

Performance evaluation of different potential evapotranspiration models and application of optimal models for drought monitoring using the RDI index across different climate regimes of Iran

Khadijeh Javan^{1*}, Ameneh Yahyavi Dizaj², Behnaz Shaheni³

¹ Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

² Postdoctoral Researcher, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

³ B.Sc, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

Drought is a climatic anomaly that results from long-term disruptions in the components of the water balance. This phenomenon has both direct and indirect adverse impacts, with water resources being the most severely affected. Water scarcity and its associated challenges are recognized as among the most critical and urgent global crises. Although drought cannot be prevented, understanding its nature and characteristics enhances the potential for partial prediction and, through preparedness and planning, helps reduce (and, where possible, control) its detrimental effects. Therefore, greater attention must be paid to drought and to identifying the key factors influencing it across different regions, particularly in vulnerable countries such as Iran, which faces growing water scarcity. The increasing need to understand drought and its consequences has motivated extensive global research aimed at developing various drought indices. Among these, the Reconnaissance Drought Index (RDI), is one of the most notable.

Materials and Methods

In this study, daily observational data from nine synoptic stations covering a 30-year period (1991–2020) were obtained from the Iran Meteorological Organization to estimate potential evapotranspiration and the RDI index. These stations were selected so that each represents one of Iran's major climatic groups. In this research, the performance of six temperature-based models and three radiation-based models for estimating potential evapotranspiration was evaluated. The primary goal of the analysis was to identify which of these simplified approaches provided results most consistent with the FAO Penman–Monteith (FAO-56 PM) model, which is widely recognized as the standard reference method.

Results and Discussion

Evaluation of Daily Potential Evapotranspiration Models

The results indicated that the performance of evapotranspiration models is strongly influenced by the climatic conditions of each region. For example, the Blaney–Criddle model performed best in certain climates, while the same model showed lower accuracy in others. This finding is consistent with previous studies, which have emphasized the role of climatic factors in drought monitoring. Moreover, the variability in model performance across different regions further underscores the need to evaluate and select models that are appropriate for the specific climatic conditions of each area. This observation also aligns with previous findings, which stressed the importance of model adaptability to local conditions. Overall, it can be concluded that choosing the appropriate model for estimating evapotranspiration is a crucial step in drought studies and water resource management and must be carried out with careful consideration of each region's climatic characteristics.

Evaluation of Monthly Potential Evapotranspiration Models

Overall, the results demonstrate that, similar to the daily scale, temperature-based models do not exhibit uniform behavior across different climates at the monthly scale. A model may perform exceptionally well in one climate while ranking among the weakest in another. These differences highlight the necessity of considering climate type, geographical characteristics, the study period, and careful model selection in climatological research.

Assessment of Drought Using the 6- and 12-Month RDI Indices for Optimal Models at Selected Stations

The overall findings of this study indicate that at the 6-month timescale, the frequency of drought and wet periods is higher, whereas at the 12-month timescale, their frequency decreases, but their persistence increases. This result confirms previous studies that examined meteorological, agricultural, and hydrological drought indices in the

Mahabad plain. Furthermore, based on the results of the present study, the 12-month RDI was identified as a more suitable timescale for monitoring drought and wet periods, which is consistent with previous studies.

Conclusion

Frequent drought events and the significant damage they cause in various sectors, including agriculture, the environment, socio-economic sectors, and other areas, have made this phenomenon one of the fundamental challenges in different regions of the world. The present study aimed to evaluate the performance of different potential evapotranspiration models and their influence on the RDI drought index across diverse climatic zones, using 30 years (1991–2020) of data from nine synoptic stations representing nine distinct climate types in Iran (BSh, BSk, BWh, BWk, Cfa, Csa, Csb, Dsa, Dsb). The evaluation of nine evapotranspiration models showed that their performance is strongly affected by the climatic characteristics of each region. For example, the Droogers–Allen model performed best in cold semi-arid (BSk), Mediterranean temperate with warm summers (Csb), and cold climates with dry, warm summers (Dsb), whereas the same model exhibited poor performance in hot semi-arid climates (BSh) and several other regions. In the drought analysis section, comparison of the 6- and 12-month RDI indices revealed that although both timescales confirm the occurrence of frequent droughts during most of the study period, the 12-month RDI was identified as the more suitable scale for drought monitoring and analysis in Iran. This is due to its ability to filter out short-term fluctuations and better reflect the persistence of drought periods.

Keywords: Potential Evapotranspiration, Optimal Model, RDI Index, Climate Diversity, Iran.

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the Urmia University for the financial and logistical supports who significantly contributed during the research project.

Conflicts of interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Khadijeh Javan: Formal analysis and investigation, original draft preparation, Supervision; **Ameneh Yahyavi Dizaj:** Methodology, Manuscript writing; **Behnaz Shaheni:** Resources, Software.

*Corresponding Author, E-mail: kh.javan@urmia.ac.ir

Citation: Javan, Kh., Yahyavi Dizaj, A., & Shaheni, B. (2026). Evaluation of the performance of different potential evapotranspiration models and their impact on the RDI drought index in different climates of Iran, *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 35-55.

doi: 10.22098/mmws.2025.18956.1741

Received: 02 December 2025, Received in revised form: 22 December 2025, Accepted: 07 January 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 35-55.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





ارزیابی عملکرد مدل های تبخیر و تعرق پتانسیل و کاربرد مدل های بهینه در پایش خشکسالی با شاخص RDI در اقلیم های مختلف ایران

خدیدجه جوان^{۱*}، آمنه یحیوی دیزج^۲، بهناز شاهنی^۳

^۱ دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۲ پژوهشگر پسادکتری، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ کارشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

خشکسالی یکی از مهم ترین پدیده های اقلیمی است که هر ساله خسارات قابل توجهی به مناطق مختلف جهان وارد می کند. بررسی دقیق خشکسالی و شاخص های مرتبط با آن می تواند اطلاعات ارزشمندی برای برنامه ریزی و مدیریت منابع آب فراهم سازد. در این پژوهش، عملکرد ۹ مدل تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و تأثیر آن ها بر شاخص خشکسالی RDI در ایران طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور، داده های ۱۲ ایستگاه همدید نماینده ۹ گروه اقلیمی ایران شامل اقلیم نیمه بیابانی گرم (BSH)، نیمه بیابانی سرد (BSK)، بیابانی گرم (BWh)، بیابانی سرد (BWk)، معتدل پر باران با تابستان های گرم (Cfa)، معتدل پر باران با تابستان های بسیار گرم (Csa)، معتدل با تابستان های گرم (Csb)، برفی با تابستان های بسیار گرم (Dsa) و برفی با تابستان های گرم (Dsb) استفاده شد. دقت مدل ها با معیارهای $RMSE$ ، MAE ، R^2 و d در مقیاس روزانه و ماهانه ارزیابی و مدل بهینه هر اقلیم برای محاسبه شاخص های RDI-6 و RDI-12 به کار رفت. نتایج نشان داد که عملکرد مدل های PET در اقلیم های مختلف متفاوت است؛ برای مثال، مدل دروگرز-آلن در مقیاس روزانه در اقلیم های BSk (تبریز و مشهد) و Dsb (آبعلی) به ترتیب با $RMSE$ برابر ۰/۱۲ و ۰/۰۳ و ۰/۸۱ میلی متر در روز و ضریب توافق (d) بالای ۰/۹۵ بهترین عملکرد را داشت، اما در اقلیم های BSh و Csa به ترتیب با $RMSE$ برابر ۱/۵۱ و ۱/۷۵ کمترین دقت را نشان داد. در بین مدل های مبتنی بر دما، مدل بلانی-کریدل در پنج ایستگاه (با $RMSE$ بین ۰/۲۷ تا ۱/۵۷) دقیق ترین برآورد را ارائه کرد. در میان مدل های تابشی، مدل ایرماک در هفت اقلیم از نه اقلیم مورد مطالعه بهترین نتایج را داشت، اما در اقلیم Csb (با $RMSE$ برابر ۹/۵۴) عملکرد آن ضعیف بود. همچنین، شاخص RDI-12 به علت کاهش نوسانات کوتاه مدت و اثرپذیری کمتر از تغییرات فصلی، مناسب ترین مقیاس زمانی برای پایش خشکسالی و ترسالی در اقلیم های متنوع ایران است.

واژه های کلیدی: تبخیر و تعرق پتانسیل، مدل بهینه، شاخص RDI، تنوع اقلیمی، ایران.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: kh.javan@urmia.ac.ir

استناد: جوان، خدیجه، یحیوی دیزج، آمنه و شاهنی، بهناز (۱۴۰۵). ارزیابی عملکرد مدل های مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل و تأثیر آن ها بر شاخص خشکسالی RDI در اقلیم های گوناگون ایران، *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۳۵-۵۵.

doi: 10.22098/mmws.2025.18956.1741

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۱۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵، دوره ۶، شماره ۳، صفحه ۳۵ تا ۵۵.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی نویسنده گان ©



۱-مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های زیان‌بار اقلیمی است که در اکثر مناطق جهان رخ می‌دهد، اما پیامدهای آن بسته به ویژگی‌ها و آسیب‌پذیری هر منطقه متفاوت است. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود همواره در معرض تأثیرات منفی خشکسالی قرار دارد (Javan and Yahyavi Dizaj, 2024). خشکسالی به‌طور معمول به‌عنوان دوره‌ای از شرایط خشک تعریف می‌شود که میزان بارش کم‌تر از حد نرمال و احتمال افزایش دما بیش‌تر از شرایط میانگین منطقه باشد (Sedaghat Nejad, 2024). به بیان دیگر، خشکسالی یک ناهنجاری اقلیمی است که در اثر اختلال در اجزای بیلان آب در یک دوره زمانی طولانی رخ می‌دهد (Wang et al., 2021; Portner et al., 2022; Zhang et al., 2023; Kartal., 2024; Tareke., 2025). این پدیده به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم اثرات زیان بخشی را وارد می‌کند که مهم‌ترین اثر مستقیم آن بر منابع آب است (Baloei et al., 2024). کمبود آب و چالش‌های ناشی از آن، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و بزرگ‌ترین بحران‌های حال حاضر معرفی شده است (Zarei and Moghimi, 2019). گرچه نمی‌توان از وقوع خشکسالی جلوگیری کرد، اما اگر ماهیت و خصوصیات آن مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد می‌توان نسبت به پیش‌بینی نسبی آن امیدوار بود و با آمادگی و برنامه‌ریزی، اثرات زیان‌بار آن را کاهش و در صورت ممکن کنترل کرد (Rezaei et al., 2024). این امر نشان‌دهنده اهمیت و توجه بیش‌تر به مسأله خشکسالی و شناسایی عوامل مهم تأثیرگذار بر آن در مناطق مختلف جهان است؛ به‌ویژه در کشورهای آسیب‌پذیری مانند ایران که با کمبود آب مواجه هستند.

ضرورت شناخت پدیده خشکسالی و تغییرات مقدار آب مصرفی گیاهان به‌عنوان یکی از پیامدهای آن، سبب انجام پژوهش‌های متعددی شده که در این رابطه پژوهشی با هدف بررسی تغییرات مقدار آب مصرفی گیاهان الگوی کشت، برای برخی از مناطق شمال غرب کشور، به‌صورت تابعی از پارامترهای اقلیمی انجام گرفت؛ نتایج نشان داد که میزان تغییرات هیدرومدول آبیاری در پنج ایستگاه کشور شامل تبریز، کلبر، پارس‌آباد، گرمی و بوکان حاکی از تأثیر تغییرات مکانی بر نتایج بوده؛ به‌طوری‌که ایستگاه کلبر به‌دلیل داشتن آب و هوای سرد و بالا بودن ارتفاع خود دارای کم‌ترین و ایستگاه گرمی به‌دلیل پایین بودن بارش کل دارای بیش‌ترین مقدار هیدرومدول بوده است (Amirzadeh et al., 2025). در پژوهشی دیگر بررسی میانگین هیدرومدول آبیاری ارومیه، ماکو، مراغه، میانه و خلخال نشان داد ایستگاه ماکو به‌دلیل

داشتن آب و هوای سرد و خشک و بالا بودن ارتفاع خود، دارای کم‌ترین و بیش‌ترین مقدار هیدرومدول آبیاری بوده است (Raouf et al., 2024). هم‌چنین، برای شناسایی پدیده خشکسالی شاخص‌های مختلفی توسعه یافته است.

یکی از شاخص‌های مهم، شاخص شناسایی خشکسالی RDI^۱ است که توسط Tsakiris et al. (2007) ارائه شده است. طی پژوهشی شاخص‌های RDI و SPI در شیراز با هم مقایسه شدند. نتایج نشان داد که شاخص RDI نتایج بهتر و دقیق‌تری را نشان می‌دهد و این شاخص برای پایش خشکسالی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که میزات بارندگی آن کم است، پیشنهاد شد (Ansarifard and Shamsnia, 2018). در پژوهشی دیگر شاخص‌های مختلف خشکسالی RDI و SPI در منطقه خشک و نیمه‌خشک هند با استفاده از نرم‌افزار DrinC مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد شاخص RDI به‌دلیل مطابقت و پیش‌بینی با دقت مناسب و بالا در سال‌های خشک و مرطوب به‌عنوان یک شاخص مؤثر در پایش خشکسالی در نظر گرفته شد (Surendran et al., 2019). هم‌چنین، Torabi Haghighi et al. (2020) به مقایسه خشکسالی‌های مختلف در مناطق مختلف جغرافیایی در اقلیم‌های مختلف پرداختند و نتایج متفاوتی از نظر تشابه رفتاری یا عدم تشابه رفتاری شاخص‌ها گزارش کردند. در پژوهشی با بکارگیری ۱۰ شاخص SPI، SPEI، scPDSI، CZI، MCZI، RAI، RDI، DI، PNI و ZI به پایش خشکسالی در حوضه جبهان کشور ترکیه پرداختند. در پژوهش آن‌ها به‌جزء شاخص scPDSI بقیه شاخص‌ها در مقیاس یک ماهه همبستگی بالایی با یکدیگر داشتند و شاخص‌های SPI، SPEI و RDI در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با یکدیگر همبستگی بسیار بالایی داشتند (Yuce and Esit., 2021). نتایج پژوهش‌های مختلف حاکی از آن است که شاخص RDI به‌دلیل در نظر گرفتن هم‌زمان بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، در بسیاری از مطالعات مبنای ارزیابی شدت خشکسالی و برآورد خسارات بالقوه آن قرار گرفته است (Sadeghian Agkandy et al., 2024). بررسی شاخص‌های مختلف طی پژوهشی بیان‌گر آن است که شاخص SPI یک شاخص بارش محور است، ضعیف‌ترین عملکرد را بین شاخص‌های RDI و SPEI دارد، در صورتی‌که شاخص‌های RDI و SPEI برای تخمین شدت خشکسالی از آمار بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کنند عملکرد مناسبی دارند (Fotovat et al., 2025).

بر همین اساس در پژوهش حاضر نیز از شاخص RDI برای بررسی خشکسالی در ایران استفاده شده است. نتایج مطالعات

¹ Reconnaissance drought index

پژوهش ارزیابی عملکرد مدل‌های تبخیر و تعرق پتانسیل و کاربرد مدل‌های بهینه در پایش خشکسالی با شاخص RDI در اقلیم‌های مختلف ایران است. نوآوری این مطالعه در ارائه مدل‌های بهینه برای هر اقلیم به‌عنوان مرجعی دقیق‌تر و با نیاز داده‌ای کم‌تر، تأکید بر مدل‌های مبتنی بر داده‌های حداقلی برای پایش عملی خشکسالی در مناطق کم‌داده، و تولید یک راهنما از مناسب‌ترین مدل‌ها و الگوی خشکسالی به‌عنوان ابزاری ضروری برای برنامه‌ریزی کلان مدیریت خشکسالی است. بدین منظور، شاخص RDI در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ برای ۱۲ ایستگاه سینوپتیک منتخب (نماینده ۹ اقلیم اصلی) محاسبه شد. انتظار می‌رود نتایج این مطالعه بتواند به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در مدیریت و کنترل خشکسالی در سراسر کشور کمک کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کشور ایران است که در جنوب غربی آسیا واقع شده است (شکل ۱). ایران به‌دلیل قرارگیری بیش از ۸۰ درصد آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، دارای اقلیم غالب خشک و نیمه‌خشک است (Vaghefi et al., 2019). با این حال، گستردگی ایران در عرض‌های جغرافیایی ۳۰° تا ۴۷° ۳۹° و طول‌های ۵° ۴۴° تا ۱۸° ۶۳° نیز وجود ناهمواری‌های ارتفاعی کم‌تر از ۲۰ متر در سواحل دریای خزر تا بیش از ۵۵۰۰ متر در قله دماوند در رشته کوه‌های البرز، موجب ایجاد خرداقلیم‌های متنوع در این کشور شده است. علاوه بر این، ارتفاعات زاگرس در غرب ایران نیز نقش به‌سزایی در تنوع اقلیمی و پراکندگی بارش و دما ایفا می‌کنند. از این‌رو، در این پژوهش برای شناخت بهتر مناطق اقلیمی مختلف ایران و بررسی خشکسالی در آن (شکل و جدول ۱)، از طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر (Rahimi et al., 2020) استفاده شده است.

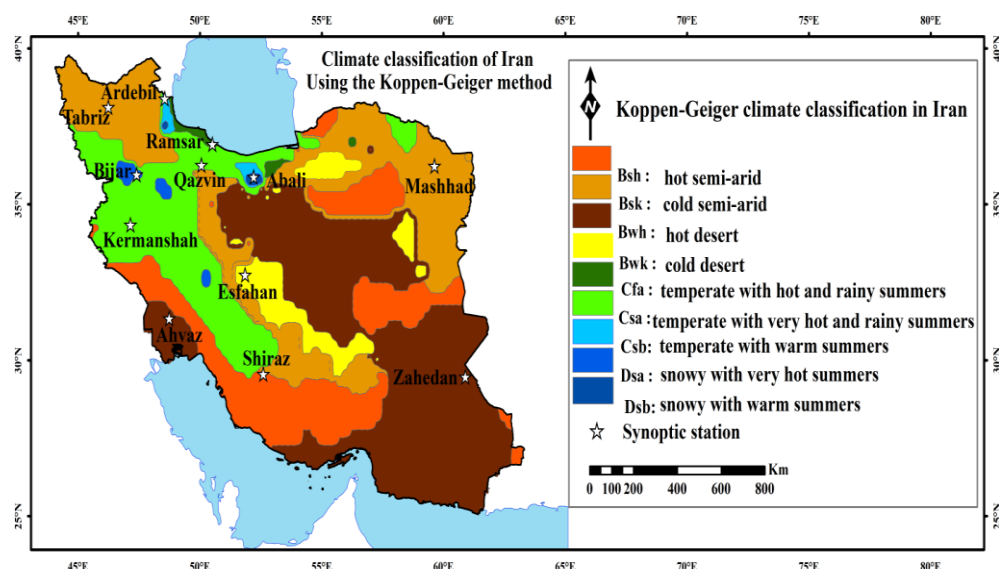
(Ghabaei et al., 2016; Bazrafshan, 2017; Sobhani et al., 2019; Zarei, 2019) نشان‌دهنده افزایش بودن روند خشکسالی در مناطق مختلف ایران است. همچنین، در پژوهشی (Javan et al., 2025) با موضوع «پایش خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص‌های RDI و eRDI» اشاره کردند که اگرچه شاخص eRDI به‌علت استفاده از بارش مؤثر، می‌تواند در شناسایی و پایش خشکسالی کشاورزی بسیار کارآمد باشد، اما در مطالعه آن‌ها تفاوت قابل‌توجهی بین نتایج دو شاخص مشاهده نشد. از این‌رو، می‌توان از شاخص RDI برای پایش و تحلیل خشکسالی در حوضه دریاچه ارومیه و سایر مناطق با ویژگی‌های اقلیمی مشابه استفاده کرد (Javan et al., 2025). در همین زمینه، Omar et al. (2022) با به‌کارگیری چهار شاخص خشکسالی RDI، eRDI، SPI و eSPI، مدلی برای پیش‌بینی میزان محصول نهایی ذرت دیم در مکزیک ارائه کردند. نتایج این پژوهش به‌عنوان مدلی کاربردی برای مطالعات آبی معرفی شده است. در پژوهش دیگری، Mianabadi et al. (2022) خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) و بلندمدت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) را با استفاده از شاخص SPI و داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS در جنوب‌شرق ایران بررسی کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که طی دوره ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (شامل SPI-3، SPI-6 و SPI-9) با شدت کم‌تر و مدت کوتاه‌تری رخ داده‌اند.

بررسی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه پژوهش‌های فراوانی در زمینه توصیف ویژگی‌های خشکسالی در ایران انجام شده است، اما تحلیل جامعی که عملکرد مدل‌های مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل و تأثیر آن‌ها بر شاخص RDI در اقلیم‌های متنوع ایران را نشان دهد، هنوز وجود ندارد. این شکاف پژوهشی مانع درک کامل تأثیر مدل‌های مختلف بر شاخص خشکسالی و نتایج پایش آن‌ها در اقلیم‌های مختلف می‌شود. بنابراین، هدف این

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مطالعاتی و گروه‌های اقلیمی (Koppen Geiger) منطقه مورد مطالعه

Table 1. Characteristics of study stations and climate groups (Koppen Geiger) of the study area

Region	Climate Type	Symbol	Representative Station	Longitude	Latitude
1	Hot Semi-Arid	BSh	Shiraz	52.6	29.53
2	Cold Semi-Arid	BSk	Tabriz	46.28	38.08
			Mashhad	59.63	36.24
3	Hot Desert	BWh	Zahedan	60.9	29.47
			Ahvaz	48.74	31.34
4	Cold Desert	BWk	Esfahan	51.66	32.61
5	Warm Temperate with Hot Summers	Cfa	Ramsar	50.66	36.9
6	Temperate with Very Hot Summers	Csa	Qazvin	50.05	36.25
			Kermanshah	47.15	34.35
7	Temperate with Hot Summers	Csb	Ardebil	48.56	38.39
8	Snowy with Very Hot Summers	Dsa	Bijar	47.61	35.88
9	Snowy with Hot Summers	Dsb	Abali	51.88	35.75



شکل ۱- مناطق اقلیمی ایران به روش کوبین-گایگر (Raziei and Miri, 2022)

نمایش ایستگاه‌های نماینده، روی مناطق اقلیمی ایران (نگارندگان)

Figure 1. Climatic regions of Iran according to the Koppen-Geiger method (Raziei and Miri, 2022)
Representative stations across the climatic regions of Iran

در این پژوهش، عملکرد شش مدل مبتنی بر دما و سه مدل مبتنی بر تابش برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ارزیابی شد. هدف نهایی از این تحلیل، شناسایی مدلی است که در میان این مدل‌های ساده شده، نتایجی را تولید می‌کند که بیش‌ترین انطباق را با مدل فائو-پنمن-مانتیت (FAO-56 PM) به‌عنوان مدل مرجع و استاندارد دارد (Allen et al., 1998). مدل‌های مبتنی بر دما شامل مدل‌های هارگریوز-سامانی، دروگرز-آلن، آلن، دورجی، بلانی-کریدل، تورنت وایت و مدل‌های مبتنی بر تابش شامل مدل‌های پرستلی-تیلور، ماکینگ و ایرماک است.

مدل فائو-پنمن-مانتیت

روش فائو-پنمن-مانتیت که برای محاسبه تبخیر و تعرق مرجع در بازه‌های زمانی روزانه و ماهانه کاربرد دارد، با استفاده از پارامترهای مربوط به گیاه چمن (شامل ارتفاع ۰/۱۲ متر، مقاومت سطحی ثابت ۷۰ ثانیه بر متر و ضریب آلبدو ۰/۲۳) در رابطه ۱ ارائه شده است (Allen et al., 1998).

PET

$$= \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

که در آن، PET تبخیر تعرق مرجع یا پتانسیل (mm day⁻¹)؛ R_n تابش خالص (MJ m⁻² day⁻¹)؛ G چگالی شار گرمایی خاک (MJ m⁻² day⁻¹)؛ γ ثابت سایکرومتریک (kPa °C⁻¹)؛ T_a میانگین دمای هوای روزانه (°C)؛ U₂ سرعت باد در ارتفاع ۲ متری سطح زمین (m s⁻¹)؛ e_a فشار بخار واقعی (kPa)؛ e_s فشار بخار اشباع (kPa)؛ Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع در مقابل دما (kPa °C⁻¹) است (Allen et al. 1998).

۲-۲- داده‌ها

در این پژوهش، برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص خشکسالی RDI، داده‌های مشاهداتی روزانه ۱۲ ایستگاه سینوپتیک طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. داده‌های مورد استفاده شامل متغیرهای دمای بیشینه، کمینه و متوسط (درجه سانتی‌گراد)، رطوبت نسبی (درصد)، سرعت باد (متر بر ثانیه)، ساعات آفتابی (ساعت) و بارش (میلی‌متر) بودند. محسوب می‌شوند.

انتخاب ایستگاه‌های نماینده: با توجه به پهنه وسیع و تنوع اقلیمی کشور، انتخاب ایستگاه‌ها به‌صورت هدفمند و براساس معیارهای مشخصی انجام گرفت تا نمایندگی مناسبی از هر گروه اقلیمی و نیز پراکندگی جغرافیایی کشور فراهم شود. نخست، هر ایستگاه می‌بایست در یکی از گروه‌های اقلیمی تعریف‌شده در چارچوب این مطالعه قرار می‌گرفت. معیار بعدی، کامل بودن و طول دوره آماری داده‌ها بود که در آن اولویت با ایستگاه‌های دارای بلندترین دوره پیوسته و کامل داده‌های هواشناسی مورد نیاز (شامل دمای کمینه و بیشینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی) قرار داشت. افزون بر این، در گروه‌های اقلیمی اصلی و وسیع، با انتخاب بیش از یک ایستگاه، پراکندگی جغرافیایی درون هر ناحیه اقلیمی و تغییرات درون اقلیمی نیز مورد توجه قرار گرفت. در نهایت، انتخاب ایستگاه‌ها به گونه‌ای انجام شد که مناطق اصلی و جهات جغرافیایی مختلف کشور (شمال شرق، جنوب غرب، غرب و مرکز) نماینده‌ای در مطالعه داشته باشند. نقشه پراکنش ایستگاه‌های منتخب در شکل ۱ و مشخصات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۳- روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق

مدل‌های مبتنی بر دما

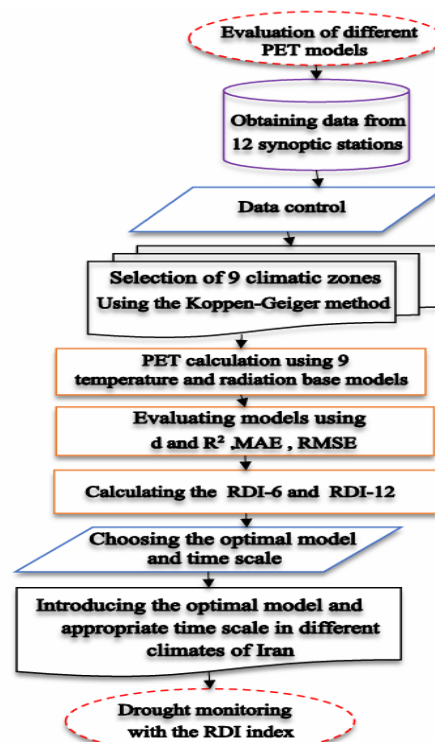
مدل‌های این دسته عمدتاً با تکیه بر داده‌های دمایی (مانند میانگین، حداقل و حداکثر دما) و نیازمند پارامترهای ورودی کمتری نسبت به مدل مرجع فائو-پنمن-مانتیث هستند. این ویژگی، آن‌ها را به گزینه‌هایی کاربردی و محبوب در مناطق فاقد داده‌های کامل هواشناسی تبدیل کرده است. مراحل روش پژوهش در شکل ۲ نشان داده شده است: در این پژوهش، شش مدل شناخته شده از این دسته مورد ارزیابی قرار گرفتند:

الف- مدل هارگریوز سامانی

رابطه هارگریوز سامانی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده توسط لایسیمتر وزنی در دیویس کالیفرنیا به صورت زیر ارائه شده است:

$$PET = 0.408 \times 0.0023 \times (T_a + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (2)$$

در رابطه ۲: T_{min} و T_{max} به ترتیب بیشینه و کمینه دما ($^{\circ}\text{C}$) هستند و R_a تابش فرازمینی ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) است (Hargreaves and Samani, 1985).



شکل ۲: فلوچارت مراحل روش تحقیق

Figure 2. Flowchart of the research methodology

ب- مدل دروگرز-آلن

این مدل در واقع یک واسنجی مجدد از مدل هارگریوز-سامانی برای بهبود دقت برآورد است که با هدف افزایش دقت در مناطق خشک و نیمه‌خشک توسعه یافته است و از رابطه زیر به دست می‌آید (Droogers and Allen, 2002):

$$PET = 0.408 \times 0.0025 \times (T_a + 16.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times R_a \quad (3)$$

ج- مدل آلن

این مدل نیز در چارچوب مشابه مدل هارگریوز توسعه یافته و با تنظیم ضرایب، سعی در بهبود برآورد دارد (Allen, 1993).

د- مدل دورجی

این مدل نیز با تنظیم ضرایب و توان‌ها در چارچوب مدل هارگریوز-سامانی و برای شرایط خاص اقلیمی توسعه یافته است (Dorji et al., 2016):

$$PET = 0.408 \times 0.0020 \times (T_a + 33.9) \times (T_{max} - T_{min})^{0.296} \times R_a \quad (5)$$

ه- مدل بلانی-کریدل

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های برآورد تبخیر و تعرق است که توسط پروت استاد دانشگاه کالیفرنیا مورد واسنجی قرار گرفت و

در رابطه ۱۰، R_n و T_m به ترتیب تابش خالص خورشیدی و متوسط دمای روزانه هستند.

۴-۲- شاخص خشکسالی RDI

شاخص شناسایی خشکسالی (RDI) که توسط Tsakiris et al. (2007) توسعه یافته است، بر پایه نسبت بارش به تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می شود. این شاخص را می توان هم در مقیاس سالانه و هم در مقیاس ماهانه (برای مثال در یک دوره k ماهه) محاسبه کرد. فرم اولیه این شاخص (RDI_k) برای سال i ام با استفاده از رابطه ۱۱ به دست می آید:

$$RDI_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad (11)$$

که در آن، P و PET به ترتیب، بارندگی و تبخیر تعرق پتانسیل در زمین ماه از سال i هستند. مقدار i از یک تا n (تعداد سال هایی است که آمار آن در دسترس است) تغییر خواهد کرد (Tsakiris et al., 2007). این شاخص به طور مستقیم توازن بین دو متغیر اقلیمی اصلی تأمین کننده و مصرف کننده آب را منعکس می کند. در این پژوهش، شاخص RDI در مقیاس های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شد. این انتخاب مبتنی بر دلایل زیر بود: نخست، مقیاس های بلندمدت تر، نوسانات کوتاه مدت و فصلی را هموار می کنند و امکان شناسایی الگوهای پایدار خشکسالی را فراهم می سازند. دوم، این مقیاس ها با چرخه های مدیریت منابع آب (نظیر ذخیره مخازن و آبخوان ها) هماهنگی بیشتری دارند و از این رو برای اهداف کاربردی و مدیریتی مناسب تر تشخیص داده شدند. سوم و به طور ویژه، تحلیل های اولیه و مطالعات پیشین در منطقه نشان می دهد که شاخص های بلندمدت تر مانند RDI-12، به دلیل اثرپذیری کمتر از تغییرات آبی، قابلیت اطمینان بالاتری برای پایش و پهنه بندی خشکسالی در ایران دارند.

۴-۲- معیارهای ارزیابی آماری

در این پژوهش، برای سنجش دقت مدل های مختلف در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل از چهار معیار ارزیابی ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، شاخص تطابق (d) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad (13)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (14)$$

برای برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن به صورت زیر ارائه شده است (Blaney and Criddle, 1950):

$$PET = a + b(P(0.46T_{mean} + 8.13)) \quad (6)$$

و- مدل تورنت وایت

روش تورنت وایت بر اساس یک رابطه تجربی بین مقدار تبخیر و تعرق مرجع و میانگین درجه حرارت هوا ارائه شده است. رابطه این روش به صورت زیر است:

$$PET = 16 \left(10 \frac{T_a}{I} \right)^{\alpha} \quad (7)$$

در رابطه ۷، I شاخص گرمای سالانه و α یک چند جمله ای مرتبه سوم است که به I بستگی دارد (Thornthwaite., 1948). این مدل ذاتاً برای محاسبه در مقیاس ماهانه طراحی شده است.

مدل های PET مبتنی بر تابش

این دسته از مدل ها با تکیه بر پارامترهای تابشی به عنوان ورودی اصلی، تبخیر و تعرق را برآورد می کنند. از نظر حجم داده های مورد نیاز، این مدل ها جایگاهی بین مدل فائو-پنمن-مانتیت (که به داده های پیچیده ای مانند باد و رطوبت متکی است) و مدل های مبتنی بر دما (که تنها به داده های دما نیازمندند) دارند. در این مطالعه، سه مدل پرکاربرد از این دسته ارزیابی شده اند.

الف- مدل پرستلی-تیلور

پرستلی و تیلور با اصلاح معادله پنمن، مدلی تجربی برای تعیین تبخیر پتانسیل با استفاده از تابش خالص ارائه دادند که از رابطه ۸ به دست می آید:

$$PET = 1.26 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (8)$$

در رابطه ۸، Δ گرادیان شیب فشار بخار اشباع؛ γ ثابت سایکرومتریک؛ λ گرمای نهان تبخیر برحسب کالری بر گرم؛ R_n تابش خالص خورشیدی (mm/day) و G چگالی شار گرمایی خاک است (Priestley and Taylor, 1972).

ب- مدل ماکینگ

اساس روش ماکینگ بر پایه تشعشعات خورشیدی و درجه حرارت قرار دارد. استفاده از این روش ابتدا در هلند و سپس در استرالیا توسعه یافت و رابطه آن به صورت زیر است (Makkink, 1957):

$$PET = 0.61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0.12 \quad (9)$$

در این رابطه R_s تشعشعات خورشیدی ($MJ m^{-2} day^{-1}$) است.

ج- مدل ایرماک

ایرماک با استفاده از روش رگرسیون چندجمله ای و داده های متعلق به فلوریدا به برآورد تبخیر و تعرق گیاه مرجع پرداخت که به صورت رابطه زیر است (Irmak et al., 2003):

$$ET_0 = 0.489 + 0.289 * R_n + 0.023 * T_m \quad (10)$$

برای هر دو ایستگاه قزوین و کرمانشاه، برفی با تابستان‌های بسیار گرم و برفی با تابستان‌های گرم و مدل پریستلی-تیلور در دو منطقه اقلیمی معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رامسر) و معتدل با تابستان‌های گرم (اردبیل) به‌عنوان مدل‌های بهینه این گروه شناسایی شدند.

نتایج نهایی تعیین مدل بهینه (بر اساس ترکیب ارزیابی مدل‌های مبتنی بر دما و تابش) نشان داد که در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی گرم (شیراز)، بیابانی گرم (برای ایستگاه اهواز)، معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رامسر)، معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (قزوین) و برفی با تابستان‌های بسیار گرم (بیجار) مدل بلانی-کریدل؛ در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی سرد (برای ایستگاه‌های تبریز و مشهد) و برفی با تابستان‌های گرم (آبعلی) مدل‌های آلن و دروگرز-آلن؛ در اقلیم بیابانی گرم (برای ایستگاه زاهدان)، مدل آلن؛ معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (برای ایستگاه کرمانشاه) و در اقلیم بیابانی سرد (اصفهان) مدل‌های آلن و هارگریوز-سامانی به‌عنوان مدل‌های بهینه نهایی شناخته شدند. در اقلیم معتدل با تابستان‌های گرم (اردبیل) نیز مدل پریستلی-تیلور بهترین نتایج را داشت.

این نتایج نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های تبخیر و تعرق به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی هر منطقه قرار دارد. نکته قابل‌توجه، مشاهده تفاوت در مدل بهینه بین برخی ایستگاه‌های متعلق به یک طبقه اقلیمی یکسان (مانند تفاوت بین زاهدان و اهواز در اقلیم BWh و تفاوت بین قزوین و کرمانشاه در اقلیم Csa) است که اهمیت تأثیر ویژگی‌های ریزاقلیمی و داده‌های محلی را در انتخاب نهایی مدل برجسته می‌سازد. به‌عنوان مثال، مدل بلانی-کریدل در برخی اقلیم‌ها و ایستگاه‌ها بهترین عملکرد را داشته است، در حالی که همین مدل در اقلیم‌ها و ایستگاه‌های دیگر از دقت کم‌تری برخوردار بوده است. این یافته‌ها با نتایج مطالعات پیشین از جمله پژوهش (Eghtedar Nezhad et al., 2017) که بر تأثیر عوامل اقلیمی بر پایش خشکسالی تأکید داشتند، هم‌سو است. همچنین، تنوع در عملکرد مدل‌ها در مناطق مختلف، لزوم ارزیابی و انتخاب مدل‌های متناسب با شرایط اقلیمی و حتی ریزاقلیمی هر منطقه را بیش از پیش آشکار می‌سازد. این موضوع با یافته‌های (Lehner et al., 2020; Beobide-Arsuaga et al., 2021) نیز مطابقت دارد که بر ضرورت سازگاری مدل‌ها با شرایط محلی تأکید کرده‌اند. یک نکته کلیدی دیگر در نتایج روزانه، عملکرد سیستماتیک بهتر مدل‌های مبتنی بر دما در مقایسه با مدل‌های مبتنی بر تابش در تمامی ایستگاه‌ها است. این برتری را می‌توان با حساسیت بیش‌تر تبخیر و تعرق پتانسیل به نوسانات روزانه دما و چالش‌های موجود در برآورد دقیق پارامترهای تابشی توضیح داد. تغییرات سریع دمای روزانه (به‌ویژه

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

در روابط ۱۲ تا ۱۵، N: تعداد کل مشاهدات؛ P_i : مقادیر تبخیر و تعرق برآورد شده توسط مدل‌های مورد مطالعه؛ O_i : مقادیر تبخیر و تعرق مرجع (محاسبه شده با مدل فائو-پنمن-مانتیش)؛ $\bar{O}$: میانگین مقادیر مرجع؛ $\bar{P}$: میانگین مقادیر برآورد شده توسط مدل‌های مورد مطالعه است. مقادیر RMSE و MAE بین صفر تا بی‌نهایت متغیر است و مقادیر نزدیک‌تر به صفر نشان‌دهنده دقت بالاتر مدل است. مقادیر d و R^2 بین صفر تا یک تغییر می‌کنند که مقادیر نزدیک‌تر به یک بیان‌گر برازش بهتر مدل هستند (Ortiz-Gómez et al., 2022).

۳- نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق روزانه

ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق روزانه در مقایسه با مدل استاندارد فائو-پنمن-مانتیش نشان داد که دقت مدل‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی هر منطقه قرار دارد. بر اساس معیارهای آماری $RMSE$ ، MAE ، R^2 و d که در جدول ۲ ارائه شده است، می‌توان به وضوح مشاهده کرد که هر یک از مدل‌ها در اقلیم‌های مختلف عملکرد متفاوتی دارند. نتایج ارائه شده در جدول ۳ نیز نشان می‌دهد که در بین مدل‌های مبتنی بر دما، مدل بلانی-کریدل در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی گرم (شیراز)، معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رامسر)، معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (قزوین) و برفی با تابستان‌های بسیار گرم (بیجار) بهترین عملکرد را داشته است. همچنین، این مدل در اقلیم معتدل با تابستان‌های بسیار گرم برای ایستگاه قزوین و در اقلیم بیابانی گرم برای ایستگاه اهواز بهینه بود. در اقلیم معتدل با تابستان‌های بسیار گرم برای ایستگاه کرمانشاه، مدل هارگریوز-سامانی بهترین نتایج را ارائه داد. در اقلیم نیمه‌بیابانی سرد برای هر دو ایستگاه تبریز و مشهد، و در اقلیم برفی با تابستان‌های گرم (آبعلی) مدل‌های دروگرز-آلن و آلن به‌عنوان مدل‌های بهینه با عملکرد یکسان شناسایی شدند. در اقلیم‌های بیابانی گرم برای ایستگاه زاهدان و در اقلیم بیابانی سرد (اصفهان) مدل آلن به‌عنوان مدل بهینه انتخاب شد. همچنین در اقلیم بیابانی سرد (اصفهان)، مدل هارگریوز-سامانی نیز در کنار مدل آلن از بهترین نتایج برخوردار بود. در اقلیم معتدل با تابستان‌های گرم (اردبیل) نیز مدل دروگرز-آلن بهینه بود. در مورد مدل‌های مبتنی بر تابش، مدل ایرماک در هفت منطقه اقلیمی نیمه‌بیابانی گرم، نیمه‌بیابانی سرد (برای هر دو ایستگاه تبریز و مشهد)، بیابانی گرم (برای هر دو ایستگاه زاهدان و اهواز)، بیابانی سرد، معتدل با تابستان‌های بسیار گرم

دمای بیشینه) تأثیر مستقیم‌تری بر پتانسیل تبخیر دارد و داده‌های آن نیز معمولاً با دقت بالاتری اندازه‌گیری می‌شوند. در مقابل، برآورد تابش خالص روزانه به پارامترهای متعدد و گاهی نادقیق‌تری مانند ساعات آفتابی، ابرناکی و آلوده وابسته است. اگرچه مدل ایرماک به‌عنوان بهترین مدل تابش-محور شناسایی شد، اما حتی این مدل نیز نتوانست از دقت مدل‌های بهینه‌دما-محور فراتر رود. این یافته، کارایی و اولویت استفاده از داده‌های دمایی ساده و در دسترس را برای برآورد قابل اعتماد تبخیر و تعرق

روزانه در گستره اقلیمی ایران تأیید می‌کند. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مدل مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق، گامی اساسی در مطالعات خشکسالی و مدیریت منابع آب است و بایستی با در نظر گرفتن دقیق شرایط اقلیمی و ریزاقلیمی هر منطقه صورت پذیرد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب مدل مناسب برای برآورد تبخیر و تعرق، گامی اساسی در مطالعات خشکسالی و مدیریت منابع آب است و بایستی با در نظر گرفتن دقیق شرایط اقلیمی و ریزاقلیمی هر منطقه صورت پذیرد.

جدول ۲- شاخص‌های کارایی مدل‌های برآورد PET روزانه نسبت به مدل فائو-پنمن-مانتیت

Table 2. Performance indicators of daily PET estimation models compared to the FAO-Penman-Monteith model

Staion	Evaluation indicators	Daily evapotranspiration estimation models							
		H-S	D-Al	Allen	Dorji	Irmak	B-C	P-T	Makkink
Shiraz	RMSE	1.29	1.51	1.39	1.26	1.89	0.83	2.09	2.70
	MAE	1.02	1.21	1.13	0.91	1.43	0.66	1.63	2.25
	R ²	0.76	0.76	0.77	0.78	0.77	0.91	0.78	0.80
	d	0.90	0.88	0.89	0.86	0.65	0.96	0.67	0.58
Tabriz	RMSE	1.23	0.12	0.12	2.02	2.41	1.15	2.61	3.19
	MAE	0.80	0.74	0.74	1.37	1.67	0.98	1.92	2.49
	R ²	0.84	0.85	0.85	0.83	0.76	0.96	0.80	0.82
	d	0.93	0.94	0.94	0.76	0.64	0.95	0.66	0.58
Mashhad	RMSE	1.04	1.03	1.03	1.77	2.30	1.10	2.51	3.07
	MAE	0.76	0.75	0.77	1.24	1.67	0.82	1.86	2.40
	R ²	0.96	0.96	0.96	0.95	0.18	0.95	0.94	0.82
	d	0.94	0.95	0.95	0.80	0.63	0.92	0.66	0.59
Zahedan	RMSE	1.74	1.64	1.61	2.75	3.41	1.81	3.72	4.32
	MAE	1.26	1.20	1.17	2.23	2.83	1.57	3.23	3.83
	R ²	0.61	0.61	0.63	0.64	0.65	0.88	0.66	0.68
	d	0.85	0.87	0.87	0.65	0.55	0.85	0.55	0.50
Ahvaz	RMSE	1.90	1.93	1.89	2.83	3.73	1.57	3.94	4.57
	MAE	1.41	1.48	1.44	1.92	2.65	1.08	2.93	3.58
	R ²	0.91	0.91	0.91	0.92	0.18	0.97	0.91	0.72
	d	0.89	0.90	0.89	0.70	0.56	0.93	0.58	0.53
Esfahan	RMSE	1.06	1.09	1.05	1.96	2.68	0.43	2.95	3.54
	MAE	0.77	0.80	0.77	1.51	2.08	1.26	2.42	3.00
	R ²	0.82	0.82	0.82	0.82	0.77	0.93	0.78	0.81
	d	0.94	0.93	0.95	0.77	0.62	0.91	2.62	0.56
Ramsar	RMSE	0.79	0.93	1.13	0.45	0.69	0.27	0.44	0.86
	MAE	0.63	0.75	0.95	0.36	0.61	0.22	0.31	0.69
	R ²	0.84	0.85	0.85	0.84	0.77	0.96	0.80	0.82
	d	0.88	0.85	0.81	0.93	0.85	0.98	0.94	0.75
Qazvin	RMSE	1.52	1.75	1.65	0.89	1.25	0.65	1.31	0.93
	MAE	1.17	1.34	1.31	0.61	0.87	0.52	0.94	1.49
	R ²	0.77	0.77	0.77	0.76	0.70	0.91	0.72	0.74
	d	0.86	0.84	0.84	0.92	0.76	0.97	0.77	0.63
Kermanshah	RMSE	1.14	1.25	1.15	1.75	2.50	1.22	2.74	3.29
	MAE	0.84	0.93	0.87	1.24	1.81	1.02	2.09	2.65
	R ²	0.95	0.95	0.95	0.95	0.18	0.98	0.93	0.79
	d	0.95	0.94	0.95	0.82	0.62	0.93	0.63	0.57
Ardebil	RMSE	7.67	7.51	8.34	9.18	9.54	7.88	1.34	1.74
	MAE	1.05	1.16	1.21	0.79	0.94	1.63	0.86	1.28
	R ²	0.66	0.67	0.46	0.21	0.05	0.65	0.99	0.99
	d	0.59	0.62	0.46	0.21	0.07	0.61	1.00	0.99
Bijar	RMSE	1.44	1.40	1.36	1.99	2.31	1.30	2.52	3.05
	MAE	1.00	0.98	0.95	1.38	1.65	1.08	1.48	2.37
	R ²	0.71	0.71	0.71	0.71	0.65	0.91	0.68	0.71
	d	0.90	0.90	0.91	0.75	0.62	0.92	0.64	0.58
Abali	RMSE	0.85	0.81	0.80	1.20	1.34	0.88	1.46	1.99
	MAE	0.57	0.56	0.57	0.82	1.00	0.87	1.01	1.51
	R ²	0.82	0.82	0.82	0.81	0.74	0.94	0.78	0.81
	d	0.94	0.95	0.95	0.84	0.75	0.95	0.76	0.64

H-S*: مدل هارگریوز سامانی؛ D-Al: مدل دروگرز-آلن؛ Allen: مدل آلن؛ Dorji: مدل دورجی؛ Irmak: مدل ایرماک؛ B-C: مدل بلانی- کریدل؛ P-T: مدل پرستلی-

تیلور و Makkink: مدل ماکینگ

جدول ۳- بهترین روش برآورد PET روزانه برای هر منطقه اقلیمی، بر اساس کم‌ترین مقدار RMSE و بیش‌ترین مقدار d

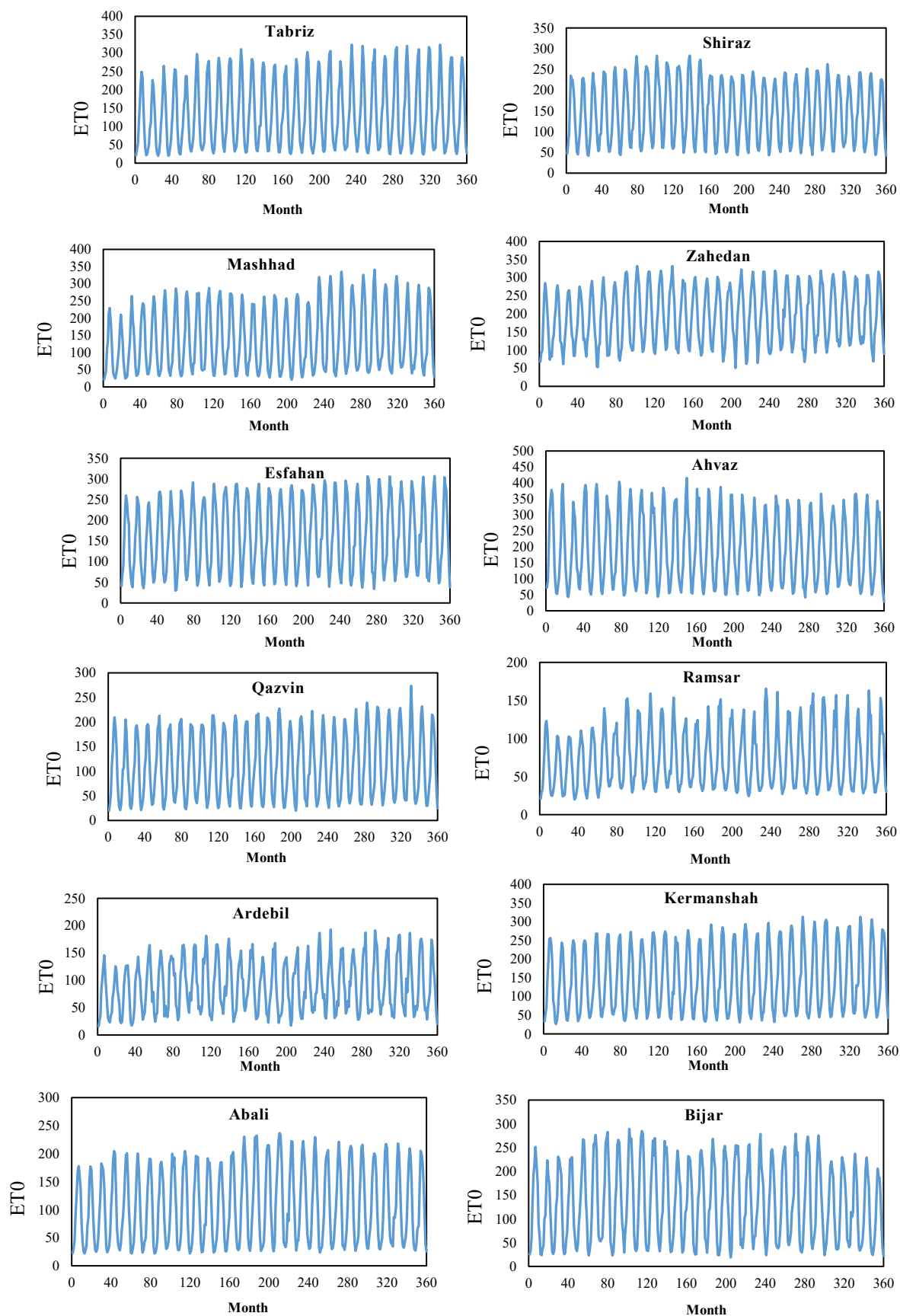
Table 3. The best method for estimating daily PET in each climatic region, based on the lowest RMSE and the highest d value

Climate	Stations	Temperature-based models	Radiation-based models	The best final model
BSh	Shiraz	Best : Blaney-Criddle Worst : Droogers – Allen	Best : Irmak Worst : Makkink	Blaney-Criddle
BSk	Tabriz	Best : Droogers – Allen , Allen Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Droogers – Allen Allen
	Mashhad	Best : Droogers – Allen , Allen Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Droogers – Allen Allen
BWh	Zahedan	Best : Allen Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Allen
	Ahvaz	Best : Blaney-Criddle Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Blaney-Criddle
BWk	Esfahan	Best : Allen , Hargreaves – Samani Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Allen Hargreaves – Samani
Cfa	Ramsar	Best : Blaney-Criddle Worst : Droogers – Allen	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Blaney-Criddle
Csa	Qazvin	Best : Blaney-Criddle Worst : Droogers – Allen	Best : Irmak Worst : Makkink	Blaney-Criddle
	Kermanshah	Best : Hargreaves – Samani Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Hargreaves – Samani
Csb	Ardebil	Best : Droogers – Allen Worst : Dorji	Best : Priestley-Taylor Worst : Irmak	Priestley-Taylor
Dsa	Bijar	Best : Blaney-Criddle Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Blaney-Criddle
Dsb	Abali	Best : Allen , Droogers – Allen Worst : Dorji	Best : Irmak Worst : Makkink	Allen Droogers – Allen

تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق مرجع

تغییرات ماهانه تبخیر و تعرق مرجع که با مدل استاندارد فائو-پنمن-مانیت محاسبه شد، در شکل ۳ برای کلیه ایستگاه‌های مطالعاتی ارائه شده است. از آنجایی که تبخیر و تعرق متغیری پیوسته و وابسته به موقعیت جغرافیایی بوده و در عین حال متأثر از فرایندهای مختلفی است که این فرایندها در زمان و مکان متغیر هستند (Yahyavi Dizaj et al., 2023)، در نتیجه در پژوهش حاضر نیز نتایج محاسبه تبخیر و تعرق در ایستگاه‌های نماینده مناطق مختلف اقلیمی دارای تفاوت‌هایی است. به‌طور کلی، مقادیر ET_0 از اقلیم‌های سرد و مرطوب به سمت اقلیم‌های گرم و خشک افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه کم‌ترین مقادیر تبخیر و تعرق در بین ایستگاه‌های منتخب در ایستگاه اردبیل (معتدل با تابستان‌های گرم) به میزان ۱۵/۵ میلی‌متر در ماه ژانویه سال ۱۹۹۱ ثبت شده است. در مقابل بیش‌ترین مقادیر تبخیر و تعرق را ایستگاه اهواز (بیابانی گرم) با ۴۱۵/۴ میلی‌متر در ماه ژوئن سال ۲۰۰۳ به خود اختصاص داده است. این اختلاف حدود ۴۰۰

میلی‌متری، گویای تأثیر شدید موقعیت جغرافیایی و پارامترهای اقلیمی بر مقادیر ET_0 است. از نظر تغییرات زمانی، اوج تبخیر و تعرق در تمامی ایستگاه‌ها در ماه‌های گرم سال (می تا اوت) رخ داده است. سال ۲۰۱۸ به‌عنوان یک سال با مقادیر بالای تبخیر و تعرق در چندین ایستگاه برجسته است؛ به‌طوری که بیش‌ترین مقادیر در تبریز (۳۲۲/۴ میلی‌متر)، قزوین (۲۷۳/۴۲ میلی‌متر) و کرمانشاه (۳۱۳/۱ میلی‌متر) در این سال ثبت شده‌اند. این هم‌زمانی می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر یک الگوی اقلیمی فرامنطقه‌ای (مانند نوسانات فشار یا فراگیرهای دمایی) در آن سال باشد. نتایج حاضر با یافته‌های پژوهش‌های مشابه هم‌خوانی دارد که تأکید می‌کنند سهم و تأثیر هر یک از متغیرهای اقلیمی (مانند دما، رطوبت، ساعت آفتابی و باد) بر تبخیر و تعرق در فصل‌های مختلف و در انواع اقلیم‌ها متفاوت است (Yahyavi Dizaj et al., 2023a). در مجموع، تنوع مشاهده‌شده در مقادیر تبخیر و تعرق بین ایستگاه‌ها، لزوم در نظر گرفتن تفاوت‌های اقلیمی در برآورد نیاز آبی و مدیریت منابع آب را پررنگ می‌کند.



شکل ۳- تغییرات ماهانه تبخیر-تعرق مرجع محاسبه شده با روش فائو-پنمن-مانتیش در دوره ۲۰۲۰-۱۹۹۱ برای ایستگاه‌های منتخب.

Figure 3. Monthly variations of ET_0 calculated using the FAO Penman-Monteith method for selected stations during the period 1991–2020.

ارزیابی مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق ماهانه

نتایج مربوط به ارزیابی مدل‌های ماهانه برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از معیارهای $RMSE$ ، MAE ، R^2 و ضریب توافق d در جدول ۴ ارائه شده است. این معیارها میزان سازگاری مدل‌های مختلف را در اقلیم‌ها و ایستگاه‌های نماینده آن‌ها نشان می‌دهند. خلاصه نتایج این معیارها برای تمامی اقلیم‌های مورد بررسی نیز در جدول ۵ آمده است. براساس نتایج این جدول، در اقلیم‌های نیمه‌بیابانی سرد (برای ایستگاه‌های تبریز و مشهد)، بیابانی گرم (برای ایستگاه‌های زاهدان و اهواز)، بیابانی سرد (اصفهان)، معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رامسر) و برفی با تابستان‌های بسیار گرم (بیجار)، مدل بلانی-کریدل بهترین و سازگارترین عملکرد را داشته و در میان مدل‌های مبتنی بر دما، به‌عنوان مدل برتر شناخته شده است. در مقابل، در اقلیم نیمه‌بیابانی گرم (شیراز) و برفی با تابستان‌های گرم (آبعلی)، مدل آلن بهترین عملکرد را ارائه کرده است. همچنین، در اقلیم‌های معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (برای ایستگاه‌های قزوین و کرمانشاه) و معتدل با تابستان‌های گرم (اردبیل)، مدل هارگریوز-سامانی عملکرد برتری نسبت به سایر مدل‌های دمایی داشته است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مانند مقیاس روزانه، در مقیاس ماهانه نیز مدل‌های مبتنی بر دما در اقلیم‌های مختلف رفتاری یکنواخت ندارند؛ به‌گونه‌ای که مدلی ممکن است در یک اقلیم بهترین سازگاری را داشته باشد، اما در اقلیم دیگر جزء ضعیف‌ترین مدل‌ها باشد. برخلاف مقیاس روزانه، در مقیاس ماهانه تمایل بیشتری به یکنواختی درون‌اقلیمی مشاهده می‌شود؛ به‌عنوان مثال، در اقلیم نیمه‌بیابانی سرد (BSk) در هر دو ایستگاه تبریز و مشهد و در اقلیم بیابانی گرم (BWh) در هر دو ایستگاه زاهدان و اهواز، مدل یکسانی (بلانی-کریدل) به‌عنوان بهینه انتخاب شد. این تفاوت‌ها ضرورت توجه به نوع اقلیم، شرایط جغرافیایی، دوره زمانی مورد بررسی و انتخاب دقیق مدل مناسب را در پژوهش‌های اقلیمی برجسته می‌کند (Latrech et al., 2024).

نتایج ارزیابی مدل‌های بر پایه تابش جدول‌های ۴ و ۵ نشان می‌دهد که در اغلب اقلیم‌ها از جمله نیمه‌بیابانی گرم (شیراز)، نیمه‌بیابانی سرد (تبریز و مشهد)، بیابانی سرد (اصفهان)، بیابانی گرم (برای ایستگاه اهواز)، معتدل پرباران با تابستان‌های گرم (رامسر)، معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (قزوین و کرمانشاه)، برفی با تابستان‌های بسیار گرم (بیجار) و برفی با تابستان‌های گرم (آبعلی)، مدل پرستلی-تیلور بهترین عملکرد را دارد. بنابراین، این مدل می‌تواند به‌عنوان مدل پیشنهادی مبتنی بر تابش برای

پژوهش‌های آینده معرفی شود. با این حال، در ایستگاه زاهدان (اقلیم بیابانی گرم)، مدل ماکینگ بهترین نتایج را در مقیاس ماهانه ارائه کرده است. همچنین، در ایستگاه اردبیل (معتدل با تابستان‌های گرم)، مدل ایرماک بالاترین کارایی را نسبت به سایر مدل‌های تابشی از خود نشان داده است.

با توجه به میزان انطباق مدل‌های ماهانه برآورد تبخیر و تعرق (هارگریوز-سامانی، دروگرز-آلن، آلن، دورجی، ایرماک، بلانی-کریدل، پرستلی-تیلور، ماکینگ و تورنت وایت) نسبت به مدل مرجع فائو-پنمن-مانتیش (جدول ۵)، می‌توان نتیجه گرفت که در ایستگاه‌های تبریز، مشهد، زاهدان، اهواز، اصفهان، رامسر و بیجار مدل بلانی-کریدل به‌عنوان مدل بهینه نهایی معرفی می‌شود، درحالی‌که در ایستگاه‌های قزوین، کرمانشاه و اردبیل مدل هارگریوز-سامانی و در ایستگاه شیراز مدل آلن بهترین عملکرد را دارد؛ در ایستگاه آبعلی نیز مدل پرستلی-تیلور از میان تمامی مدل‌های دمایی و تابشی مورد بررسی، مناسب‌ترین گزینه شناخته می‌شود. بنابراین نتایج این پژوهش بیان‌گر آن است که اگرچه در مقیاس ماهانه همگنی بیشتری در نتایج درون یک اقلیم مشاهده می‌شود، اما عملکرد مدل‌ها همچنان وابسته به شرایط اقلیمی بوده و نمی‌توان یک مدل واحد را برای تمامی شرایط پیشنهاد کرد. در مقیاس ماهانه، یک تغییر الگوی مهم نسبت به مقیاس روزانه آشکار می‌شود: برتری مدل‌های دمایی دیگر مطلق نیست و مدل‌های تابش‌محور، به‌ویژه مدل پرستلی-تیلور، عملکردی بسیار رقابتی و غالب در اکثر ایستگاه‌ها از خود نشان می‌دهند. این تغییر را می‌توان ناشی از هموار شدن نوسانات پارامترهای هواشناسی در مقیاس ماهانه دانست. در این مقیاس زمانی، اثرات پراکندگی روزانه باد و رطوبت کاهش یافته و نقش پارامترهای با ثبات‌تر و تعیین‌کننده‌تر انرژی مانند تابش خالص (که در مدل پرستلی-تیلور مستقیماً برآورد می‌شود) پررنگ‌تر می‌شود. موفقیت مدل پرستلی-تیلور نشان می‌دهد که در یک میانگین ماهانه، تابش به‌عنوان موتور محرک اصلی، رفتار یکنواخت‌تر و قابل پیش‌بینی‌تری در پهنه‌های مختلف اقلیمی ایران دارد. با این حال، استثنایی مانند عملکرد بهتر مدل ماکینگ در زاهدان (به‌دلیل سازگاری با شرایط خشکی مطلق) و مدل ایرماک در اردبیل (به‌دلیل تطابق با شرایط رطوبتی معتدل) نشان می‌دهند که حتی در این مقیاس نیز ویژگی‌های ریزاقلیمی خاص می‌توانند بر انتخاب مدل بهینه تأثیر بگذارند. این نتایج بر اهمیت در نظر گرفتن مقیاس زمانی تحلیل همراه با نوع اقلیم در انتخاب مدل برآورد تبخیر و تعرق تأکید می‌کند.

جدول ۴- شاخص های کارایی مدل های برآورد PET ماهانه نسبت به مدل فائو- پنمن- ماتیت

Table 4. Performance indicators of monthly PET estimation models compared to the FAO-Penman-Monteith model

Stations	Evaluation indicators	TW	H-S	D-Al	Allen	Dorji	Irmak	B-C	P-T	Makkink
Shiraz	RMSE	66.60	18.20	15.30	14.90	59.40	50.40	33.20	45.40	49.90
	MAE	61.60	12.90	11.70	11.10	48.90	38.40	24.90	37.20	40.20
	R2	0.88	0.95	0.95	0.96	0.96	0.92	0.98	0.96	0.97
	d	0.82	0.98	0.99	0.99	0.77	0.80	0.96	0.87	0.83
Tabriz	RMSE	74.70	51.20	43.50	43.30	81.10	64.30	18.40	60.60	70.00
	MAE	68.00	38.40	31.40	29.80	60.40	44.60	15.80	46.40	53.20
	R2	0.98	0.96	0.96	0.95	0.93	0.87	0.99	0.94	0.96
	d	0.81	0.89	0.93	0.92	0.71	0.80	0.99	0.85	0.79
Mashhad	RMSE	69.30	40.90	33.20	35.00	75.60	62.50	22.60	58.50	65.00
	MAE	62.10	28.40	22.60	24.20	55.20	44.20	17.70	44.10	49.30
	R2	1.00	0.99	0.99	0.98	0.98	0.96	1.00	0.98	0.99
	d	0.80	0.90	1.00	0.90	0.70	0.80	1.00	0.90	0.80
Zahedan	RMSE	93.60	55.90	44.80	47.80	61.30	63.70	19.90	63.80	62.80
	MAE	81.50	51.20	40.60	42.90	52.40	52.70	17.10	57.10	54.40
	R2	0.93	0.95	0.95	0.95	0.95	0.90	0.98	0.93	0.95
	d	0.57	0.86	0.91	0.89	0.64	0.65	0.99	0.68	0.67
Ahvaz	RMSE	111.00	67.10	60.50	61.50	70.10	107.50	31.80	97.00	106.00
	MAE	91.10	54.40	50.50	50.70	56.00	81.60	24.80	77.80	84.90
	R2	0.84	0.92	0.92	0.93	0.94	0.94	1.00	0.98	0.99
	d	0.72	0.87	0.90	0.89	0.67	0.66	0.98	0.73	0.69
Esfahan	RMSE	0.93	37.50	28.00	30.90	81.10	72.20	22.80	70.80	74.40
	MAE	78.80	31.30	22.20	24.70	68.30	56.90	18.70	61.30	63.20
	R2	0.91	0.96	0.96	0.96	0.96	0.91	0.99	0.95	0.97
	d	0.73	0.94	0.97	0.96	0.72	0.74	0.99	0.78	0.75
Ramsar	RMSE	18.90	8.90	11.20	17.60	16.10	21.90	8.20	11.50	15.40
	MAE	16.20	6.90	8.80	14.80	11.20	18.60	6.50	9.30	11.80
	R2	0.91	0.95	0.95	0.92	0.91	0.99	0.99	0.97	0.96
	d	0.96	0.99	0.98	0.95	0.94	0.92	0.99	0.98	0.95
Qazvin	RMSE	0.47	11.40	18.10	16.20	37.50	26.90	27.40	24.50	31.70
	MAE	44.20	8.50	13.60	12.80	28.30	20.80	21.80	18.20	24.50
	R2	0.95	0.98	0.98	0.98	0.96	0.92	0.99	0.89	0.98
	d	0.87	0.99	0.98	0.98	0.89	0.94	0.97	0.96	0.93
Kermanshah	RMSE	78.00	16.60	24.00	20.80	70.00	68.50	22.00	67.60	70.10
	MAE	73.10	12.40	18.00	15.10	54.80	49.10	17.70	53.80	56.70
	R2	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.96	1.00	0.98	0.99
	d	0.79	0.99	0.98	0.98	0.76	0.75	0.99	0.79	0.77
Ardebil	RMSE	38.23	12.50	15.30	16.30	9.24	16.40	17.00	16.60	22.40
	MAE	32.75	9.80	12.20	13.00	15.50	13.40	14.10	12.60	18.90
	R2	0.97	0.94	0.94	0.94	0.92	0.89	0.98	0.92	0.95
	d	0.82	0.98	0.98	0.97	0.91	0.97	0.98	0.97	0.93
Bijar	RMSE	0.82	45.70	38.60	37.80	73.10	55.30	23.40	53.60	59.20
	MAE	74.40	37.50	31.00	28.90	58.20	41.40	20.10	41.80	46.50
	R2	0.91	0.93	0.93	0.93	0.93	0.84	0.99	0.91	0.94
	d	0.74	0.91	0.93	0.93	0.73	0.82	0.98	0.86	0.82
Abali	RMSE	64.20	37.30	37.30	27.80	54.10	31.50	29.60	27.00	34.90
	MAE	56.50	30.40	30.40	20.70	41.10	25.00	27.10	19.30	25.50
	R2	0.95	0.97	0.97	0.96	0.95	0.88	0.99	0.95	0.96
	d	0.78	0.90	0.90	0.94	0.76	0.91	0.93	0.95	0.91

TW*: مدل تورنت وایت؛ H-S: مدل هارگریوز سامانی؛ D-Al: مدل دروگرز-آلن؛ Allen: مدل آلن؛ Dorji: مدل دورجی؛ Irmak: مدل ایرماک؛ B-C: مدل بلانی-کریدل؛ P-T: مدل پرستلی-تیلور و Makkink: مدل ماکینگ.

مناسبی برای پایش خشکسالی محسوب می شود (Thomas et al., 2016; Adnan et al., 2018).

نتایج حاصل از محاسبه شاخص های RDI ۶ و ۱۲ ماهه در شکل ۴ ارائه شده است. در ایستگاه شیراز (نماینده اقلیم نیمه بیابانی گرم)، شاخص RDI 6 ماهه نشان می دهد که در سال ۱۹۹۸ خشکسالی شدیدی رخ داده و پس از آن، سال ۲۰۰۸ شدیدترین خشکسالی دوره آماری را به خود اختصاص داده است. مقایسه با شاخص RDI 12 ماهه در همین ایستگاه نشان می دهد اگرچه وضعیت خشکسالی در دو مقیاس کاملاً یکسان نیست، اما در سال

نتایج بررسی خشکسالی با استفاده از شاخص RDI ۶ و ۱۲ ماهه مدل های بهینه ایستگاه های منتخب

با توجه به هدف اصلی این پژوهش که ارزیابی عملکرد مدل های مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل و تأثیر آن ها بر شاخص RDI در اقلیم های گوناگون ایران است، در یک بازه زمانی ۳۰ ساله از شاخص های RDI ۶ و ۱۲ ماهه استفاده شد. انتخاب این شاخص ها بر اساس مطالعات پیشین صورت گرفت که نشان می دهند شاخص RDI با در نظر گرفتن شرایط هر منطقه، ابزار

۲۰۰۸ خشکسالی شدیدی در هر دو مقیاس مشاهده می‌شود. علاوه بر این، در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۷ نیز خشکسالی شدید در منطقه رخ داده است. در ایستگاه تبریز (نماینده اقلیم نیمه‌بیابانی سرد)، هر دو شاخص RDI ۶ و ۱۲ ماهه خشکسالی شدید سال ۲۰۰۸ را نشان می‌دهند. با این حال، در شاخص RDI ۶ ماهه، سال ۲۰۱۱ با خشکسالی بسیار شدیدتری همراه بوده است. در سایر سال‌های مورد بررسی نیز خشکسالی با شدت‌های مختلف در نوسان بوده است.

جدول ۵- بهترین روش برآورد PET ماهانه برای هر منطقه اقلیمی، بر اساس کم‌ترین مقدار RMSE و بیش‌ترین مقدار d

Table 5. The best method for estimating monthly PET in each climatic region, based on the lowest RMSE and the highest d value				
Climate	Stations	Temperature-based models	Radiation-based models	The best final model
BSh	Shiraz	Best : Allen Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Irmak	Allen
BSk	Tabriz	Best : Blaney-Criddle Worst : Dorji	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Blaney-Criddle
	Mashhad	Best : Blaney-Criddle Worst : Dorji	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Blaney-Criddle
BWh	Zahedan	Best : Blaney-Criddle Worst : Droogers – Allen	Best : Makkink Worst : Priestley-Taylor	Blaney-Criddle
	Ahvaz	Best : Blaney-Criddle Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Irmak	Blaney-Criddle
BWk	Esfahan	Best : Blaney-Criddle Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Blaney-Criddle
Cfa	Ramsar	Best : Blaney-Criddle Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Irmak	Blaney-Criddle
Csa	Qazvin	Best : Hargreaves – Samani Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Hargreaves – Samani
	Kermanshah	Best : Hargreaves – Samani Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Hargreaves – Samani
Csb	Ardebil	Best : Hargreaves – Samani Worst : torenth	Best : Irmak Worst : Makkink	Hargreaves – Samani
Dsa	Bijar	Best : Blaney-Criddle Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Blaney-Criddle
Dsb	Abali	Best : Allen Worst : torenth	Best : Priestley-Taylor Worst : Makkink	Priestley-Taylor

RDI ۱۲ ماهه در این ایستگاه حاکی از خشکسالی شدید سال ۲۰۰۸ است، نیز شرایط خشکسالی در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰ نیز در منطقه حاکم بوده است. در ایستگاه اردبیل (نماینده اقلیم معتدل با تابستان‌های گرم)، شاخص RDI ۶ ماهه بالاترین مقادیر خشکسالی را در سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد. همچنین، توجه به شکل ۴ نشان می‌دهد که در سایر سال‌ها نیز کم و بیش خشکسالی‌هایی در سال‌های مختلف رخ داده است. در شاخص RDI ۱۲ ماهه نیز خشکسالی شدید سال ۲۰۱۷ مشاهده می‌شود. در ایستگاه بیجار (نماینده اقلیم برفی با تابستان‌های بسیار گرم)، شاخص RDI ۶ ماهه خشکسالی شدید سال ۱۹۹۹ و خشکسالی شدیدتر سال ۲۰۰۱ را ثبت کرده است. در حالی که شاخص RDI ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی را در سال ۲۰۰۸ نشان می‌دهد. در نهایت، در اقلیم برفی با تابستان‌های گرم (ایستگاه آبعلی)، هر دو شاخص RDI ۶ و ۱۲ ماهه شدیدترین خشکسالی‌ها را در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۰ ثبت کرده‌اند.

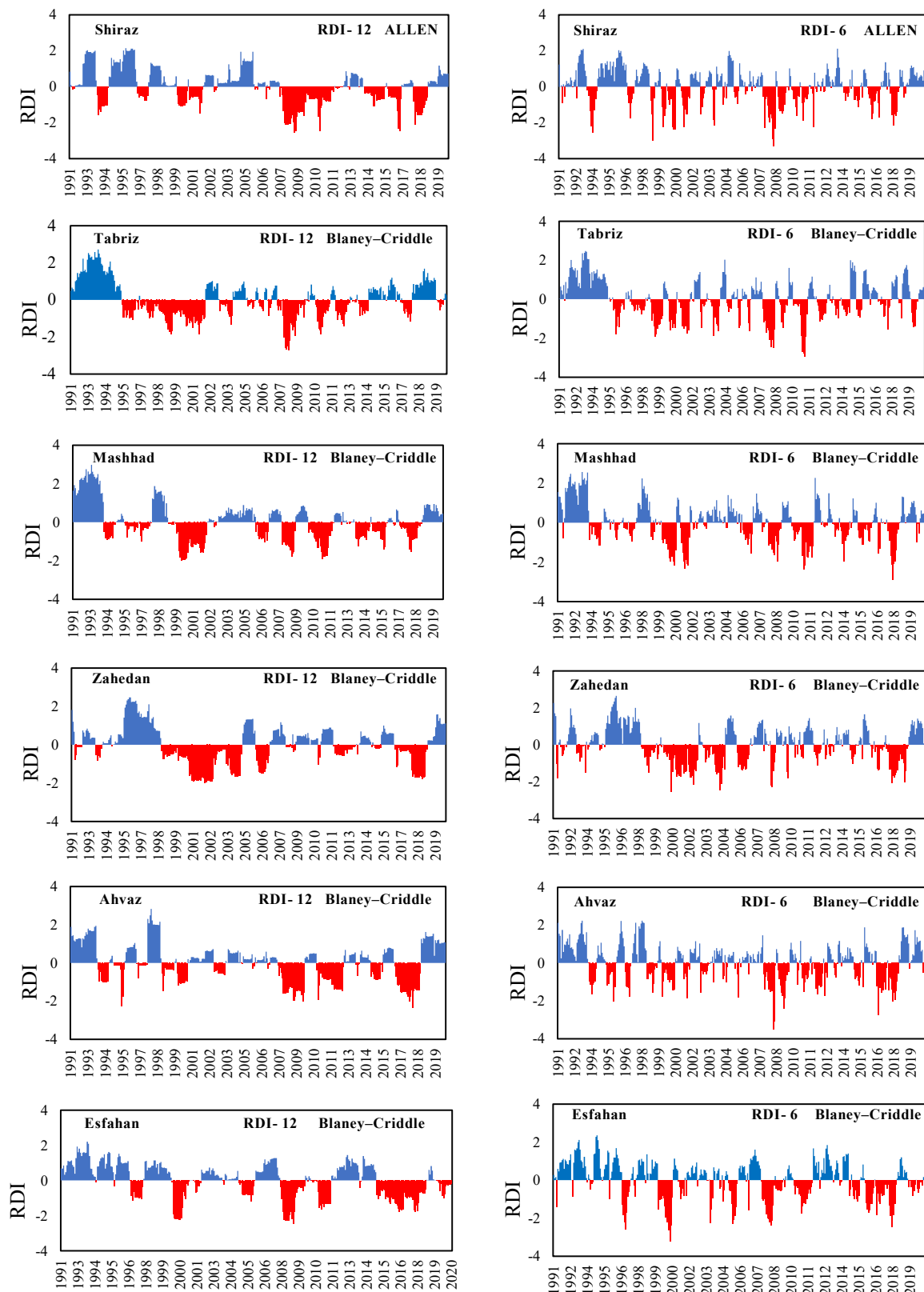
نتایج کلی این پژوهش نشان می‌دهد که در مقیاس زمانی شش ماهه، فراوانی دوره‌های خشکسالی و ترسالی بیش‌تر است، در حالی که با افزایش مقیاس زمانی به ۱۲ ماهه، فراوانی این دوره‌ها کاهش ولی تداوم آن‌ها افزایش می‌یابد. این یافته با نتایج پژوهش

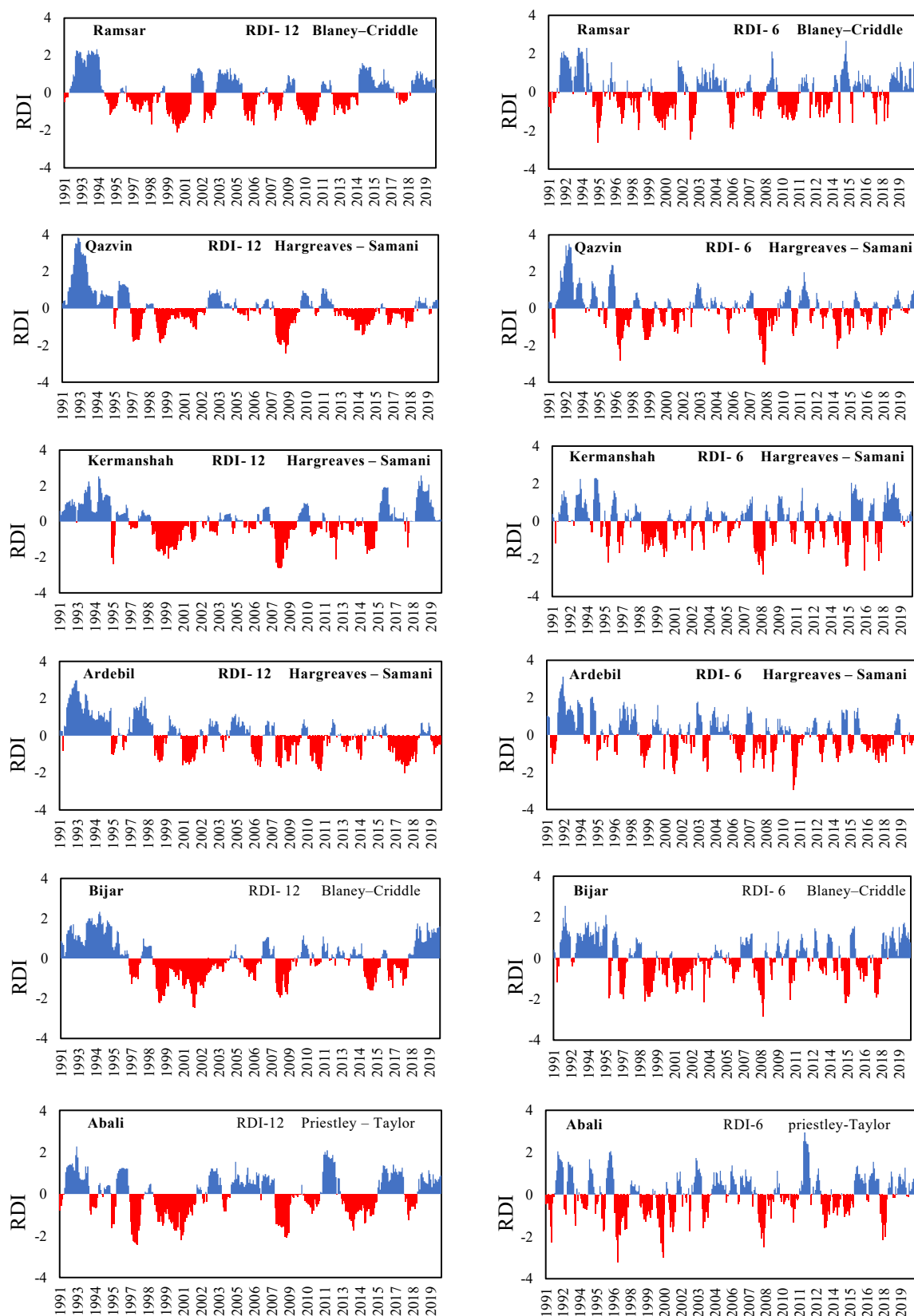
در اقلیم بیابانی گرم (ایستگاه زاهدان)، شاخص RDI ۶ ماهه خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۸ را ثبت کرده است. در حالی که شاخص RDI ۱۲ ماهه در همین اقلیم، خشکسالی‌های شدید را در بازه‌های زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ و ۲۰۱۷ تا ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. در اقلیم بیابانی سرد (ایستگاه اصفهان)، شدیدترین خشکسالی در شاخص RDI ۶ ماهه مربوط به سال ۲۰۰۰ است. اگرچه در سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۱۸ نیز خشکسالی مشاهده می‌شود، اما شدت آن به پای خشکسالی سال ۲۰۰۰ نمی‌رسد. در مقایسه با این شاخص، شاخص RDI ۱۲ ماهه در این ایستگاه، خشکسالی‌های شدید سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ را نشان می‌دهد.

در ایستگاه رامسر (نماینده اقلیم معتدل پرباران با تابستان‌های گرم)، شاخص RDI ۶ ماهه شدیدترین خشکسالی را در سال ۲۰۰۰ ثبت کرده است. همچنین، خشکسالی‌های نسبتاً شدید در سال‌های ۱۹۹۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ مشاهده می‌شود. شاخص RDI ۱۲ ماهه در این ایستگاه نیز خشکسالی‌های شدید سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ را تأیید می‌کند. در اقلیم معتدل با تابستان‌های بسیار گرم (ایستگاه قزوین)، سال‌های ۱۹۹۷ و ۲۰۰۸ بیش‌ترین مقادیر خشکسالی را در شاخص RDI ۶ ماهه نشان می‌دهند. شاخص

دوره‌های خشکسالی و ترسالی شناسایی شد که با نتایج مطالعات (Nouri and Homaei., 2020; Torabinezhad et al., 2024; Rezaei et al., 2024) همخوانی دارد.

(Ahrari and Raja., 2025). که به بررسی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دشت مهاباد پرداختند، همسو است. همچنین، براساس یافته‌های این پژوهش، شاخص RDI ۱۲ ماهه به عنوان مقیاس مناسب‌تری برای پایش





شکل ۴- بررسی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف

Figure 4. Drought assessment using different indicators

۴- نتیجه گیری

رخدادهای مکرر خشکسالی و خسارت های چشم گیر ناشی از آن در بخش های مختلف از جمله کشاورزی، محیط زیست، اقتصادی- اجتماعی و سایر حوزه ها، این پدیده را به یکی از چالش های اساسی در مناطق مختلف جهان تبدیل کرده است. با وجود آسیب پذیری قابل توجه کشور ایران در برابر پدیده خشکسالی، مطالعات جامع در این زمینه همچنان محدود است. بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی عملکرد مدل های مختلف تبخیر و تعرق پتانسیل و تأثیر آن ها بر شاخص خشکسالی RDI در اقلیم های گوناگون با استفاده از داده های ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) ۱۲ ایستگاه همدید به عنوان نماینده ای از ۹ اقلیم مختلف (Dsa, Csb, Csa, Cfa, BWk, BWh, BSk, BSh, Dsb) در ایران انجام شد. در این راستا، ابتدا ۹ مدل مختلف تورنت وایت، هارگریوز سامانی، دروگرز-آلن؛ آلن، دورجی، ایرماک، بالانی- کربدل، پریستلی- تیلور و ماکینگ با استفاده از معیارهای آماری MAE, RMSE, R^2 و d مورد ارزیابی قرار گرفتند. سپس شاخص خشکسالی RDI در مقیاس های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با استفاده از مدل های بهینه انتخاب شده از بین این ۹ مدل محاسبه شد. نتایج ارزیابی ۹ مدل مختلف تبخیر و تعرق نشان داد که عملکرد مدل ها به شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی هر منطقه قرار دارد. به عنوان مثال، مدل دروگرز-آلن در اقلیم های نیمه بیابانی سرد (BSk)، معتدل مدیترانه ای با تابستان های گرم (Csb) و سرد با تابستان های خشک و گرم (Dsb) بهترین عملکرد را داشت، در حالی که همین مدل در اقلیم های نیمه بیابانی گرم (BSh) و دیگر مناطق عملکرد مطلوبی نشان نداد. این الگوی مشابه در مدل های مبتنی بر تابش نیز مشاهده شد، به طوری که مدل ایرماک در هفت اقلیم از نه اقلیم مورد مطالعه بهترین نتایج را ارائه داد، اما در اقلیم معتدل مدیترانه ای با تابستان های گرم (Csb) عملکرد ضعیفی داشت. در بخش تحلیل خشکسالی، مقایسه شاخص RDI در مقیاس های ۶ و ۱۲ ماهه نشان داد که اگرچه هر دو مقیاس وقوع خشکسالی های مکرر را در بیش تر سال های مورد مطالعه تأیید می کنند، اما شاخص RDI ۱۲ ماهه به دلیل حذف نوسانات کوتاه مدت و نمایش بهتر تداوم دوره های خشکسالی، مقیاس مناسب تری برای پایش و تحلیل خشکسالی در ایران شناخته شد. بر اساس یافته های این پژوهش، با توجه به محدودیت های داده ای در ایستگاه های هواشناسی و نیاز به داده های گسترده در روش استاندارد فانو-پنمن-مانیت، پیشنهاد می شود پیش از به کارگیری هر مدل تخمین تبخیر و تعرق، ارزیابی جامعی از عملکرد آن مدل در شرایط اقلیمی خاص هر منطقه با استفاده از معیارهای آماری دقیق صورت پذیرد. این رویکرد می تواند سهم مهمی در بهبود دقت برآوردهای تبخیر و تعرق و در نتیجه مدیریت بهینه منابع آب در مواجهه با چالش خشکسالی داشته باشد. همچنین، انجام مطالعات بیش تر برای بررسی

ارتباط بین تغییرات اقلیمی و عملکرد مدل های مختلف تبخیر و تعرق در اقلیم های گوناگون ایران پیشنهاد می شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

خدیجه جوان: مفهوم سازی، تحلیل های آماری، راهنمایی، ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج؛ **آمنه یحوی دیزج:** منابع، نگارش نسخه اولیه مقاله؛ **بهناز شاهانی:** آماده سازی داده ها، تحلیل های آماری.

منابع:

- احراری، سعیده و رجا، امید (۱۴۰۴). بررسی شاخص های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دشت مهاباد. مدیریت آب در کشاورزی، ۱۲(۱)، ۲۹-۴۸.
- اقتدار نژاد، مینا، بذرافشان، ام البنین و صادقی لاری، عدنان (۱۳۹۵). ارزیابی تطبیقی شاخص های SPI، RDI و SDI در تحلیل مشخصه های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: دشت بم). دانش آب و خاک، ۲۶(۴)، ۶۹-۸۱.
- امیرزاده، آرش، رئوف، مجید و مصطفی زاده، رئوف (۱۴۰۴). ارزیابی الگوی مکانی تغییرات هیدرومدول آبیاری تحت الگوهای کشت متفاوت در شمال غرب ایران. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۱۵(۱)، ۱۹۵-۲۱۲. doi: 10.22098/mmws.2024.15135.1463
- بالوبی، فاطمه، کابلی زاده، مصطفی و محمدی، شاهین (۱۴۰۳). پایش تغییرات زمانی- مکانی خشکسالی هواشناسی و تحلیل روند متغیرهای اقلیمی در استان خوزستان بین سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۳(۴۰)، ۷۳-۹۴. doi: 10.22111/jneh.2024.46574.1987
- ترابی نژاد، نسترن، زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۲). بررسی انواع خشکسالی و مشخصه های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI). آب و خاک، ۳۷(۳)، ۴۷۳-۴۸۶. doi: 10.22067/jsw.2023.81322.1257.۴۸۶-۴۷۳
- جوان، خدیجه و یحوی دیزج، آمنه (۱۴۰۳). تحلیل زمانی و مکانی شاخص های خشکی UNEP و دومارتن در ایران طی دوره ۱۹۷۶-۲۰۲۰. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۲(۳۹)، ۸۹-۱۰۲. doi: 10.22052/deej.2024.253864.1032

خشکسالی بر مبنای شاخص‌های مختلف خشکسالی و کاربرد آن در دشت نیشابور. *فیزیک زمین و فضا*، ۱۵۰(۱)، ۱۲۵-۱۴۷. doi: 10.22059/jesphys.2023.351663.1007475

فتوت، جلال و اسدی زارچ، محمد امین (۱۴۰۴). مقایسه کارایی شاخص‌های خشکسالی اقلیمی (SPI، RDI، SPEI) در مناطق خشک و نیمه‌خشک با شاخص سنجش از دوری TVDI. *مدیریت بیابان*، ۱۳(۱)، ۲۳-۴۲. doi: 10.22034/jdmal.2025.2041089.1481

قبائی سوق، محمد، زارع ایبانه، حمید، مساعدی، ابوالفضل، و صمدی، سیده زهرا (۱۳۹۴). پایش وضعیت‌های رطوبتی و روند آن‌ها بر مبنای شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در نواحی مختلف آب و هوایی ایران. *آب و خاک*، ۳۰(۵)، ۱۷۰۰-۱۷۱۷. doi: 10.22067/jsw.v0i0.47565

یحییوی دیزج، آمنه، اکبری ازیرانی، طیبیه، خالدی، شهریار و جوان، خدیجه (۱۴۰۲الف). بررسی فصلی تبخیر تعرق مرجع و تحلیل حساسیت آن به عناصر هواشناسی در ایران. *آب و خاک*، ۳۷(۴)، ۶۴۳-۶۵۷. doi: 10.22067/jsw.2023.83328.1307

یحییوی دیزج، آمنه، جوان، خدیجه، خالدی، شهریار و اکبری ازیرانی، طیبیه (۱۴۰۲ب). ارزیابی تغییر مقدار تبخیر و تعرق مرجع در ایران طی دهه‌های اخیر. *مدیریت بیابان*، ۱۱(۱)، ۳۹-۵۸. doi: 10.22034/jdmal.2023.2000984.1413

References

- Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, L., Gao, S., Khan, A. H., & Mahmood, R. (2018). Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Climate Dynamics*, (51), 1885-1899. doi:10.1007/s00382-017-3987-0
- Ahrari, S., & Raja, O. (2025). Investigation of meteorological, agricultural, and hydrological drought indicators in Mahabad plain. *Water Management in Agriculture*, 12(1), 29-48. [In Persian]
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. (1998) Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy
- Allen RG. (1993) Evaluation of a temperature difference method for computing grass reference evapotranspiration. Report to Water Resources Development and Management Service Land and Water Development Division. FAO. Rome, Italy
- Amirzadeh, A., Raoof, M., & Mostafazadeh, R. (2025). Assessing spatial pattern of irrigation hydromodule under different crop patterns in northwestern Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(1), 195-212. doi: 10.22098/mmws.2024.15135.1463 [In Persian]
- Ansarifard, S., & Shamsnia, S. A. (2018). Monitoring drought by reconnaissance drought index (RDI) and standardized precipitation index (SPI) using DrinC software. *Water Utility J*, 20, 29-35.
- رضایی، سارا، معصوم‌پور سماکوش، جعفر و میری، مرتضی (۱۴۰۳). تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشکسالی چند متغیره. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴(۱)، ۸۲-۹۸. doi: 10.22126/atwe.2024.10319.1114
- رضیئی، طیب (۱۳۹۶). منطقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن-گایگر و بررسی جابه‌جایی مناطق اقلیمی کشور در سده بیستم. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۳(۲)، ۴۱۹-۴۳۹. doi: 10.22059/jesphys.2017.58916
- رضیئی، طیب و میری، مرتضی (۱۴۰۱). طبقه‌بندی اقلیمی ایران به روش کوپن - گایگر، انتشارات پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران.
- رئوف، مجید، امیرزاده، آرش و مصطفی زاده، رئوف (۱۴۰۲). اثر پارامترهای اقلیمی و الگوی کشت روی تبخیر-تعرق و هیدرومادل آبیاری در برخی مناطق شمال غرب ایران. *آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۷(۵)، ۸۵۷-۸۶۸.
- صادقیان آق کندی، مرضیه، رضایی، حسین، خلیلی، کیوان و احمدی، فرشاد. (۱۴۰۳). بررسی عملکرد الگوریتم‌های Kstar و GPR در مدل‌سازی شاخص خشکسالی هواشناسی RDI (مطالعه موردی: شرق حوضه دریاچه ارومیه). *مهندسی عمران و محیط‌زیست*، ۵۴(۱۱۴)، ۱۴۲-۱۵۱. doi: 10.22034/ceej.2023.55292.2225
- صداقت نژاد، مه سیماء، مساعدی، ابوالفضل، قهرمان، بیژن و سعادت پور، عالیه (۱۴۰۳). تعیین مناسب‌ترین روش زمین آماری به‌منظور پایش
- Baloei, F., Kabolizadeh, M., & Mohammadi, S. (2024). Monitoring temporal-spatial changes of meteorological drought and trend analysis of climatic variables in Khuzestan province from 2000 to 2020. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(40), 73-94. doi: 10.22111/jneh.2024.46574.1987 [In Persian]
- Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water Resources Management*, 31(14), 4683-4698. doi:10.1007/s11269-017-1773-8
- Beobide-Arsuaga, G., Bayr, T., Reintges, A., & Latif, M. (2021). Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models. *Climate Dynamics*, 56(11), 3875-3888. doi:10.1007/s00382-021-05673-4
- Blaney, H.F., & Criddle, W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatologically and irrigation data. Washington Soil Conservation Service (SCS). (Vol. 96).
- Droogers P, Allen RG (2002) Estimating reference evapotranspiration under inaccurate data conditions. *Irrigation and drainage systems*. 16:33-45. doi: 10.1023/A:1015508322413
- Eghtedar Nezhad, M., Bazrafshan, O., & Sadeghi Lari, A. (2017). Adaptive Evaluation of SPI, RDI and SDI Indices in Analyzing the Meteorological and Hydrological Drought Characteristics (Case Study: Bam Plain). *Water and Soil Science*, 26(4.2), 69-81. [In Persian]

- Fotovat, J. & Asadi Zarch, M. A. (2025). Comparison of the efficiency of climatic drought indices (SPI, RDI, and SPEI) in arid and semi-arid regions using the remote sensing-based TVDI Index. *Desert Management*, 13(1), 23-42. doi: 10.22034/jdmal.2025.2041089.1481 [In Persian]
- Ghabaei S, M., Zare Abyaneh, H., Mosaedi, A., & Samadi, S. Z. (2016). Assessment of humidity conditions and trends based on standardized precipitation evapotranspiration index (SEPI) over different climatic regions of Iran. *Water and Soil*, 30(5), 1700-1717. [In Persian]
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*. 1:96-99.
- Irmak S, Irmak A, Allen RG, Jones JW (2003) Solar and net radiation-based equations to estimate reference evapotranspiration in humid climates. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 129(5):336-347. doi:10.1061/(ASCE)07339437(2003)129:5(33)
- Javan. Kh., & Yahyavi Dizaj, A. (2024). Investigating Temporal and Spatial Variations of UNEP and De Martonne Aridity Indices in Iran from 1976 to 2020. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(39), 89-102. doi: 10.22052/deej.2024.253864.1032 [In Persian]
- Kartal, V. (2024). Drought Assessment of Yeşilirmak Basin Using Long-term Data. *Turkish Journal of Science and Technology*, 19(1), 179-192. doi:10.55525/tjst.1392199
- Latrech, B., Hermassi, T., Yacoubi, S., Slatni, A., Jarray, F., Pouget, L., & Ben Abdallah, M. A. (2024). Comparative analysis of climate change impacts on climatic variables and reference evapotranspiration in Tunisian Semi-Arid Region. *Agriculture*, 14(1), 160.10.3390/agriculture14010160
- Lehner, F., Deser, C., Maher, N., Marotzke, J., Fischer, E. M., Brunner, L., ... & Hawkins, E. (2020). Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6. *Earth System Dynamics*, 11(2), 491-508. doi: 10.5194/esd-11-491-2020
- Makkink GF (1957) Testing the Penman formula by means of lysimeters. *J Inst Water Eng* 11:277-288
- McEvoy DJ, Huntington JL, Abatzoglou JT, Edwards LM (2012) An evaluation of multiscalar drought indices in Nevada and eastern California. *Earth Interact*. 16:1-18.
- Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). *Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran*, *Appl Water Sci*, 12, 183. doi:10.1007/s13201-022-01705-4
- Nouri, M., & Homaei, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, 27(2), e1899. doi:10.1002/met.1899
- Omar, L. C., Mariano, N. C., Alberto, G., Ernestina, P. G., Jorge, M. M., & Enrique, T. D. (2022). Sensitivity of four indices of meteorological drought for rainfed maize yield prediction in the state of Sinaloa, Mexico. *Agriculture*, 12(4), 525. 10.3390/agriculture12040525
- Ortiz-Gómez, R., Flowers-Cano, R. S., & Medina-García, G. (2022). Sensitivity of the RDI and SPEI drought indices to different models for estimating evapotranspiration potential in semiarid regions. *Water Resources Management*, 36(7), 2471-2492.
- Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V. and Okem, A. (2022). Summary for policymakers.
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon Weather Rev* 100:81-92.
- Rahimi, J., Laux, P., & Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen-Geiger climate zones. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 183-199.
- Raoof, M., Amirzadeh, A. & Mostafazadeh, R. (2024). Effect of climatic parameters and cultivation pattern on Evapotranspiration and Irrigation Hydromodul in some areas of northwest Iran. *Journal of Irrigation and Drainage*, 17(5), 857-868 [In Persian]
- Raziei, T. (2017). Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(2), 419-439. doi: 10.22059/jesphys.2017.58916 [In Persian]
- Raziei, T. and Miri, M. (2022). Köppen-Geiger climate classification of Iran. *Soil Conservation and Watershed Management Research Institute*, Tehran [In Persian].
- Rezaei, S., Masoompour Samakosh, J., & Miri, M. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 82-98. doi: 10.22126/atwe.2024.10319.1114 [In Persian]
- Sadeghian Agkandy, M. , Rezaie, H., Khalili, K. & Ahmadi, F. (2024). Investigating the Performance of Kstar and GPR Algorithms in Modeling RDI Meteorological Drought Index (Case Study: East of Urmia Lake Basin). *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 54(114), 142-151. doi: 10.22034/ceej.2023.55292.2225 [In Persian]
- Sedaghat Nejad, M., Mosaedi, A. , Ghahraman, B. & Saadatpour, A. (2024). Determining the optimal geostatistical method for drought monitoring based on different drought indices and its application in Neishabour Plain. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 125-147. doi: 10.22059/jesphys.2023.351663.1007475 [In Persian]
- Simsek, O., Yildiz-Bozkurt, S., & Gumus, V. (2024). Analysis of meteorological drought with different methods in the Black Sea region, Turkey. *Acta Geophysica*, 72(3), 1927-1943.

- Sobhani, B., Safarianzengir, V., & Kianian, M. K. (2019). *Drought monitoring in the Lake Urmia basin in Iran. Arab J Geosci* 12: 448.
- Surendran, U., Anagha, B., Raja, P., Kumar, V., Rajan, K., & Jayakumar, M. (2019). Analysis of drought from humid, semi-arid and arid regions of India using DrinC model with different drought indices. *Water Resources Management*, 33(4), 1521-1540.
- Tareke, K. A. (2025). Long-term hydrological drought monitoring and trend analysis in Blue Nile River basin. *Heliyon*, 11(1). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e41161
- Thomas, T., Jaiswal, R. K., Galkate, R. V., & Nayak, T. R. (2016). Reconnaissance drought index-based evaluation of meteorological drought characteristics in Bundelkhand. *Procedia Technology*, (24), 23-30.
- Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94.
- Torabi Haghighi, A., Abou Zaki, N., Rossi, P. M., Noori, R., Hekmatzadeh, A. A., Saremi, H., & Kløve, B. (2020). Unsustainability syndrome—from meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. *Water*, 12(3), 838. doi:10.3390/w12030838
- Torabinezhad, N., Zarrin, A. & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Analysis of Different Types of Droughts and Their Characteristics in Iran Using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Water and Soil*, 37(3), 473-486. doi: 10.22067/jsw.2023.81322.1257 [In Persian]
- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21, 821-833. doi:10.1007/s11269-006-9105-4
- Vaghefi, S. A., Keykhai, M., Jahanbakhshi, F., Sheikholeslami, J., Ahmadi, A., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2019). The future of extreme climate in Iran. *Scientific Reports*, 9(1), 1464. doi:10.1038/s41598-018-38071-8 [In Persian]
- Wang, M., Jiang, S., Ren, L., Xu, C. Y., Menzel, L., Yuan, F., ... & Yang, X. (2021). Separating the effects of climate change and human activities on drought propagation via a natural and human-impacted catchment comparison method. *Journal of Hydrology*, 603, 126913.
- Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, S. & Javan, K. (2023a). Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN. *Water and Soil*, 37(4), 643-657. doi: 10.22067/jsw.2023.83328.1307 [In Persian]
- Yahyavi Dizaj, A., Javan, K., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. (2023b). Evaluation of Changes in Reference Evapotranspiration in Iran Over the Last Decades. *Desert Management*, 11(1), 39-58. doi:10.22034/jdmal.2023.2000984.1413 [In Persian]
- Yuce, M. I., & Esit, M. (2021). Drought monitoring in Ceyhan basin, Turkey. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 9(4), 293-314. doi:10.1080/23249676.2021.1932616
- Zarei, A. R. (2019). Analysis of changes trend in spatial and temporal pattern of drought over south of Iran using standardized precipitation index (SPI). *SN Applied Sciences*, 1(5), 465. doi:10.1007/s42452-019-0498-0
- Zarei, A. R., & Moghimi, M. M. (2019). Environmental assessment of semi-humid and humid regions based on modeling and forecasting of changes in monthly temperature *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16, 1457-1470.
- Zhang, R., Bento, V. A., Qi, J., Xu, F., Wu, J., Qiu, J., ... & Wang, Q. (2023). The first high spatial resolution multi-scale daily SPI and SPEI raster dataset for drought monitoring and evaluating over China from 1979 to 2018. *Big Earth Data*, 7(3), 860-8