Jabbari, A., (2023). Evaluation of WaPOR and ERA5 databases for estimating reference evapotranspiration in the Caspian Sea Basin. Journal of Water Research in Agriculture, 2, pp.193-206. [In Persian].

Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration–a review. Agricultural Water Management, 232, 106043.

Xie, Y. L., Xia, D. X., Ji, L., & Huang, G. H. (2018). An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. Ecological indicators, 92, 301-311.

Yavaşlı, D. D., & Erlat, E. (2023). Climate model projections of aridity patterns in Türkiye: A comprehensive analysis using CMIP6 models and three aridity indices. International Journal of Climatology, 43(13), 6207-6224.

Yue, Z., Zhuo, L., Ji, X., Tian, P., Gao, J., Wang, W., ... & Wu, P. (2025). Water-saving irrigated area expansion hardly enhances crop yield while saving water under climate scenarios in China. Communications Earth & Environment, 6(1), 295.

Zareabayneh, H., Noori, H., Liaghat, A., Noori, H. & Karimi, V., (2011). Comparison of Penman-Monteith FAO Method and a Class Pan Evaporation with Lysimeter Measurements in Estimation of Rice Evapotranspiration in Amol Region. Physical Geography Research, 43(76), pp.71–83.