

Regional Calibration of the Hargreaves-Samani Method and Projection of Potential Evapotranspiration in Iran under Climate Change Scenarios

Mohammad Mohammadlou^{*1}, Abdolreza Bahremand¹, Shervan Gharari², Amir Sadoddin¹, Iman Babaian³

1- Department of Watershed and Desert Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, <https://orcid.org/0000-0001-5146-5391>

1- Department of Watershed and Desert Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, <https://orcid.org/0000-0001-5012-2653>

2- Department of Civil Engineering, Schulich School of Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, <https://orcid.org/0000-0002-5358-5714>

1- Department of Watershed and Desert Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran, <https://orcid.org/0000-0002-4192-4010>

3- Climate Research Center, Research Institute for Meteorology and Atmospheric Sciences, Mashhad, Iran.

***Corresponding author:** Mohamadlou@gau.ac.ir

Introduction

Climate change is fundamentally altering the Earth's hydrological cycle, with particularly severe impacts in arid and semi-arid regions such as Iran, including rising temperatures, shifting precipitation patterns, and intensifying water stress (IPCC, 2021; Gohari et al., 2013). Potential evapotranspiration (ET_0), a key indicator of atmospheric evaporative demand, plays a central role in water balance assessment and irrigation planning (Allen et al., 1998). While the FAO-56 Penman-Monteith (PM) method is the global reference standard, its application is constrained by extensive data requirements that are often unavailable in many regions and by climate model outputs (Tabari et al., 2012). The Hargreaves-Samani (HS) method offers a simpler alternative relying solely on temperature data, but its fixed empirical coefficient (0.0023) requires regional calibration to avoid systematic errors across different climates (Almorox and Grieser, 2015; Ferreira et al., 2024; Musa et al., 2025). In Iran, despite extreme climatic and topographical diversity, a coherent national framework for regional calibration of this method remains a critical gap. Furthermore, quantitative assessment of ET_0 sensitivity to climate change using the Climate Sensitivity Index (CSI) at the national scale has been limited. This study aims to (1) regionally calibrate the HS method across six climatic-altitudinal zones of Iran using the PM method as reference, and (2) assess ET_0 sensitivity to future climate change using the CSI index.

Materials and Methods

Study Area and Zonation: Iran was divided into six climatic-altitudinal zones based on latitude (32°N as the transition boundary) and elevation (<600 m, 600-1400 m, > 1400 m) (Domröes and Kaviani, 1993; Raziei et al., 2013). Daily data from 152 synoptic stations (1995-2014) were obtained from the Iran Meteorological Organization.

Climate Models and Bias Correction: Three CMIP6 models, ACCESS-CM2, IPSL-CM6A-LR, and CNRM-CM6-1, were selected based on KGE and mean absolute percentage error metrics. Bias correction was performed using Empirical Quantile Mapping (EQM). A weighted multi-model ensemble was constructed with coefficients of 0.34, 0.33, and 0.33 for ACCESS-CM2, CNRM-CM6-1, and IPSL-CM6A-LR, respectively. Future projections were analyzed under SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for near (2031-2050), middle (2051-2070), and far (2071-2090) future periods.

ET_0 Estimation and Calibration: Reference ET_0 was calculated using the PM method, while the HS method was calibrated through four approaches (linear and second-degree polynomial at daily and monthly scales). The best-performing approach was selected, and correction coefficients were derived. k_{rs}^{new} were derived for each zone. The Climate Sensitivity Index (CSI) was calculated as the percentage change in ET_0 relative to the baseline. Statistical significance was assessed using one-way ANOVA followed by Tukey's HSD post-hoc test at $\alpha = 0.05$.

Results and Discussion

Calibration Performance: The monthly linear approach demonstrated the highest performance (mean $R^2 = 0.89$, RMSE = 0.77 mm day⁻¹). Correction coefficients ranged from 0.0014 to 0.0019 across the six zones, all lower than the default 0.0023, confirming that the global coefficient systematically overestimates ET_0 in Iran. The closest alignment with the correction coefficient (0.0019) was observed in the low-latitude low-elevation zone, while the lowest coefficient (0.0014) was found in the high-latitude high-elevation zone.

Future ETo Projections: ETo is projected to increase across all regions, with mean increases during the far future period (2071-2090) ranging from 58% to 129% relative to the baseline. The highest increases were observed under SSP5-8.5 in the high-latitude low-elevation zone (up to 128%), while the smallest increases were recorded in the high-latitude high-elevation zone (58-85%). The CSI maps revealed a distinct gradient from northern and elevated regions toward southern and low-lying areas, with high-latitude low-elevation and low-latitude low-elevation zones identified as the most sensitive regions. Monthly analysis showed that the greatest absolute increases occurred in summer (up to 15.5 mm month⁻¹ in July under SSP5-8.5), while the highest relative increases occurred in winter (up to 182% in December).

Statistical Analysis: Tukey's HSD test revealed that only one pairwise comparison was statistically significant ($p < 0.05$): SSP5-8.5_Far vs. SSP5-8.5_Near (mean difference = -30.0%, $p = 0.0479$). All other 35 pairwise comparisons were not significant ($p > 0.05$). This indicates that despite substantial numerical differences between scenarios and periods, most variations are not statistically distinguishable—except for the significant increase under SSP5-8.5 from the Near to Far period. The ANOVA test confirmed significant differences in mean CSI values across the six zones ($P < 0.05$), validating the effectiveness of the proposed zonation.

These findings align with previous studies in Iran and globally (Tabari et al., 2012; Goudarzi et al., 2018; Soltani et al., 2024; IPCC, 2021). The pattern of decreasing sensitivity with increasing elevation corroborates findings from the Lake Urmia basin and Zagros highlands (Goudarzi et al., 2018; Soltani et al., 2024). The seasonal pattern—greater absolute increases in summer and greater relative increases in winter—is consistent with projections by Nouri and Veysi (2024). The substantial difference between SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios (exceeding 35% in some zones) highlights that climate policy decisions can directly affect the severity of future water crises.

Conclusion

This study presents the first national-scale regional calibration of the Hargreaves-Samani method for Iran. The monthly linear calibration approach (mean $R^2 = 0.89$, $RMSE = 0.77$ mm day⁻¹) outperformed other approaches, with calibrated coefficients ranging from 0.0014 to 0.0019, all lower than the default 0.0023. Future projections reveal a consistent increasing trend in ETo across all regions, with mean increases during the far future period ranging from 58% to 129%. The high-latitude low-elevation zone (central arid regions) exhibits the highest sensitivity (up to 128%), while the high-latitude high-elevation zone (mountainous regions) shows the lowest sensitivity (58-85%). The greatest absolute increases occur in summer (up to 15.5 mm month⁻¹), while the highest relative increases occur in winter (up to 182%). Tukey's HSD test confirmed that only the increase under SSP5-8.5 from the Near to Far period is statistically significant ($p = 0.0479$).

These findings provide a serious warning about future water stress in the agricultural sector, highlighting the urgent need for revisions to cropping patterns—particularly in central arid regions during summer—and the adoption of climate-adaptive water management strategies. Key recommendations include: (1) transitioning to drought-tolerant crops, (2) regional prioritization focusing on Yazd, Isfahan, Semnan, and South Khorasan provinces, (3) reducing greenhouse gas emissions consistent with the SSP1-2.6 pathway, and (4) integrating future ETo projections into national water resource planning. Limitations include dependence on the accuracy of baseline calibration and uncertainty in model projections. Future research should validate findings against lysimeter data and explore additional models and scenarios.

Ultimately, this study demonstrates that Iran's water resource management must be restructured based on forward-looking ETo projections; otherwise, the climatic pressure from increased evapotranspiration could surpass the impacts of reduced precipitation, posing a serious challenge to Iran's food security.

Keywords: Potential evapotranspiration, Hargreaves-Samani calibration, Climate change, CMIP6, Climate Sensitivity Index, Iran.

واسنجی منطقه‌ای روش هارگریوز - سامانی و پیش‌نگری تبخیر - تعرق پتانسیل در ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم

محمد محمدلو^{۱*}، عبدالرضا بهره‌مند^۱، شروان قراری^۲، امیر سعدالدین^۱، ایمان بابائیان^۳

۱- گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، <https://orcid.org/0000-0001-5146-5391>

۱- گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، <https://orcid.org/0000-0001-5012-2653>

۲- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شولیک، دانشگاه کلگری، کلگری، آلبرتا، کانادا، <https://orcid.org/0000-0002-5358-5714>

۱- گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران، <https://orcid.org/0000-0002-4192-4010>

۲- مرکز تحقیقات اقلیم، پژوهشکده هواشناسی و علوم جوی، مشهد، ایران،

*رایانامه نویسنده مسئول: Mohamadlou@gu.ac.ir

چکیده

تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_o) از مؤلفه‌های اساسی چرخه آب است که به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار می‌گیرد. در این پژوهش، روش هارگریوز - سامانی (HS) برای اولین بار در ایران و با استفاده از داده‌های مشاهداتی ۱۵۲ ایستگاه سینوپتیک در دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵، با روش مرجع پنمن - مونتیت فائو (FAO56) به صورت منطقه‌ای کالیبره شد. چهار رویکرد کالیبراسیون در مقیاس روزانه و ماهانه (شامل برازش خطی و برازش درجه دوم) بر روی داده‌های تجمیع شده هر یک از شش ناحیه اقلیمی - ارتفاعی مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج نشان داد روش خطی ماهانه با بالاترین کارایی (میانگین ضریب تبیین ۰/۸ و میانگین جذر میانگین مربعات خطا ۰/۷۷ میلی‌متر بر روز) مناسب‌ترین گزینه است. بر این اساس، ضرایب اصلاحی برای شش ناحیه اقلیمی - ارتفاعی محاسبه و در برآورد ET_o آینده (۲۰۹۰-۲۰۳۰) با استفاده از خروجی سه مدل SSP1-2.6، CNRM-CM6-1 و IPSL-CM6A-LR، ACCESS-CM2 تحت سه سناریوی انتشار SSP5-8.5، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به کار گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد ET_o در تمامی مناطق کشور روند افزایشی دارد و میانگین افزایش آن در دوره آینده دور (۲۰۹۰-۲۰۷۱) نسبت به دوره پایه بین ۵۸ تا ۱۲۹ درصد متغیر است. مناطق عرض بالا - ارتفاع کم و نواحی مرکزی خشک بیشترین حساسیت را دارند، در حالی که مناطق کوهستانی کمترین افزایش را نشان می‌دهند. بیشترین افزایش مطلق در ماه‌های تابستان (تا ۱۵/۵ میلی‌متر در ماه) و بیشترین افزایش نسبی در ماه‌های زمستان (تا ۱۸۲ درصد) مشاهده شد. این نتایج هشدار جدی برای افزایش تنش آبی در بخش کشاورزی است و لزوم بازنگری در الگوهای کشت به‌ویژه در مناطق خشک مرکزی و در فصل تابستان و اتخاذ راهبردهای مدیریت آب سازگار با اقلیم را برجسته می‌سازد.

کلمات کلیدی: خشکسالی‌های آینده، SSP، روش پنمن - مونتیت، کالیبراسیون منطقه‌ای، مدهای اقلیمی CMIP6، شاخص حساسیت اقلیمی، ایران

مقدمه

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن بیست و یکم، چرخه هیدرولوژیکی زمین به طور بنیادین تحت تأثیر قرار داده است (IPCC^۱, 2021). پیامدهای این پدیده در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، به‌مراتب شدیدتر بوده و به‌صورت افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، افزایش فراوانی رخدادهای حدی و تشدید تنش آبی نمایان می‌شود (Gohari et al., 2013; Madani, 2014).

در این میان، تبخیر - تعرق پتانسیل (ET_o) به‌عنوان شاخصی از توان تبخیری جو، نقشی محوری در ارزیابی بیلان آبی، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی آبیاری ایفا می‌کند (Allen et al., 1998). مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزایش دمای جهانی می‌تواند منجر به افزایش قابل توجه ET_o و در نتیجه تشدید فشار بر سیستم‌های آبی، کشاورزی و زیست‌محیطی شود (Galván-Cano et al., 2025). روش فائو - پنمن - مونتیت (FAO-56 PM) به دلیل تکیه بر مبانی فیزیکی انتقال انرژی و جرم، به‌عنوان روش

مرجع جهانی برای برآورد ETo شناخته می‌شود (Allen et al., 1998). با این حال، کاربرد این روش در مقیاس‌های بزرگ مکانی و در مطالعات تغییر اقلیم با محدودیت‌هایی همراه است؛ از جمله نیاز به داده‌های کامل هواشناسی نظیر تابش، رطوبت و سرعت باد که در بسیاری از ایستگاه‌ها و حتی در خروجی مدل‌های اقلیمی با عدم قطعیت بالا یا فقدان داده مواجه است (Tabari et al., 2012). در پاسخ به این چالش، روش‌های تجربی ساده‌تری توسعه یافته‌اند که نیاز داده‌ای کمتری دارند. از جمله این روش‌ها، روش هارگریوز - سامانی (Hargreaves and Samani, 1985) به دلیل سادگی ساختار، عدم پیچیدگی محاسباتی و وابستگی صرف به داده‌های دمای حداقل و حداکثر، به طور گسترده در شرایط داده کم و در مطالعات تغییر اقلیم مورد استفاده قرار گرفته است. با این وجود، ضعف اصلی این روش، استفاده از یک ضریب تجربی ثابت جهانی ۰.۰۲۳ است که مطالعات متعدد نشان داده‌اند در اقلیم‌های مختلف، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک، می‌تواند منجر به خطاهای سیستماتیک در برآورد شود (Almorox and Grieser, 2015; Sharafi et al., 2021). پژوهش‌های بین‌المللی بر ضرورت واسنجی محلی و منطقه‌ای این روش برای بهبود دقت آن تأکید دارند (Landaras et al., 2008; Wu et al., 2022; Musa and Elagib, 2025). بر این اساس، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که واسنجی منطقه‌ای روش هارگریوز - سامانی می‌تواند دقت برآورد تبخیر - تعرق پتانسیل را به طور قابل توجهی بهبود دهد؛ به‌گونه‌ای که کالیبراسیون سالانه یا منطقه‌ای عملکرد این روش را نسبت به نسخه کلاسیک آن ارتقا داده است (Nóia Júnior et al., 2019; Monteiro et al., 2024; Ganjei et al., 2026).

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی ETo و روش‌های برآورد آن پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش‌ها عموماً افزایش ETo در دهه‌های اخیر و آینده را تأیید می‌کند و نقش غالب دما را در این تغییرات نشان می‌دهد (Tabari et al., 2012; Goudarzi et al., 2018; Araghi et al., 2020; Soltani et al., 2024).

با این حال، بخش قابل توجهی از مطالعات داخلی از روش هارگریوز - سامانی با ضریب ثابت جهانی استفاده کرده‌اند یا به مقیاس‌های مکانی محدود و تعداد اندکی از ایستگاه‌ها بسنده کرده‌اند (Raziei and pereira, 2013; Fazeli et al., 2020). در نتیجه، یک چارچوب منسجم و ملی برای واسنجی منطقه‌ای این روش، متناسب با تنوع شدید اقلیمی و توپوگرافی ایران، همچنان به‌عنوان حلقه گم شده است.

علاوه بر دقت برآورد ETo، شناخت حساسیت این متغیر نسبت به تغییرات اقلیمی آینده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مطالعات تغییر اقلیم، حساسیت اقلیمی به‌عنوان میزان واکنش یک متغیر محیطی نسبت به تغییرات محرک‌های اقلیمی تعریف می‌شود و یکی از مؤلفه‌های کلیدی در ارزیابی پاسخ سیستم‌های طبیعی به تغییر اقلیم به شمار می‌رود (O'Brien et al., 2014; Adger, 2006; IPCC, 2004). با وجود کاربرد گسترده این مفهوم در تحلیل آسیب‌پذیری اقلیمی، استفاده از یک شاخص کمی برای سنجش حساسیت تبخیر - تعرق پتانسیل نسبت به تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در مقیاس ملی، محدود بوده است. از این رو، در این پژوهش شاخص حساسیت اقلیمی Climate Sensitivity Index به‌عنوان ابزاری برای کمی‌سازی واکنش ETo به تغییرات اقلیمی به کار گرفته می‌شود.

بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، واسنجی منطقه‌ای روش هارگریوز - سامانی با استفاده از روش مرجع پنمن - مونتیث در شش زون اقلیمی - ارتفاعی ایران و ارزیابی حساسیت ETo نسبت به تغییر اقلیم است. بدین منظور، از داده‌های روزانه ۱۵۲ ایستگاه هواشناسی در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و خروجی ترکیب چندمدلی وزنی از سه مدل تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰)، میانی (۲۰۵۱ تا ۲۰۷۰) و دور (۲۰۷۱ تا ۲۰۹۰) استفاده شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنایی علمی و کاربردی برای شناسایی مناطق بحرانی، اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم در مقیاس ملی را فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه بر اساس عرض جغرافیایی و طبقات ارتفاعی

وسعت جغرافیایی ایران و گستره‌ی وسیع عرض و ارتفاع آن، یکی از متنوع‌ترین و پیچیده‌ترین الگوهای اقلیمی در جنوب غرب آسیا را به وجود آورده است (Domrões and Kaviani, 1993). تعامل بین عرض جغرافیایی و ارتفاع توپوگرافی، نقش تعیین‌کننده‌ای در رژیم‌های دما، الگوهای بارش و طول دوره رشد گیاه دارد؛ سه عاملی که به طور بنیادین توان کشاورزی را

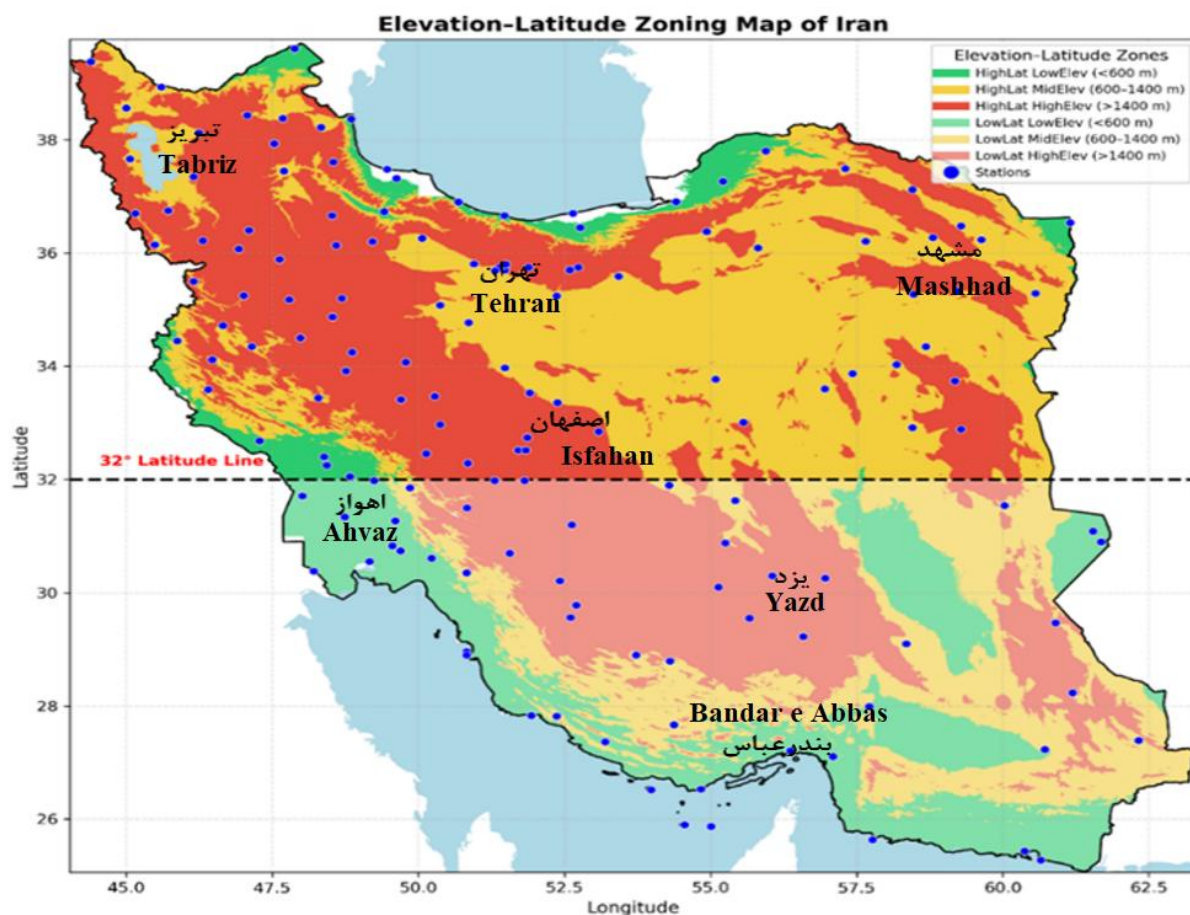
مشخص می‌کنند. تنوع عرض جغرافیایی و پستی و بلندی‌های گسترده، سبب ایجاد گرادیان‌های اقلیمی مشخصی از شمال به جنوب کشور شده است. بر اساس مطالعات کلاسیک (Domröes and Kaviani, 1993) و نیز پژوهش‌های اقلیمی جدیدتر (مثلاً، Zarrin et al., 2011; Raziei et al., 2013; Abasi et al., 2022)، مرز عرض جغرافیایی حدود ۳۲ درجه شمالی به‌عنوان ناحیه‌ی گذار اقلیمی بین سامانه‌های مرطوب شمالی و خشک مرکزی ایران شناخته می‌شود. این ناحیه تقریباً با تغییرات آشکار در میانگین بارش سالانه، تبخیر و تعرق پتانسیل و شاخص‌های حرارتی هم‌خوانی دارد. تحلیل مقدماتی ما بر اساس میانگین دما و بارش ایستگاه‌های سینوپتیک نیز نشان داد که بیشترین گرادیان اقلیمی عرضی در بازه‌ی ۳۱ تا ۳۳ درجه شمالی رخ می‌دهد؛ بنابراین، انتخاب ۳۲ درجه شمالی به‌عنوان مرز میانی ناحیه‌ی انتقالی از نظر تجربی و اقلیمی قابل توجیه است. این روش، شش ناحیه‌ی متمایز بر اساس ترکیب ارتفاع و عرض جغرافیایی به شرح جدول ۱ تعیین می‌کند که چارچوبی منسجم و قابل تکرار برای تحلیل‌ها ارائه می‌دهد (شکل ۱).

جدول ۱. توزیع عرضی و ارتفاعی ایستگاه‌های هواشناسی کشور

Table1. latitudinal and altitudinal distribution of meteorological stations across Iran

Latitudinal Zone	Latitude > 32°N			Latitude < 32°N		
Altitudinal Zone	High Elevation (> 1400 m)	Medium Elevation (600–1400 m)	Low Elevation (< 600 m)	High Elevation (> 1400 m)	Medium Elevation (600–1400 m)	Low Elevation (< 600 m)
Number of Stations	39	42	18	15	26	12

در این تقسیم‌بندی عرض جغرافیایی ۳۲ درجه شمالی به‌عنوان مرز میانی یک ناحیه گذار اقلیمی شناخته شده (Domröes, Kaviani and 1993) انتخاب شد. این خط تقریباً مرز بین مناطق عرض بالا (بیش از ۳۲ درجه) با شرایط نسبتاً خنک‌تر و مرطوب‌تر، و مناطق عرض پایین (کمتر از ۳۲ درجه) با شرایط گرم‌تر و خشک‌تر را مشخص می‌کند (Rahimzadeh and Asgari, 2004). همچنین ایستگاه‌ها بر اساس سه کلاس ارتفاعی طبقه‌بندی شدند: ارتفاع کم (کمتر از ۶۰۰ متر): نواحی گرم، ارتفاع متوسط (۶۰۰–۱۴۰۰ متر): مناطق معتدل، ارتفاع زیاد (بیش از ۱۴۰۰ متر): نواحی سرد و کوهستانی. برای اطمینان از این‌که این طبقه‌بندی در تفکیک رفتار هیدرو-اقلیمی مناطق موفق بوده است، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص حساسیت اقلیمی (CSI) بین شش زون تفاوت آماری معناداری دارد ($P < 0.05$). این یافته به طور تجربی تأیید می‌کند که چارچوب پیشنهادی، الگوی مکانی حساسیت اقلیمی را به‌خوبی بازتاب می‌دهد و مبنای مناسبی برای تحلیل‌های بعدی فراهم می‌کند.



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی اقلیمی - ارتفاعی ایران که شش منطقه مجزا و توزیع ۱۵۲ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک مورد استفاده برای ارزیابی اقلیمی را نشان می‌دهد.

Fig 1. climate-altitude regionalization map of Iran, illustrating six separate zones and the distribution of 152 synoptic meteorological stations employed for climatic assessment.

داده‌های مشاهداتی، سناریو و تصحیح سوگیری داده‌ها

داده‌های مشاهداتی: در این پژوهش داده‌های روزانه ۱۵۲ ایستگاه سینوپتیک در سراسر کشور برای دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) از سازمان هواشناسی تهیه شد (IRIMO, 2025). علت انتخاب دوره یادشده، تطابق آن با دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی برای کالیبره کردن برون داد مدل‌های اقلیمی بوده است. متغیرهای اقلیمی مورد استفاده شامل دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش، سرعت باد و ساعات آفتابی بود که مبنای اصلی تحلیل‌های اقلیمی می‌باشند. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل ۱ آورده شده است.

انتخاب و ارزیابی مدل‌های اقلیمی: برای شبیه‌سازی شرایط آینده، سه مدل گردش عمومی (GCM) از پروژه CMIP6 شامل: ACCESS-CM2 با کد H، IPSL-CM6A-LR با کد J و CNRM-CM6-1 با کد F انتخاب شدند. مبنای این انتخاب، ارزیابی جامع عملکرد ده مدل CMIP6 در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی ایران در ۱۵۲ ایستگاه بود که با استفاده از معیار کلینگ گوپتا و درصد خطای مطلق مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر سه مدل فوق‌الذکر در بازتولید شرایط اقلیمی تاریخی ایران بودند (جدول شماره ۳). همچنین جدول شماره ۲ مشخصات مدل‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد که با کدهای A تا J مشخص شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در این مطالعه

Table 2. specifications of the CMIP6 models used in this study

Model Name and Assigned Code	Developing Country	Developing Country	Resolution	Variant	SSP126	SSP245	SSP370	SSP585
------------------------------	--------------------	--------------------	------------	---------	--------	--------	--------	--------

CanESM5	A	Canada	2.81×2.79	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
BCC-CSM2-MR	B	China	1.12×1.12	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
FGOALS-g3	C	China	2.02×2.00	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
MIROC6	D	Japan	1.41×1.41	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
NorESM2-LM	E	Norway	2.50×1.89	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
CNRM-CM6-1	F	France	1.41×1.41	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
HadGEM3-GC31-LL	G	United Kingdom	1.88×1.26	r1ilp1f3	✓	✓	–	✓
ACCESS-CM2	H	Australia	1.88×1.24	r1ilp1fl	✓	✓	✓	✓
ACCESS-ESM1-5	I	Australia	1.88×1.25	r3ilp1fl	✓	✓	✓	✓
IPSL-CM6A-LR	J	France	2.50×1.27	r4ilp1fl	✓	✓	✓	✓

جدول ۳. ارزیابی مقایسه‌ای خروجی‌های مدل CMIP6 برای دمای حداکثر و دمای حداقل در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده (۱۹۸۵–۲۰۱۴)

Table 3. Comparative assessment of CMIP6 model performance for maximum and minimum temperatures relative to observed data (1985–2014).

Variable	Evaluation Index	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Maximum temperature	Absolute Error (%)	14.73	12.52	16.83	44.23	11.21	19.21	11.22	13.58	15.61	23.19
	KGE Index	0.43	0.27	0.59	-0.70	0.72	0.57	0.45	0.65	0.60	0.62
Minimum temperature	Absolute Error (%)	40.68	35.00	35.38	97.90	53.01	31.47	39.13	40.00	41.32	33.30
	KGE Index	0.40	0.50	0.50	-0.31	0.73	0.55	0.43	0.49	0.46	0.50

مقیاس‌کاهی^۱ بر اساس ترکیب چندمدلی وزنی^۲: در این مرحله مقیاس مکانی داده‌های شبکه‌ای مدل‌ها تا سطح ایستگاه کاهش داده شد. به دلیل وجود خطای سیستماتیک در خروجی مدل‌های اقلیمی، داده‌های روزانه دمای حداقل و حداکثر مدل‌های منتخب با استفاده از روش نگاشت تجربی چندک‌ها^۳ (EQM) تصحیح شدند. این روش با تطبیق تابع توزیع تجربی (CDF) داده‌های شبیه‌سازی‌شده دوره تاریخی با CDF داده‌های مشاهداتی، قادر است خطای سیستماتیک مدل را به‌ویژه در بخش‌های دُمی توزیع (مربوط به رویدادهای حدی) به طور مؤثری کاهش دهد (Maraun, 2016; Cannon et al., 2015). این ویژگی، EQM را به روشی ایده‌آل برای مطالعات تغییر اقلیم که بر رویدادهای حدی متمرکزند، تبدیل می‌کند (Themezl et al., 2011). همچنین برای کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی هر مدل، از ترکیب خروجی سه مدل برتر استفاده شد. سهم هر مدل در این ترکیب بر اساس عملکرد آن در شبیه‌سازی دماهای حداقل و حداکثر در دوره پایه و با استفاده از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) تعیین گردید. بر این اساس، برای هر متغیر (دمای حداقل و حداکثر)، ضرایب وزنی جداگانه‌ای محاسبه و در تلفیق نهایی داده‌های آینده اعمال شد. با توجه به مقادیر R^2 و RMSE، ضرایب مدل ACCESS-

1- Downscaling

2- Weighted Multi-Model Ensemble

3- Empirical Quantile Mapping

CM2 برای دمای حداکثر و حداقل به ترتیب برابر ۰/۳۳ و ۰/۳۵۷، برای مدل IPSL-CM6A-LR به ترتیب برابر ۰/۳۴ و ۰/۳۲ و برای مدل CNRM-CM6-1 به ترتیب ۰/۳۳ و ۰/۳۲۳ است (جدول ۴). در این مطالعه ضریب وزنی مربوطه بر اساس دمای میانگین استفاده شده است.

تحلیل‌های آینده‌نگر بر اساس سه مسیر اجتماعی - اقتصادی مشترک (SSP) شامل SSP1-2.6 (پایدار)، SSP2-4.5 (میان) و SSP5-8.5 (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی) انجام گرفت. این سه سناریو طیفی از شرایط ممکن آینده را از انتشار کم و سازگار با اهداف اقلیمی جهانی (SSP1-2.6) تا انتشار متوسط با روندهای فعلی توسعه (SSP2-4.5) و نهایتاً انتشار بالا ناشی از تداوم توسعه فسیلی (SSP5-8.5) پوشش می‌دهند. به این ترتیب، انتخاب این سه سناریو امکان بررسی پاسخ مدل در برابر گستره‌ی واقع‌بینانه‌ای از مسیرهای اجتماعی - اقتصادی و اقلیمی را فراهم می‌کند. داده‌های آینده در سه بازه ۲۰ ساله آینده نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۰) مورد بررسی قرار گرفتند. این تقسیم‌بندی، امکان تحلیل گام‌به‌گام تغییر اقلیم و تأثیر آن بر تبخیر - تعرق پتانسیل را در زون‌های شش‌گانه فراهم می‌سازد.

محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل

در این پژوهش، به منظور برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل دوره پایه در سطح کشور، از داده‌های ۱۵۲ ایستگاه سینوپتیک طی بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ استفاده گردید. ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی به ۶ زون اقلیمی تفکیک شدند تا تحلیل‌های منطقه‌ای با دقت بیشتری انجام گیرد. از میان روش‌های محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل، روش پنمن - مونتیت (FAO Penman-Monteith) به عنوان روش فیزیکی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل انتخاب شد؛ زیرا مبتنی بر اصول ترمودینامیکی و بیوفیزیکی بوده و قادر است اثرات هم‌زمان تابش، دما، رطوبت و باد را در یک مدل جامع لحاظ کند. این روش توسط سازمان FAO در سند استاندارد FAO-56 به عنوان روش مرجع جهانی برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل به‌ویژه برای ارزیابی نیاز آبی گیاهان در مطالعات کشاورزی و منابع آب معرفی شده است (Allen et al., 1998). با توجه به محدودیت دسترسی به داده‌های هواشناسی مورد نیاز روش فیزیکی پنمن - مانتیت، به‌ویژه در شرایط اقلیمی آینده و سناریوهای تغییر اقلیم، و همچنین پراکندگی و کیفیت داده‌ها در بسیاری از مناطق ایران، در این مطالعه از روش تجربی هارگریوز - سامانی به عنوان جایگزین ساده‌تر و قابل اجرا استفاده گردید. از آنجا که روش هارگریوز - سامانی به عنوان یک مدل تجربی، بدون در نظر گرفتن تمامی پارامترهای مختلف تأثیرگذار بر میزان تبخیر و تعرق دارای عدم قطعیت ذاتی بوده و نتایج حاصل از آن می‌تواند در شرایط اقلیمی مختلف با خطا همراه باشد، ضرورت دارد که ضریب تجربی این مدل برای مناطق مختلف ایران به صورت منطقه‌ای واسنجی گردد. این موضوع با وجود اهمیت بالا، در بسیاری از مطالعات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته است و می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل و نیاز آبی گیاهان در ایران داشته باشد.

روش پنمن - مونتیت (FAO Penman-Monteith)

همان‌گونه که گفته شد این روش به عنوان استاندارد جهانی توسط FAO توصیه شده است و دقت بالایی در برآورد تبخیر و تعرق دارد. معادله پایه این روش به صورت زیر است:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (2)$$

که در آن ET_0 ، تبخیر و تعرق پتانسیل بر حسب میلی‌متر در روز، R_n ، تابش خالص در سطح زمین، G ، $(MJ/m^2/day)$ ، شار گرمایی خاک $(MJ/m^2/day)$ ، T ، دمای میانگین هوا $(^{\circ}C)$ ، u_2 ، سرعت باد در ارتفاع ۲ متر (m/s) ، e_s ، بخار اشباع (kPa) ، e_a ، فشار بخار واقعی (kPa) ، Δ ، شیب منحنی فشار بخار اشباع $(kPa/^{\circ}C)$ ، γ ، ثابت روان سنجی $(kPa/^{\circ}C)$ می‌باشند.

روش هارگریوز - سامانی (Hargreaves-Samani) و اصلاح منطقه‌ای ضریب تجربی آن

مدل تجربی هارگریوز - سامانی برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$PET = K_{rs} \times R_a \times (T_{avg} + 17.8) \times \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

T_{avg} دمای میانگین ماهانه ($^{\circ}\text{C}$)، T_{max} و T_{min} دمای حداکثر و حداقل ماهانه ($^{\circ}\text{C}$)، R_a تابش خورشیدی خارج جو ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) که بر اساس عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها و روزهای سال محاسبه می‌گردد. k_{rs} ضریب تجربی پایه است و مقدار پیش‌فرض آن برابر با ۰.۰۰۲۳ پیشنهاد شده است. با این حال، مطالعات متعدد نشان داده‌اند که این مقدار در شرایط اقلیمی مختلف ممکن است منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد نمودن میزان تبخیر و تعرق پتانسیل شود (Almorox et al., 2016; Ferreira et al., 2024; Musa et al., 2025). در این پژوهش، به‌منظور واسنجی روش ساده شده هارگریوز - سامانی در ایران با روش استاندارد پنمن - مونتیث برای برآورد تبخیر - تعرق مرجع، داده‌های روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک مختلف شامل دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی جمع‌آوری گردید. پس از کنترل کیفیت و بازسازی نواقص آماری داده‌های ۱۵۲ ایستگاه از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴، تبخیر - تعرق پتانسیل روزانه با هر دو روش محاسبه شد. ایستگاه‌ها بر اساس منطقه اقلیمی در ۶ زون گروه‌بندی شده و برای هر منطقه، با استفاده از چهار روش رگرسیون خطی روزانه، رگرسیون خطی ماهانه، معادله درجه دوم روزانه و معادله درجه دوم ماهانه مقادیر پنمن - مونتیث (به‌عنوان متغیر مستقل) و هارگریوز - سامانی (به‌عنوان متغیر وابسته)، روابط واسنجی استخراج گردید و پس از انتخاب بهترین روش برای برازش داده‌ها، ضریب K_{rs} برای هر زون اقلیمی - ارتفاعی ایران به‌صورت منطقه‌ای اصلاح گردید. این روش باعث شد که خروجی مدل هارگریوز - سامانی با مقادیر مرجع پنمن - مونتیث تطبیق بیشتری داشته باشد و خطای RMSE در سطح زون به طور قابل توجهی کاهش یابد. معادله محاسبه این ضریب به‌صورت زیر است.

$$k_{rs}^{new} = 0.0023 \cdot \frac{PM_{estimated}}{HS} \quad (3)$$

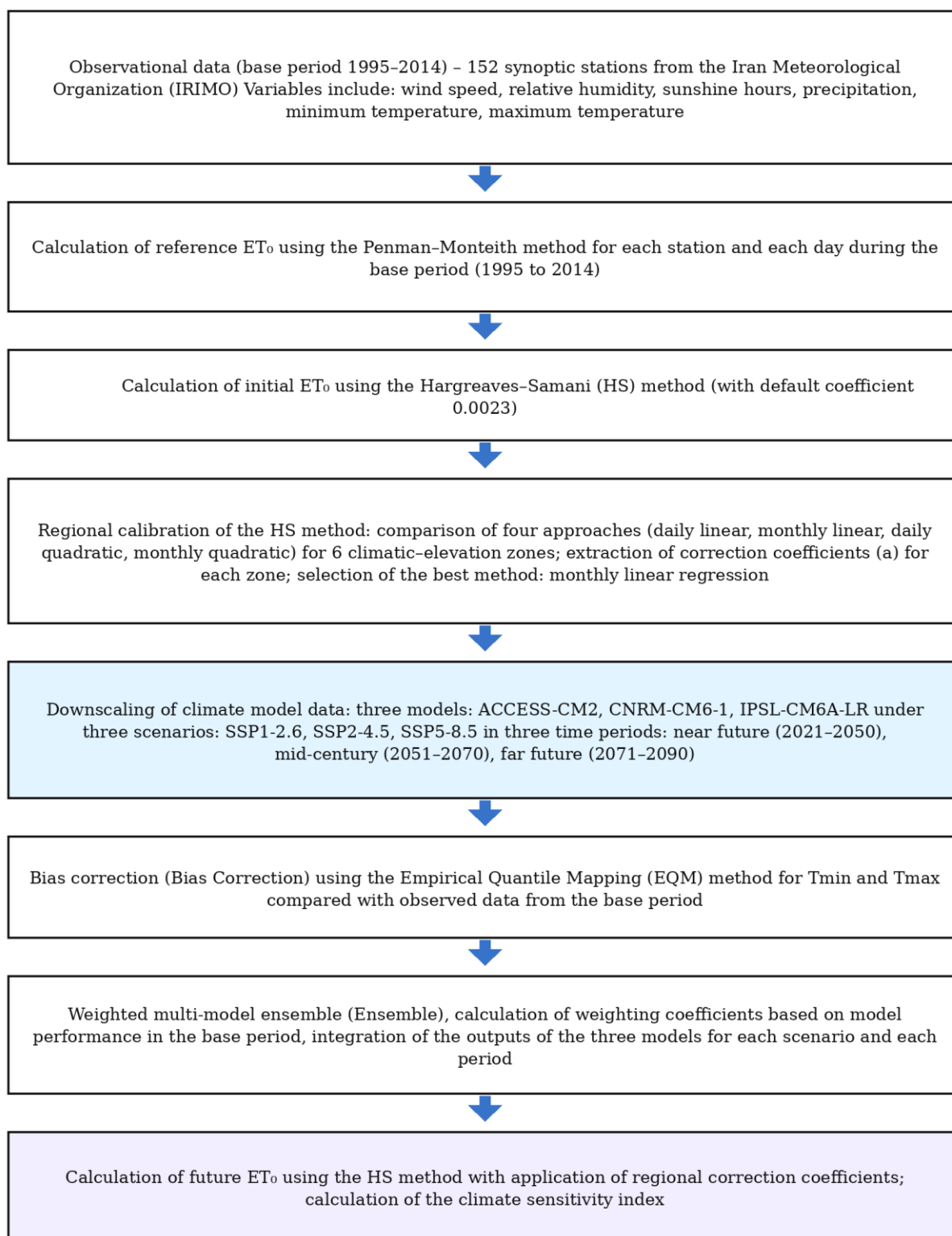
در نهایت، میانگین مقادیر k_{rs}^{new} برای هر زون محاسبه شد و به‌عنوان ضریب اصلاحی منطقه‌ای پیشنهاد گردید.

شاخص حساسیت اقلیمی (Climate Sensitivity Index)

این شاخص میزان افزایش نسبی تبخیر - تعرق پتانسیل در آینده را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. هدف آن، شناسایی مناطقی است که بیشترین واکنش را به تغییر اقلیم نشان می‌دهند. معادله این شاخص به شرح زیر می‌باشد.

$$CSI_i = \left(\frac{ETO_{o,i}^{future} - ETO_{o,i}^{baseline}}{ETO_{o,i}^{baseline}} \right) \times 100 \quad (4)$$

که در آن $ETO_{o,i}^{future}$ میانگین تبخیر و تعرق سناریوی اقلیمی و $ETO_{o,i}^{baseline}$ میانگین تبخیر و تعرق در دوره پایه و CSI_i درصد تغییرات تبخیر و تعرق در آینده نسبت به دوره پایه می‌باشد. مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده مناطق بحرانی و در معرض ریسک بیشتر در دوره‌های آتی خواهد بود. شکل ۲ مراحل انجام این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۲. مراحل و توالی انجام پژوهش

Fig 2. research workflow and sequential steps of the study

نتایج و بحث

به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ناشی از تفاوت در ساختار مدل‌های اقلیمی، در این پژوهش از ترکیب سه مدل CMIP6 استفاده گردید و برای کاهش مقیاس داده‌های مدل‌های اقلیمی مورد استفاده تا سطح ایستگاه از روش وزنی بر مبنای عملکرد داده‌های تاریخی مدل در شبیه‌سازی داده‌های مشاهداتی استفاده شد. این روش مزایایی دارد از جمله این که مدل‌هایی که در

شبیه‌سازی گذشته بهتر عمل کرده‌اند، سهم بیشتری در پیش‌نگری آینده دارند و نیز عدم قطعیت مدل‌سازی کاهش می‌یابد. جدول ۴ ضرایب وزنی دمای حداکثر و دمای حداقل و میانگین دمای مربوط به هر مدل را نشان می‌دهد. ضرایب وزنی محاسبه شده در داده‌های آینده سناریوهای اقلیمی اعمال گردیده و خروجی‌های مدل‌ها با استفاده از روش ترکیب چندمدلی تلفیق^۱ شدند.

جدول ۴. ضریب وزنی مدل‌های مختلف بر اساس عملکرد آن‌ها در دوره تاریخی برای متغیرهای مختلف جهت استفاده از میانگین وزنی داده‌ها در دوره آینده

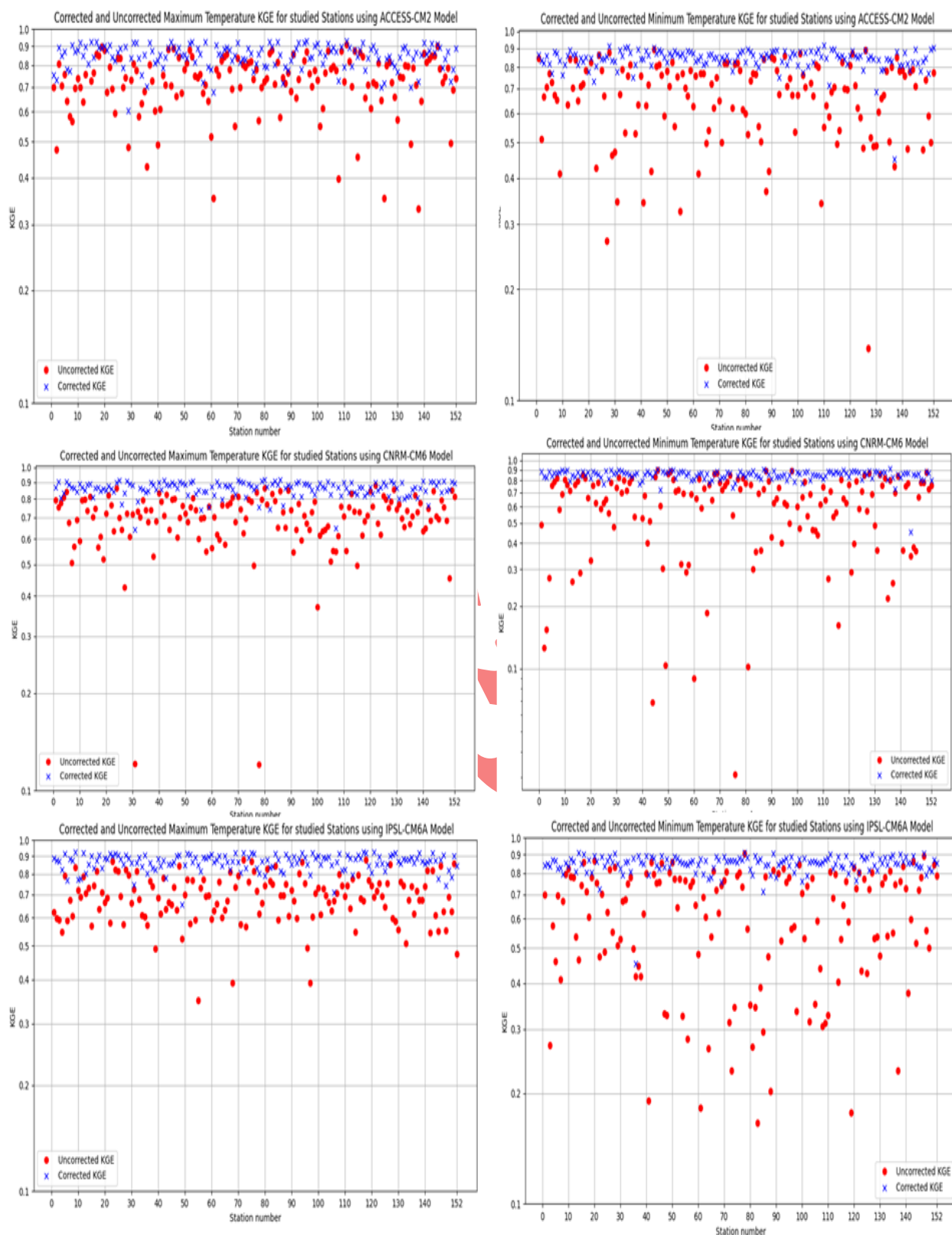
Table 4. Model weighting coefficients based on historical performance for different variables, applied for weighted averaging of future projections

Model	Maximum Temperature	Minimum Temperature	Mean Temperature
ACCESS	0.33	0.357	0.34
CNRM	0.33	0.323	0.33
IPSL	0.34	0.32	0.33

برای ارزیابی اثربخشی زون‌بندی پیشنهادی بر اساس عرض جغرافیایی و ارتفاع، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص حساسیت اقلیمی در بین شش زون اقلیمی - ارتفاعی تفاوتی آماری معنادار دارد ($P < 0.05$). این یافته تأیید می‌کند که طبقه‌بندی پیشنهادی توانسته است الگوی مکانی حساسیت اقلیمی را به خوبی تفکیک کند. نتایج نمودارهای جعبه‌ای نشان می‌دهند که در تمامی سناریوهای اقلیمی و دوره‌های آینده، زون عرض بالا - ارتفاع بالا (مناطق سرد و کوهستانی) کمترین میانگین شاخص حساسیت اقلیمی را نسبت به سایر زون‌ها از خود نشان می‌دهد. ارزیابی عملکرد روش EQM (نگاشت تجربی چندک‌ها) برای تصحیح خطا در داده‌های دمای حداقل و دمای حداکثر با استفاده از شاخص کلینگ گوپتا^۲ در شکل ۳ نشان‌دهنده آن است که این روش در تصحیح خطاهای اریبی دما در ایران عملکرد بسیار خوبی دارد.

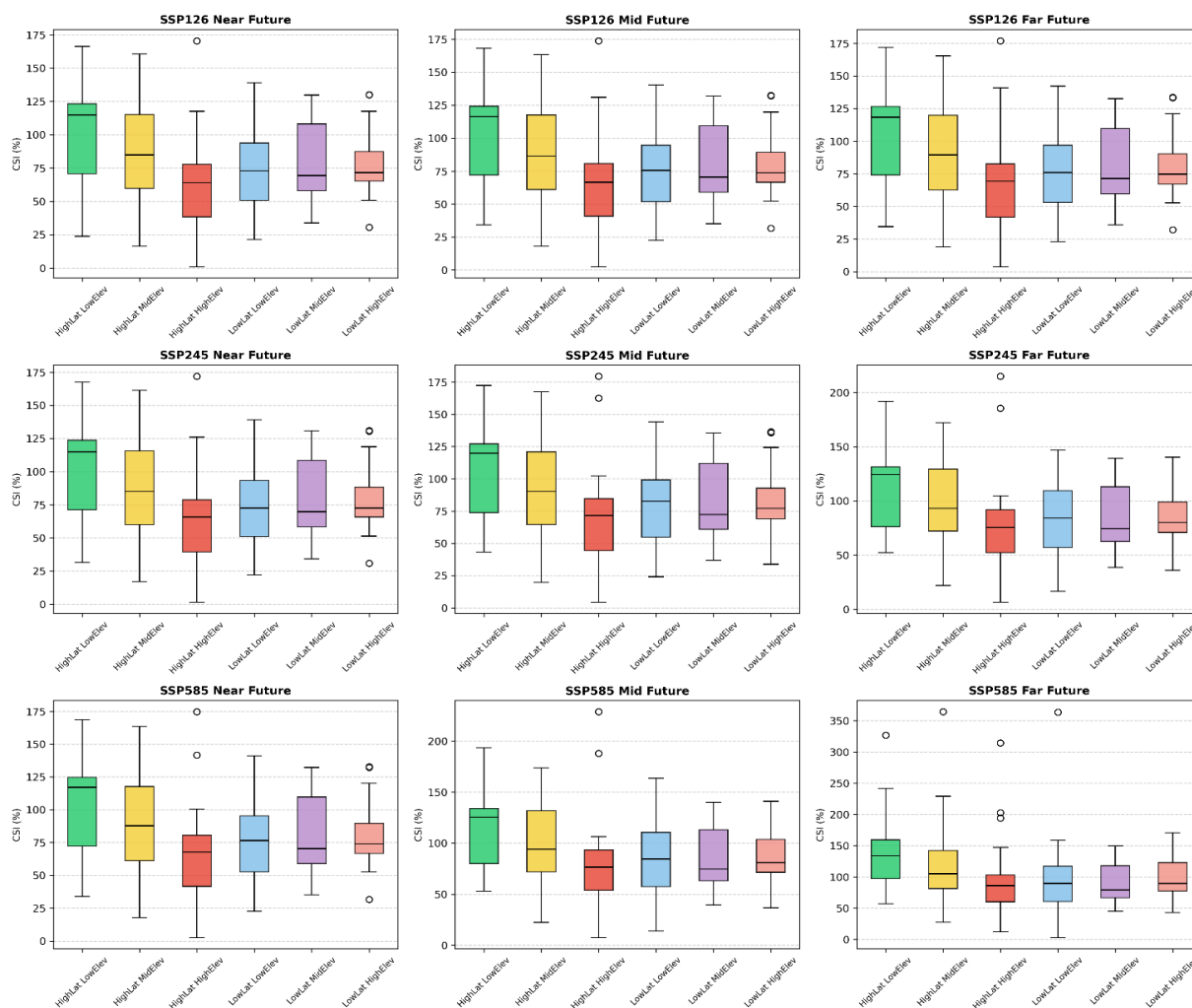
1- Ensemble

2- Kling-Gupta Efficiency



شکل ۳. مقادیر KGE اصلاح نشده (قرمز) و اصلاح شده با روش EQM (آبی) برای دمای حداقل و دمای حداکثر در سه مدل ACCESS-CM2، CNRM-CM6 و IPSL-CM6A. شکل نشان‌دهنده دقت بالای روش EQM در تصحیح خطا می‌باشد.

Fig. 3. Uncorrected (red) and EQM-corrected (blue) KGE values for minimum and maximum temperatures across three models (ACCESS-CM2, CNRM-CM6, and IPSL-CM6A), demonstrating the high performance of the EQM method in bias correction.

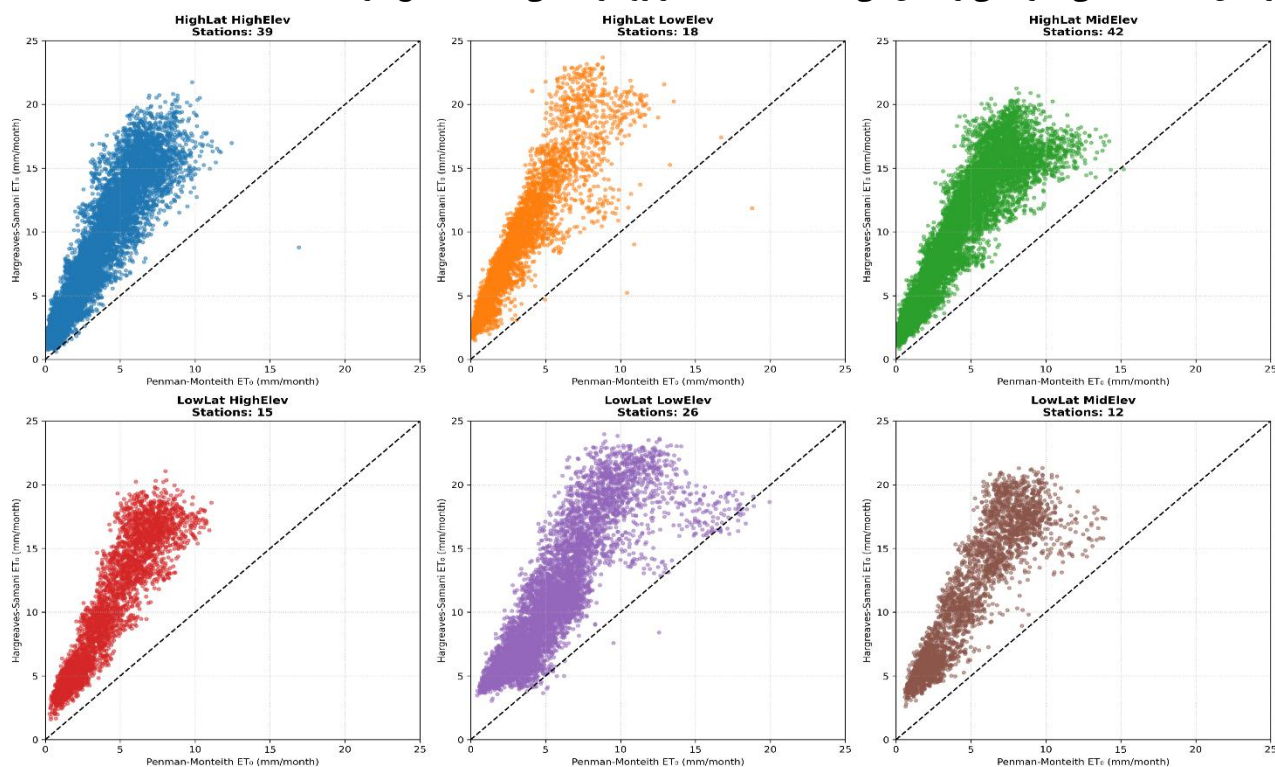


شکل ۴. تغییرات شاخص حساسیت اقلیمی در زون‌های مختلف اقلیمی - ارتفاعی تحت سناریوهای مختلف (بالا: سناریوی خوش‌بینانه، وسط: سناریوی حد وسط و پایین: سناریوی بدبینانه) و دوره‌های زمانی آینده (از چپ به راست: آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور)

Fig 4. changes in the climate sensitivity index across various climatic-altitudinal zones under different scenarios (top: optimistic; middle: intermediate; bottom: pessimistic) and future periods (left to right: near, mid, and far future)

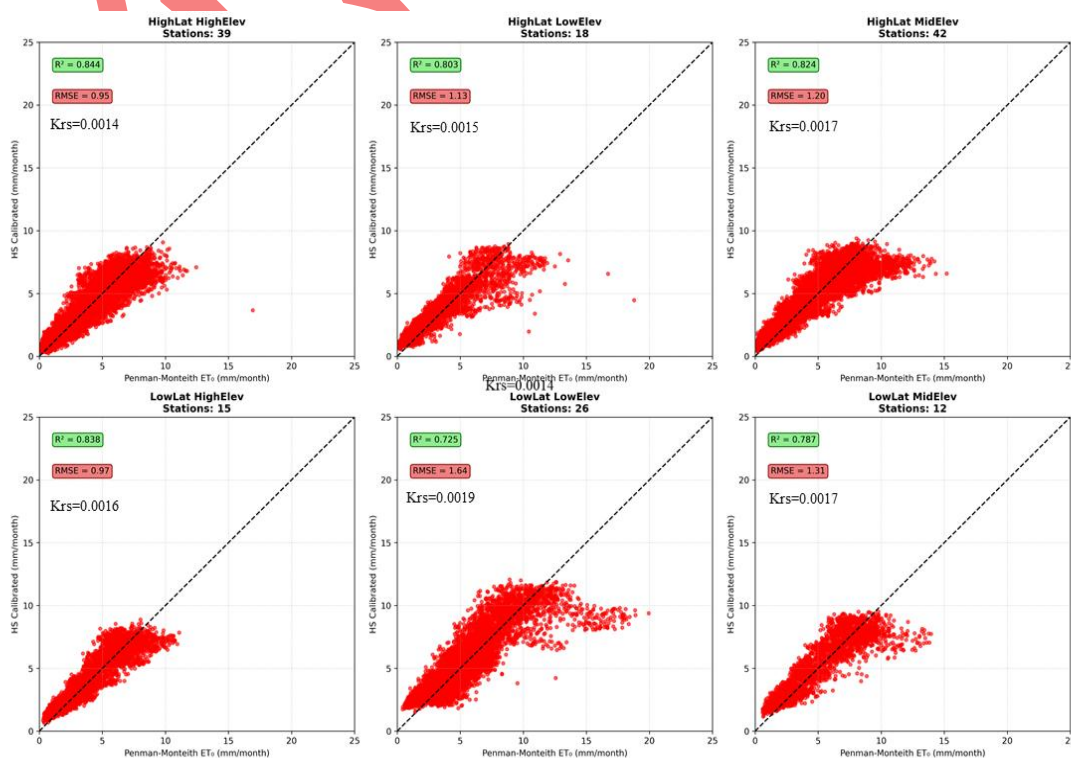
جهت واسنجی مدل هارگریوز - سامانی و برآورد بهترین عملکرد، دو روش رگرسیون خطی ساده و مدل چندجمله‌ای درجه دوم در مقیاس روزانه و ماهانه مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این واسنجی، تطبیق خروجی‌های روش هارگریوز - سامانی با مقادیر مرجع حاصل از روش فیزیکی پنمن - مونتیث در بازه زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ برای ایستگاه‌های اقلیمی ایران بود. نتایج حاصل از هر دو روش نشان دادند که مدل رگرسیون خطی در مقیاس میانگین ماهانه عملکرد بهتری در واسنجی نتایج حاصل از هارگریوز - سامانی دارند. چرا که داده‌های روزانه تحت تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت (مثل ابرناکی روزانه، خطاهای اندازه‌گیری، میکروکلیم‌های محلی) قرار دارند و میانگین‌گیری ماهانه این اختلال را کاهش می‌دهد و رابطه ذاتی بین دما و تبخیر و تعرق پتانسیل را شفاف‌تر می‌سازد. از طرفی از آنجایی که ساختار ذاتی رابطه هارگریوز - سامانی تقریباً خطی است، برازش مدل درجه دوم اضافه کردن پیچیدگی غیرضروری است و در برخی زون‌ها مثل عرض پایین - ارتفاع پایین حتی باعث کاهش R^2 و افزایش RMSE می‌شود. با توجه به جدول ۵ ضرایب اصلاحی برای هر زون کوچک‌تر از 0.023° هستند و این یعنی برای ایران، ضریب جهانی 0.023° مقدار تبخیر و تعرق را بیش‌تر برآورد می‌کند که کاملاً با ادبیات موجود (به‌ویژه برای مناطق خشک) همخوانی دارد. بر اساس جدول یاد شده، نتایج در عرض‌های جغرافیایی پایین، به‌ویژه در نواحی ارتفاعی متوسط و کم، تطابق بیشتری با ضریب اصلاحی اصلی دارند. در بین شش ناحیه جغرافیایی، بیشترین تطابق با $(k_{rs} = 0.019^\circ)$ بین مقادیر تبخیر و تعرق فیزیکی پنمن - مونتیث و روش ساده شده هارگریوز - سامانی در نواحی کم‌ارتفاع با عرض جغرافیایی پایین دیده می‌شود؛ درحالی‌که کمترین تطابق با $(k_{rs} = 0.014^\circ)$ در نواحی با عرض بالا - ارتفاع بالا برآورد شده است. شکل ۵ نمودار پراکندگی تبخیر و تعرق مرجع پنمن -

مونیت در مقابل تخمین‌های اصلی تبخیر و تعرق هارگریوز - سامانی در شش منطقه اقلیمی - ارتفاعی را نشان می‌دهد و شکل ۶ نمودار پراکندگی تبخیر و تعرق مرجع پنمن - مونیت در مقابل تخمین‌های کالیبره شده تبخیر و تعرق هارگریوز - سامانی در شش منطقه اقلیمی - ارتفاعی را نشان می‌دهد که با استفاده از رویکرد خطی ماهانه اصلاح گردیده است.



شکل ۵. نمودارهای پراکندگی ET_0 مرجع پنمن - مونیت در مقابل تخمین‌های اصلی ET_0 هارگریوز - سامانی در شش منطقه اقلیمی - ارتفاعی (داده‌های ماهانه ۱۹۹۵-۲۰۱۴)

Fig 5. Scatter plots of Penman-Monteith reference ET_0 against original Hargreaves-Samani ET_0 estimates across six climatic-altitudinal zones (monthly data, 1995-2014)



شکل ۶. نمودارهای پراکندگی ET_0 مرجع پنمن - مونتیث در مقابل تخمین‌های کالیبره شده ET_0 هارگریوز - سامانی با استفاده از رویکرد خطی ماهانه در شش منطقه اقلیمی - ارتفاعی (داده‌های ماهانه ۱۹۹۵-۲۰۱۴). ضرایب کالیبراسیون و معیارهای عملکرد (R^2 ، RMSE) برای هر زون اقلیمی - ارتفاعی

Fig. 6. Scatter plots of Penman–Monteith reference ET_0 against calibrated Hargreaves–Samani ET_0 estimates using the monthly linear approach across six climatic–altitudinal zones (monthly data, 1995–2014), including calibration coefficients and performance metrics (R^2 , RMSE) for each zone

جدول ۵. مقایسه چهار روش واسنجی مدل هارگریوز - سامانی برای زون‌های اقلیمی ایران و ضرایب اصلاح شده برای هر زون، نتایج نشان می‌دهد که در عرض‌های جغرافیایی پایین، به‌ویژه در نواحی ارتفاعی متوسط و کم، دقت برآورد تبخیر و تعرق بدون اصلاح ضریب مربوطه بیشتر است.

Table 5. Comparison of four calibration methods for the Hargreaves–Samani model across climatic zones of Iran and the modified coefficients for each zone. The results show that in low latitudes, especially in medium and low elevation areas, the accuracy of evapotranspiration estimation is higher without applying the respective correction coefficient.

Climatic–Altitudinal Zone	Calibration Method	R^2	RMSE	Correction Coefficient
High Latitude – High Elevation	Linear Regression (Daily)	0.75	1.228	0.0014
	Linear Regression (Monthly)	0.922	0.581	
	Quadratic Equation (Daily)	0.675	1.578	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.847	0.937	
High Latitude – Medium Elevation	Linear Regression (Daily)	0.788	1.373	0.0017
	Linear Regression (Monthly)	0.919	0.759	
	Quadratic Equation (Daily)	0.726	1.650	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.839	1.149	
High Latitude – Low Elevation	Linear Regression (Daily)	0.658	1.883	0.0015
	Linear Regression (Monthly)	0.861	0.769	
	Quadratic Equation (Daily)	0.723	1.878	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.828	1.057	
Low Latitude – High Elevation	Linear Regression (Daily)	0.742	1.300	0.0016
	Linear Regression (Monthly)	0.918	0.643	
	Quadratic Equation (Daily)	0.695	1.485	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.843	0.953	
Low Latitude – Medium Elevation	Linear Regression (Daily)	0.700	1.669	0.0017
	Linear Regression (Monthly)	0.896	0.873	
	Quadratic Equation (Daily)	0.638	1.904	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.798	1.272	
Low Latitude – Low Elevation	Linear Regression (Daily)	0.590	2.150	0.0019
	Linear Regression (Monthly)	0.847	0.984	
	Quadratic Equation (Daily)	0.485	2.810	
	Quadratic Equation (Monthly)	0.728	1.636	

با لحاظ ضرایب کالیبراسیون جدید بر اساس نتایج جدول ۵، پیش‌نگری تغییرات در مقادیر تبخیر - تعرق سالانه نسبت به دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۰) تحت

سه سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، میانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) در ادامه (جدول ۶ و شکل‌های ۷ تا ۱۰) آورده شده است که شاخص حساسیت و میزان تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل را برای سه دوره آینده (نزدیک، وسط، دور) تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 را نشان می‌دهند. با توجه به شکل شماره ۱۰، تحلیل ماهانه تبخیر و تعرق پتانسیل نشان می‌دهد که در تمام سناریوها، الگوی فصلی ET_0 (پیک در تابستان، کمینه در زمستان) حفظ می‌شود، اما مقادیر مطلق در تمام ماه‌ها افزایش می‌یابد. این نشان‌دهنده تغییر اقلیم یکنواخت در تمام فصول است. نتایج نشان می‌دهد که تحت سناریوی SSP585، میزان تبخیر و تعرق در ماه‌های تابستان (تیر و مرداد) از حدود ۷/۷ و ۷ میلی‌متر در ماه در دوره پایه به بیش از ۱۵/۵ و ۱۴ میلی‌متر در ماه در آینده دور افزایش می‌یابد (افزایش تقریبی ۱۰۰ درصد). حتی در سناریوی کم‌خطر (SSP126)، افزایش‌های قابل توجهی (تا ۸۶٪ در فروردین) مشاهده می‌شود. در ماه‌های زمستان، نرخ افزایش نسبی بالاتر است که نشان‌دهنده تشدید خشکسالی‌های فصلی و کاهش رطوبت خاک در فصول سرد است.

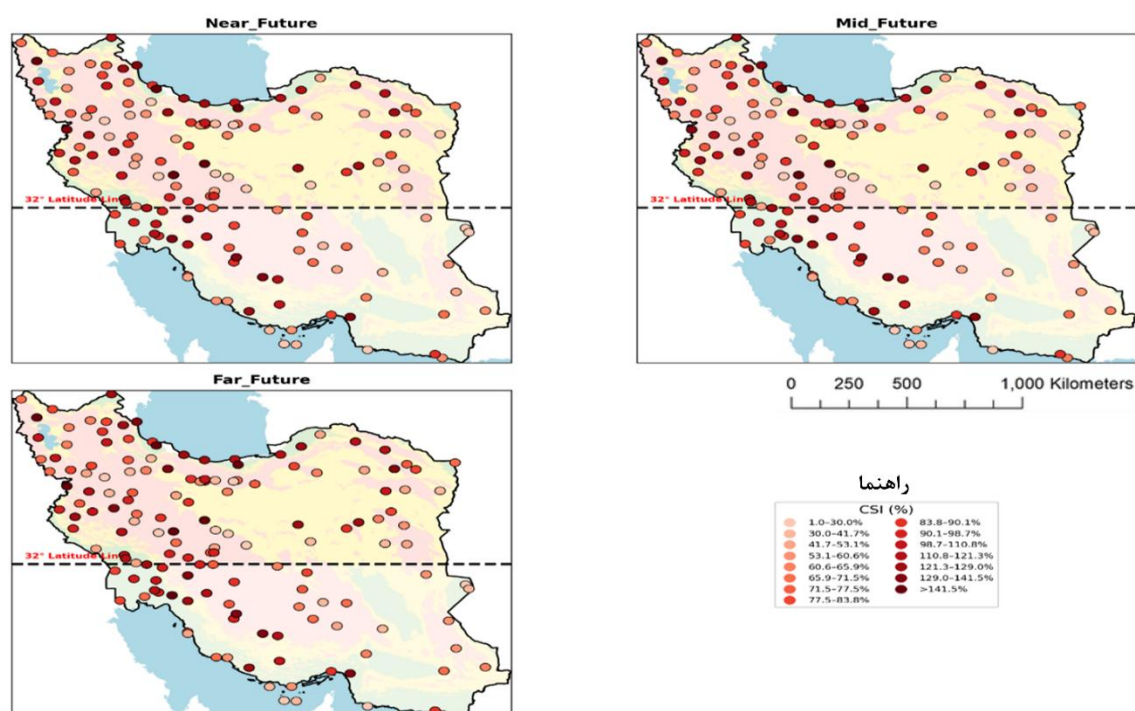
تحلیل تغییرات تبخیر - تعرق پتانسیل در شش ناحیه اقلیمی - ارتفاعی ایران، تصویر هشداردهنده‌ای از افزایش سیستماتیک و گسترده این پارامتر در سراسر کشور تحت تأثیر تغییر اقلیم ترسیم می‌کند. این یافته با روندهای جهانی گزارش شده توسط IPCC (۲۰۲۱) و همچنین مطالعه Liu et al (۲۰۲۰) که نشان دادند ET_0 در اکثر نقاط جهان تحت سناریوهای CMIP6 افزایش می‌یابد، همخوانی کامل دارد. همچنین مطالعه Nouri and Veysi (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های CMIP6 در ایران، افزایش در میانگین ET_0 را پیش‌بینی کرده بود. یافته‌ها حاکی از آن است که تمامی مناطق ایران در همه دوره‌های آینده (نزدیک، میانه و دور) و تحت تمامی سناریوهای انتشار (SSP126، SSP245 و SSP585) با افزایش تبخیر - تعرق مواجه خواهند شد. با این حال، میزان این افزایش به شدت به شدت سناریوی انتشار، موقعیت جغرافیایی و ارتفاع وابسته است. به طور مشخص، تحت سناریوی بدبینانه، مقادیر افزایش به اوج خود می‌رسند؛ برای نمونه، در ناحیه عرض بالا - ارتفاع کم (عمدتاً شامل بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی و خشک کشور)، افزایش تبخیر - تعرق در دوره آینده دور به ۱۲۸ درصد نسبت به دوره پایه می‌رسد که بیانگر بیش از دو برابر شدن تقاضای تبخیر - تعرق است. همچنین، نواحی کم‌ارتفاع، به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی بالاتر، بیشترین حساسیت را دارند. ناحیه عرض بالا - ارتفاع کم به‌عنوان کانون اصلی بیشترین افزایش تبخیر تعرق شناسایی شد و پس از آن ناحیه عرض بالا - ارتفاع متوسط می‌باشد. در مقابل، مناطق مرتفع‌تر در هر دو ناحیه عرضی، کمترین افزایش را خواهند داشت؛ به‌طوری‌که ناحیه عرض بالا - ارتفاع بالا (مناطق کوهستانی) با کمترین میزان افزایش (بین ۵۷ تا ۸۵ درصد) مواجه است. این الگوی کاهش حساسیت با افزایش ارتفاع، با یافته‌های Goudarzi et al (۲۰۱۸) در حوضه دریاچه ارومیه و همچنین مطالعه (Soltani 2024 et al) که کاهش ET_0 را در ارتفاعات زاگرس گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد.

جدول ۶. تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل در ۶ زون ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده نسبت به دوره پایه که نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق در تمام سناریوها است.

Table 6. Changes in potential evapotranspiration in six climatic zones of Iran under future climate scenarios compared to the base period, showing an increase in evapotranspiration across all scenarios.

Climatic- Altitudinal Zone	Near Future (%)			Mid Future (%)			Far Future (%)		
	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585	SSP126	SSP245	SSP585
High Latitude – High Elevation	85	95	16	60	64	27	62	70	85
High Latitude – Medium Elevation	80	81	83	83	86	94	84	92	107
High Latitude – Low Elevation	88	89	90	91	95	104	92	102	128
Low Latitude – High Elevation	74	75	76	76	79	84	77	83	95
Low Latitude – Medium Elevation	75	76	77	73	75	82	78	82	87
Low Latitude – Low Elevation	71	71	73	72	80	79	73	78	93

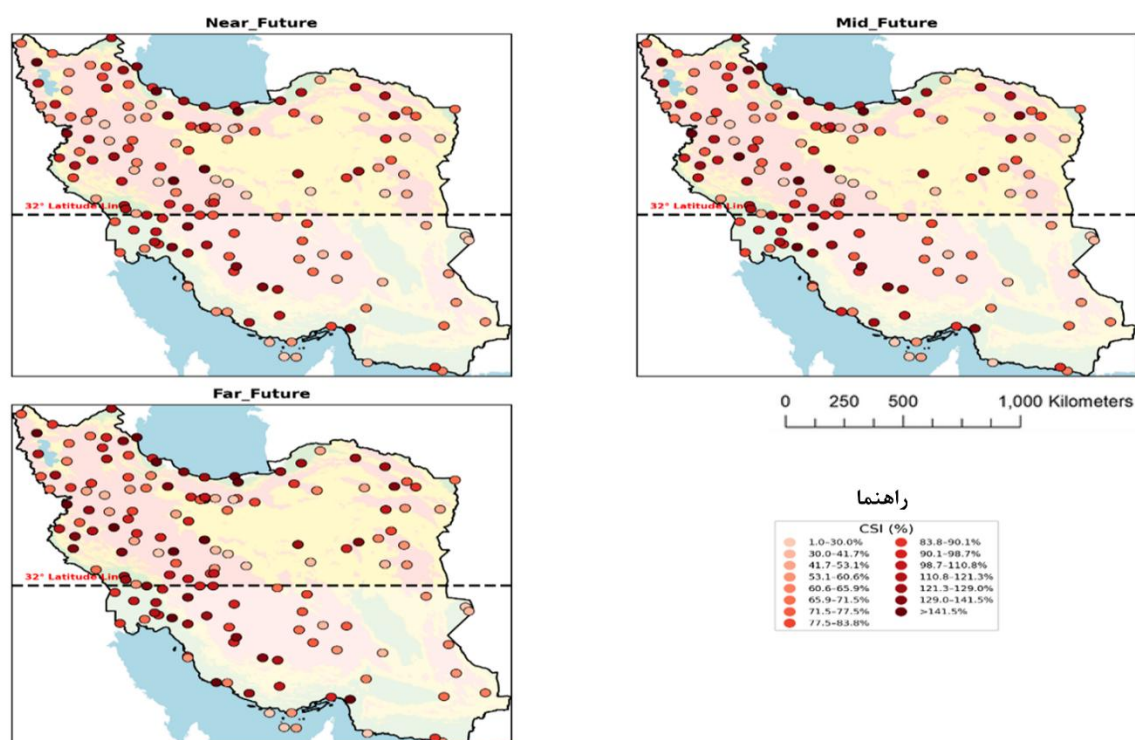
Climate Sensitivity Index (CSI) - SSP126



شکل ۷. شاخص حساسیت اقلیمی برای سناریوی SSP126 در سه دوره آینده (نزدیک، میانی و دور) برای ایران که نشان می‌دهد کمترین مقدار شاخص حساسیت اقلیمی در بین سناریوها مربوط به سناریوی SSP126 است.

Fig 7. Climate Sensitivity Index under the SSP1-2.6 scenario across three future periods (Near, Mid, and Far) for Iran, indicating that the SSP1-2.6 scenario exhibits the lowest Climate Sensitivity Index among all scenarios.

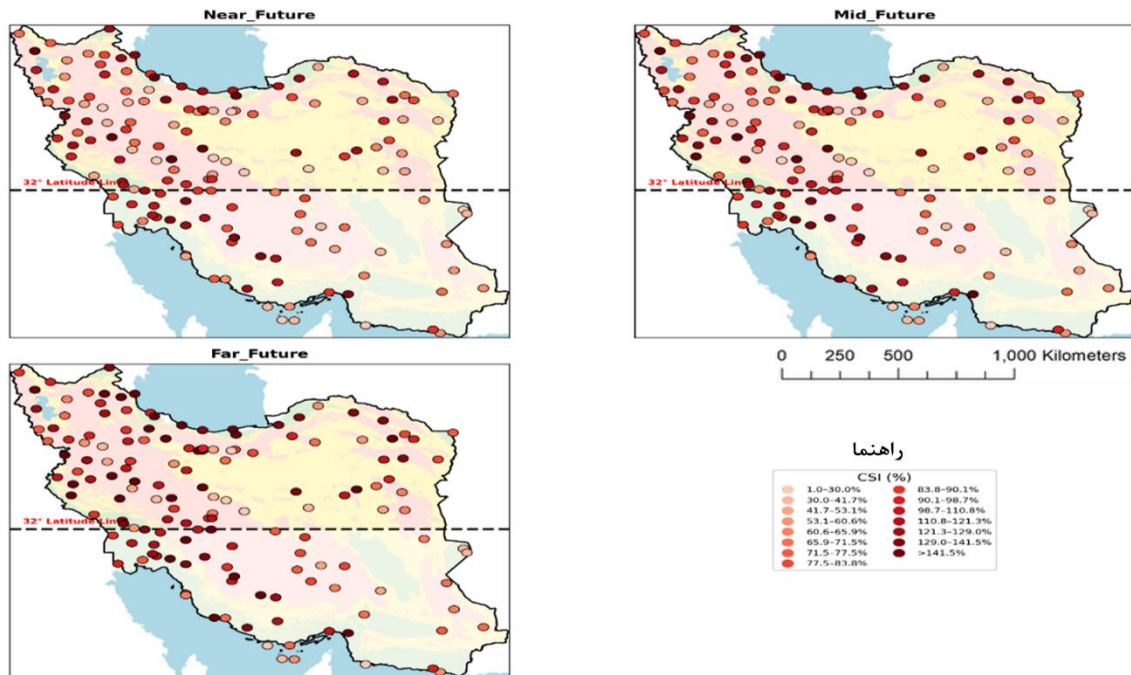
Climate Sensitivity Index (CSI) - SSP245



شکل ۸. شاخص حساسیت اقلیمی برای سناریوی SSP245 در سه دوره آینده (نزدیک، میانی و دور) برای ایران

Fig 8. Climate Sensitivity Index under the SSP2-4.5 scenario across three future periods (Near, Mid, and Far) for Iran

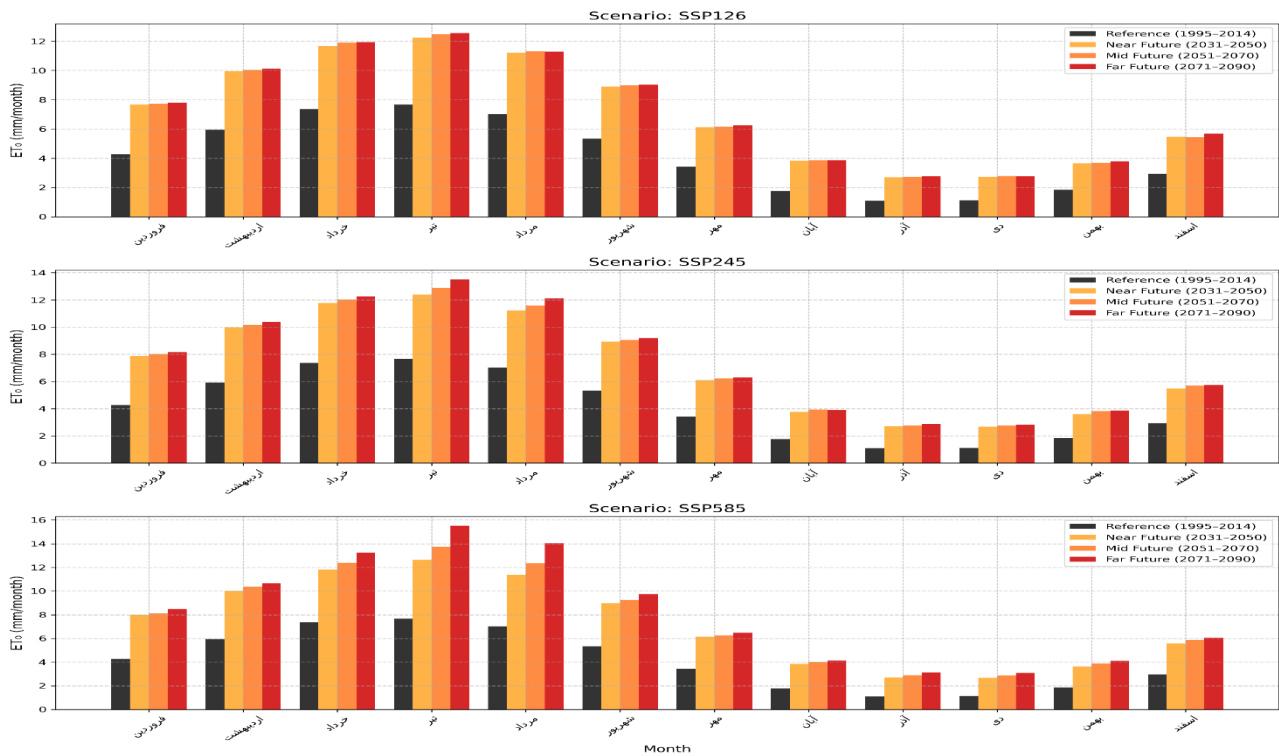
Climate Sensitivity Index (CSI) - SSP585



شکل ۹. شاخص حساسیت اقلیمی برای سناریوی SSP585 در سه دوره آینده (نزدیک، میانی و دور) برای ایران که نشان می‌دهد سناریوی SSP585 بیشترین افزایش در شاخص حساسیت اقلیمی را دارد.

Fig 9. Climate Sensitivity Index under the SSP5-8.5 scenario across three future periods (Near, Mid, and Far) for Iran, indicating that the SSP5-8.5 scenario exhibits the greatest increase in the Climate Sensitivity Index.

Monthly Mean ET_0 : Baseline vs. Future Scenarios (National Average)



شکل ۱۰. تغییرات ماهانه میزان تبخیر و تعرق پتانسیل در سناریوهای اقلیمی آینده نسبت به دوره پایه که نشان‌دهنده افزایش تبخیر و تعرق در سناریوهای اقلیمی آینده است.

Fig 10. Monthly changes in potential evapotranspiration under future climate scenarios compared to the base period, showing increased evapotranspiration in future scenarios

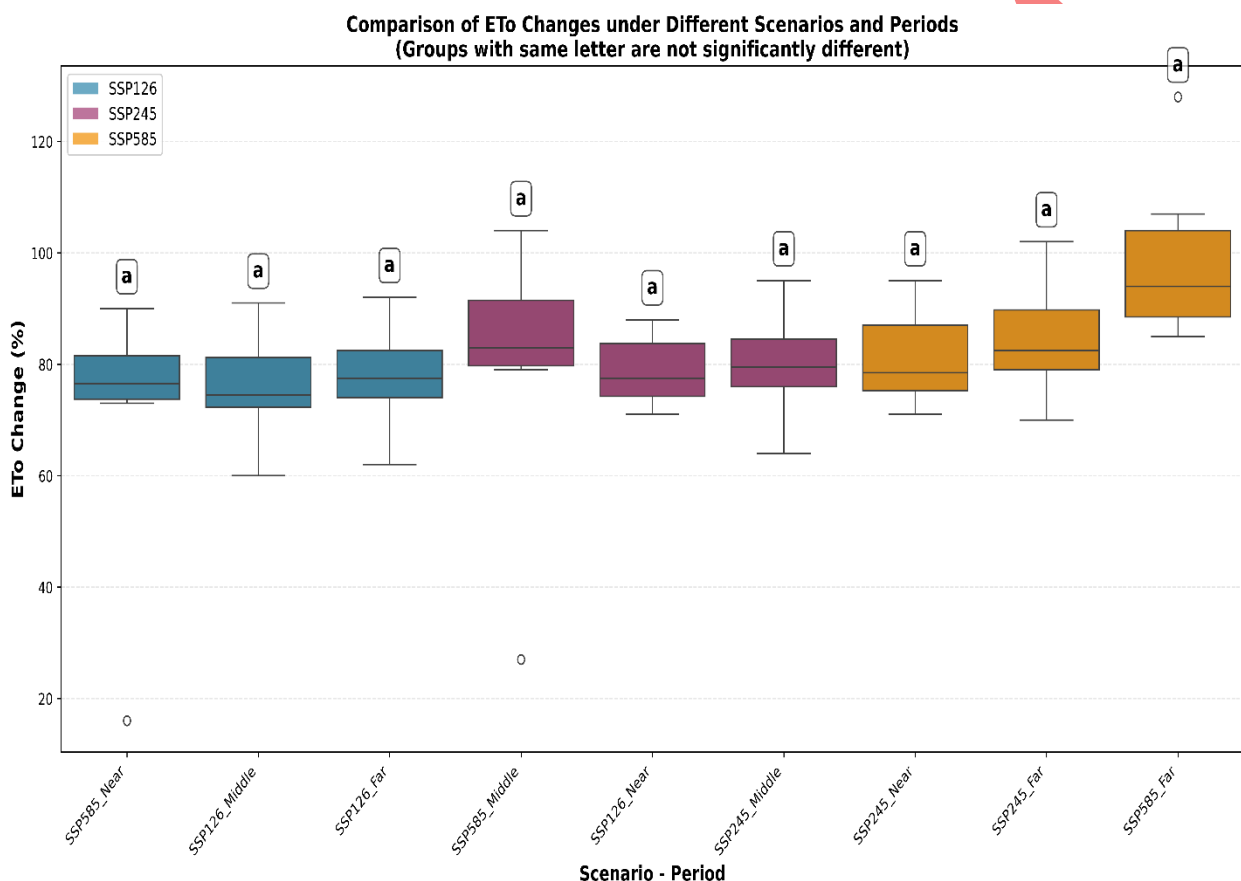
برای ارزیابی اثربخشی زون‌بندی پیشنهادی (بر اساس عرض جغرافیایی و ارتفاع)، از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) استفاده شد. نتایج نشان داد که میانگین شاخص حساسیت اقلیمی (CSI) در بین شش زون اقلیمی - ارتفاعی تفاوتی آماری معنادار دارد ($p < 0.05$). این یافته تأیید می‌کند که طبقه‌بندی پیشنهادی توانسته است الگوی مکانی حساسیت اقلیمی را به خوبی تفکیک کند.

به منظور ارزیابی الگوی فضایی حساسیت اقلیمی، با توجه به جدول ۶ و اشکال ۷ و ۸ و ۹ در هر سه سناریو، الگوی مکانی شاخص CSI گرادانی مشخصی را از شمال و ارتفاعات به سمت جنوب و نواحی پست نشان می‌دهد. به طور مشخص، زون‌های عرض بالا - ارتفاع بالا شامل مناطق کوهستانی شمال غرب، شمال و شرق کشور کمترین مقادیر شاخص CSI را دارند و بیانگر پایداری اقلیمی بالاتر هستند. در مقابل، زون‌های عرض بالا - ارتفاع کم در حاشیه‌ی جنوبی دریای خزر و نیز زون‌های عرض پایین - ارتفاع کم در جنوب و جنوب غرب (خوزستان، بوشهر و هرمزگان) بیشترین حساسیت اقلیمی را نشان می‌دهند. این الگوی فضایی با نتایج مطالعات پیشین در ایران که نشان داده‌اند مناطق خشک مرکزی و جنوبی بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر تغییر اقلیم دارند، مطابقت دارد (Raziei and Pereira, 2013; Tabari et al., 2012). همچنین مطالعه Soltani et al. (2024) نیز افزایش ET_o در سواحل خزر، شمال شرق، غرب و مناطق داخلی ایران در بهار و تابستان را گزارش کرده که با یافته‌های ما در مورد حساسیت بالای زون عرض بالا - ارتفاع کم (شامل بخش‌هایی از این مناطق) همسو است. نتایج نشان می‌دهد که مناطق سرد و خشک کم‌ارتفاع، به‌ویژه در شمال و شمال شرق ایران، به‌شدت مستعد تشدید تبخیر - تعرق در شرایط گرم‌تر آینده هستند. دلیل این افزایش را می‌توان این‌گونه عنوان کرد که افزایش دما در این مناطق، نه تنها توان تبخیری جو را افزایش می‌دهد، بلکه به دلیل کاهش رطوبت نسبی و افزایش تابش خورشیدی مؤثر، این اثر را تشدید می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که الگوی تغییرات ET_o در ایران، نه تنها تابع دمای مطلق است؛ بلکه تحت کنترل ترکیبی از دما، رطوبت و ارتفاع است.

روند زمانی در سه دوره آینده، از دوره‌ی نزدیک تا دور، نشان‌دهنده‌ی افزایش تدریجی شدت حساسیت اقلیمی است، به‌ویژه در سناریوی SSP245 در دوره‌ی دور که بیشترین مقدار CSI در عرض‌های پایین و کم‌ارتفاع دیده می‌شود. بر اساس جدول ۶، این تفاوت عددی نیز قابل مشاهده است: کمترین میانگین تغییرات متعلق به زون عرض بالا - ارتفاع بالا (حدود ۶۵-۷۲٪) و بیشترین مربوط به زون عرض بالا - ارتفاع کم (تا بیش از ۱۲۰٪ در SSP585 دوره‌ی دور) است. تفاوت چشمگیر بین سناریوهای SSP126 (کم‌گسیل) و SSP585 (پرگسیل) نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری‌های اقلیمی ملی می‌توانند تأثیر مستقیمی بر شدت بحران آب در آینده داشته باشند. به‌عنوان مثال، در زون عرض بالا - ارتفاع کم، تفاوت افزایش ET_o بین دو سناریوی SSP126 و SSP585 در آینده دور به بیش از ۳۵ درصد می‌رسد. این اختلاف معادل میلیاردها مترمکعب آب اضافی در تقاضای آب کشاورزی و سایر بخش‌ها است و این لزوم در نظر گرفتن بدترین سناریوی پیش و رو را برای برنامه‌ریزی‌های مدیریت منابع آبی ایران را برجسته می‌نماید.

نمودار میله‌ای ارائه شده (شکل ۱۰)، میانگین ماهانه تبخیر - تعرق پتانسیل را برای دوره پایه و سه دوره آینده در سطح کل کشور نشان می‌دهد. این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که ET_o در تمامی ماه‌های سال تحت تأثیر گرمایش اقلیمی قرار گرفته و روندی صعودی دارد. در تمامی سناریوها، بیشترین میزان تبخیر و تعرق و تغییرات آن در ماه‌های تابستان مشاهده می‌شود؛ به‌طوری‌که ET_o در تیر از ۷/۷ میلی‌متر در ماه در دوره پایه به ۱۵.۵ میلی‌متر در ماه در آینده دور می‌رسد (افزایش بالای ۱۰۰٪)، درحالی‌که در ماه‌های زمستان مانند آذر، افزایش نسبی حتی بالاتر است و از ۱/۱ به ۳/۱ میلی‌متر در ماه می‌رسد (افزایش ۱۸۲٪). که نشان‌دهنده کاهش رطوبت خاک و تشدید خشکسالی‌های فصلی در فصول سرد خواهد بود. این الگو (افزایش نسبی بیشتر در زمستان) با نتایج Soltani et al. (2024) و همچنین مطالعه Nouri and Veysi (2024) که بیشترین افزایش ET_o را در زمستان پیش‌بینی کرده‌اند، همخوانی دارد. این یافته از نظر مدیریت منابع آب حائز اهمیت است. زیرا افزایش ET_o در زمستان می‌تواند منجر به کاهش تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی و تشدید کمبود آب در فصل بهار شود. همچنین افزایش در فصول گرم، فشار بیشتری بر منابع آب وارد می‌کند چرا که تقاضای آب کشاورزی در این فصول به طور طبیعی بالاتر است. این یافته‌ها هشدار جدی درباره افزایش تقاضای آب کشاورزی و تداوم خشکسالی‌های هواشناسی در آینده ایران ارائه می‌دهند؛ بنابراین، برنامه‌ریزی‌های آبی در بخش‌های آب، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی حتماً باید این روند صعودی را در محاسبات خود لحاظ کنند تا سیستم‌های آبی بتوانند در شرایط اقلیمی جدید پایداری خود را حفظ نمایند. به‌منظور بررسی معنی‌داری آماری تفاوت

تغییرات ETo بین سناریوها و دوره‌های مختلف، آزمون ANOVA یک‌طرفه و به دنبال آن آزمون تعقیبی توکی (Tukey's HSD) انجام شد. نتایج نشان داد که تنها یک مقایسه زوجی در سطح ۰.۰۵ معنی‌دار است و SSP585 آینده دور در برابر SSP585 آینده نزدیک یا اختلاف میانگین ۳۰- درصد معنی‌دار است، ($p=0.0479$). سایر ۳۵ مقایسه زوجی معنی‌دار نبودند ($p>0.05$). همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، اگرچه میانگین تغییرات ETo از ۶۹/۲٪ SSP585 آینده نزدیک تا ۹۹/۲٪ در SSP585 آینده دور متغیر است، اما اکثر تفاوت‌ها بین سناریوها و دوره‌ها از نظر آماری معنی‌دار نیستند. نمایش حروف (حرف مشترک 'a' برای همه گروه‌ها) تأیید می‌کند که تغییرات مشاهده‌شده از نظر آماری معنی‌دار نیستند، به‌جز افزایش معنی‌دار تحت سناریوی SSP585 از دوره نزدیک به دور. این یافته نشان می‌دهد که اگرچه سناریوی SSP585 منجر به مقادیر بالاتر ETo در بلندمدت می‌شود، اما تفاوت بین اکثر سناریوها و دوره‌ها به اندازه کافی قوی نیست که از نظر آماری قابل تشخیص باشند.



شکل ۱۱. مقایسه نمودار جعبه‌ای تغییرات تبخیر و تعرق پتانسیل (ETo) بر حسب درصد، تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 در دوره‌های نزدیک، میانی و دور (گروه‌های دارای حروف مشترک (a) در سطح ۰/۰۵ بر اساس آزمون تعقیبی توکی تفاوت معنی‌داری ندارند).

Fig 11. Boxplot comparison of percentage changes in potential evapotranspiration (ETo) under SSP126, SSP245, and SSP585 Scenarios for near, mid, and far future periods (Groups with common letters (a) are not significantly different at the 0.05 level according to Tukey's post-hoc test)

نتیجه‌گیری

این مطالعه با واسنجی منطقه‌ای روش هارگریوز - سامانی در دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) و پیش‌نگری تغییرات تبخیر - تعرق پتانسیل در ایران تحت سناریوهای تغییر اقلیم آینده (۲۰۳۱-۲۰۹۰)، چشم‌انداز آینده تبخیر و تعرق کشور در نواحی ارتفاعی و عرض جغرافیایی مختلف کشور را نشان می‌دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که ایران در دهه‌های آینده با افزایش چشمگیر ETo در تمامی مناطق مواجه خواهد بود، به‌عنوان مثال در سناریوی SSP585، افزایش بیش از ۱۲۸٪ در تبخیر - تعرق پتانسیل تنها یک عدد نیست، بلکه بیانگر تغییر اساسی در تعادل انرژی سطحی و پاسخ گیاه به گرماست؛ بدین معنا که حتی سامانه‌های

آبیاری کارآمد فعلی نیز در چنین شرایطی کارایی خود را از دست خواهند داد و نیاز به بازطراحی اساسی دارند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که مناطق کم‌ارتفاع و خشک مرکزی ایران (ناحیه عرض بالا - ارتفاع کم) بیشترین حساسیت را به تغییرات تبخیر و تعرق خواهند داشت. در مقابل، مناطق مرتفع‌تر افزایش کمتری را تجربه خواهند کرد. تفاوت به نسبت زیادی بین سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در پیش‌نگری تبخیر و تعرق وجود دارد که ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای کاهش شدت افزایش تبخیر تعرق را نشان می‌دهد.

این مطالعه نشان می‌دهد که در آینده ایران، خشکی نه تنها ناشی از کاهش بارش بوده؛ بلکه حتی در شرایطی که بارش ثابت بماند، به دلیل افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل خواهد بود. از این رو منابع آب ایران در آینده علاوه بر کاهش بارندگی‌ها با افزایش میزان تبخیر و تعرق پتانسیل با فشار بی‌سابقه‌ای مواجه خواهند شد. به‌ویژه، ماه‌های گرم و خشک (از خرداد تا شهریور) بیشترین حساسیت را دارند چرا که بیشترین نیاز آبی مربوط به این ماه‌ها می‌باشد. این یافته‌ها چندین هشدار کلیدی را برای برنامه‌ریزان منابع آب ارائه می‌دهد:

- بازنگری در الگوی کشت: الگوهای کشت فعلی که بر اساس ET_0 دوره پایه طراحی شده‌اند، در دهه‌های آینده منجر به مصرف بیش از حد منابع آب خواهند شد. در نتیجه انتقال به محصولات کم‌مصرف آب ضروری است.

- اولویت‌بندی منطقه‌ای: سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم باید منطقه‌محور باشند. در اولویت اول، استان‌های یزد، اصفهان، سمنان و خراسان جنوبی (زون عرض بالا - ارتفاع کم) باید به‌صورت ناحیه‌محور تحت اصلاح الگوی کشت، به‌کارگیری سیستم‌های نوین آبیاری و بیمه خسارت وابسته به خشکسالی قرار گیرند و در ادامه باید مناطق با حساسیت کمتر جهت اصلاح الگوهای کشت و سیستم‌های آبیاری مورد توجه قرار گیرند.

- اهمیت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای: از منظر سیاست اقلیمی، در صورت تداوم مسیر گسیل بالای گازهای گلخانه‌ای و با توجه به نتایج حاصل از مطالعه، بخش‌های وسیعی از دشت‌های مرکزی ایران با افت محسوس توان آبیاری و کاهش بهره‌وری منابع سطحی و زیرزمینی مواجه خواهند شد؛ به‌گونه‌ای که توازن انرژی سطحی و الگوی تبخیر و تعرق به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. در مقابل، مسیر کم‌گسیل SSP126 می‌تواند با کاهش شدت روند افزایشی ET_0 ، ثبات نسبی سامانه‌های آبیاری را حفظ کرده و فشار آبی آینده را کاهش دهد.

در نهایت، این مطالعه تأکید می‌کند که مدیریت آب در ایران دیگر نمی‌تواند بر پایه داده‌های تاریخی دوره پایه استوار باشد. بلکه پیش‌بینی‌های آینده تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس مدل‌های کالیبره شده منطقه‌ای باید به‌عنوان پایه اصلی برنامه‌ریزی‌های کلان آبی مورد استفاده قرار گیرد و این بیانگر این موضوع است که این فاکتور باید به‌صورت خیلی جدی در محاسبات و برنامه‌ریزی‌های آتی بیلان آب و انرژی چرخه هیدرولوژی مورد توجه قرار بگیرد.

محدودیت‌ها: باید توجه داشت که نتایج این مطالعه به دقت واسنجی دوره‌ی پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) وابسته است و فرض می‌کند رابطه‌ی کالیبره‌شده روش هارگریوز - سامانی در آینده معتبر می‌ماند؛ درحالی‌که تغییرات احتمالی در رطوبت نسبی، باد و تابش آفتاب ممکن است این رابطه را تعدیل کند. همچنین، استفاده از تعداد محدود مدل‌های اقلیمی و عدم قطعیت در داده‌های مشاهداتی ممکن است موجب برآورد بالاتر از مقدار واقعی افزایش (مثلاً عدد ۱۲۸٪) شود. از این رو، نتایج باید در چارچوب سناریوهای دیگر و مدل‌های انرژی - رطوبت مانند Penman-Monteith نیز راستی‌آزمایی شود. علاوه بر این پیشنهاد می‌گردد نتایج تبخیر و تعرق پتانسیل به دست آمده در دوره پایه با داده‌های لایسیمتری موجود ایستگاه‌ها واسنجی شود.

در مجموع، این مطالعه نشان می‌دهد مدیریت منابع آب کشور باید بر پایه پیش‌بینی‌های آینده‌نگر تبخیر و تعرق بازسازی شود؛ در غیر این صورت، فشار اقلیمی ناشی از تبخیر و تعرق می‌تواند از کاهش بارش پیشی بگیرد و امنیت غذایی ایران را به چالش جدی روبرو نماید.

منابع

- Abbasi, F., Bazgeer, S., Kalehbasti, P.R. et al. New climatic zones in Iran: a comparative study of different empirical methods and clustering techniques. *Theor Appl Climatol* 147, 47-61 (2022). <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03785-9>
- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Almorox, J., & Grieser, J. (2016). Calibration of the Hargreaves-Samani method for the calculation of reference evapotranspiration in different Köppen climate classes. *Hydrology Research*, 47 (2), 521-531. <https://doi.org/10.2166/nh.2015.091>
- Araghi, A., Adamowski, J., & Martinez, C. J. (2020). Comparison of wavelet-based hybrid models for the estimation of daily reference evapotranspiration in different climates. *Journal of Water and Climate Change*, 11(1), 39-53. <https://doi.org/10.2166/wcc.2018.113>
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28 (17), 6938-6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754>
- Domrões, M., & Kaviani, M. R. (1993). Climatic classification of Iran. *Geographische Rundschau*, 45(6), 348-354
- Fazeli, A., Salahi, B., & Goudarzi, M. (2020). Evaluation of climate change impacts on potential evapotranspiration variations in Moghan Plain using RCP scenarios. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 12(4), 977-993. <https://doi.org/10.22092/jjwmse.2019.126245.1649>
- Ferreira, A., Cameira, M. d. R., & Rolim, J. (2024). Methodology for obtaining ETo data for climate change studies: Quality analysis and calibration of the Hargreaves-Samani equation. *Climate*, 12(12), 205. <https://doi.org/10.3390/cli12120205>
- Galván-Cano, O., Bolaños-González, M. A., Prado-Hernández, J. V., Exebio-García, A. A., López-Pérez, A., & Colín-García, G. (2025). Impact of Climate Change on Reference Evapotranspiration: Bias Assessment and Climate Models in a Semi-Arid Agricultural Zone. *Water*, 17(21), 3040. <https://doi.org/10.3390/w17213040>
- Ganjei, S., Shiri, J., & Karimi, S. (2026). Evaluating climate change impacts on reference evapotranspiration using CMIP6 projections and machine learning in the Aras River Basin. *Modeling Earth Systems and Environment*, 12(3), Article 2651. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02651-1>
- Gohari, A., Eslamian, S., Abedi-Koupaei, J., Massah Bavani, A., Wang, D., & Madani, K. (2013). Climate change impacts on crop production in Iran's Zayandeh-Rud River Basin. *Science of the Total Environment*, 442, 405-419. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.10.029>
- Goudarzi, M., Salahi, B., & Hosseini, S. A. (2018). Estimation of evapotranspiration rate due to climate change in the Urmia Lake Basin. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 12 (41), 1–12. <http://jjwmsei.ir/article-1-514-en.html> [In Persian]
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White, Eds. Cambridge University Press.
- IPCC, 2021: Climate Change (2021). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Islamic Republic of Iran Meteorological Organization. (n.d.). *Iran Meteorological Data Service*. Retrieved September 30, 2026, from <https://data.irimo.ir>
- Landeras, G., Ortiz-Barredo, A., & López, J. J. (2008). Comparison of artificial neural network models and empirical and semi-empirical equations for daily reference evapotranspiration estimation in the Basque Country (Northern Spain). *Agricultural Water Management*, 95(5), 553-565. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.12.011>
- LIU, X., LI, C., ZHAO, T., & HAN, L. (2020). Future changes of global potential evapotranspiration simulated from CMIP5 to CMIP6 models. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13(6), 568-575. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1824983>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 4(4), 315-328. <https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations - a critical review. *Current Climate Change Reports*, 2 (4), 211-220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>

- Monteiro, A. F. M., Torres, R. R., Martins, F. B., Marrafon, V. H. A., Abreu, M. C., & Mattos, E. V. (2024). Climate change impacts on evapotranspiration in Brazil: A multi-model assessment. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(6), 5363-5373. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04942-6>
- Musa, A. A., & Elagib, N. A. (2025). Extra dimensions to the calibration of the Hargreaves-Samani equation under a data-scarce environment. *Water Resources Management*, 39, 4277-4294. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04151-4>
- Nóia Júnior, R., Fraisse, C., Cerbaro, V. A., Karrei, M., & Guindin, N. (2019). Evaluation of the Hargreaves-Samani method for estimating reference evapotranspiration with ground and gridded weather data sources. *Applied Engineering in Agriculture*, 35(6), 823-835. <https://doi.org/10.13031/aea.13363>
- Nouri, M., & Veysi, S. (2024). CMIP6 multi-model ensemble projection of reference evapotranspiration using machine learning algorithms. *Agricultural Water Management*, 306, Article 109190. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109190>
- O'Brien, K., Eriksen, S., Schjolden, A., & Nygaard, L. (2004). What's in a word? *Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research* (CICERO Working Paper No. 2004:04). CICERO. <https://pub.cicero.oslo.no/cicero-xmlui/handle/11250/95686>
- Rahimzadeh, F., & Asgari, A. (2004). A look at difference of increase rates of minimum with maximum temperature and at decrease rates of Diurnal Temperature Range (DTR) in Iran. *Iranian Quarterly Geographical Research Journal*, 73, 153-171. [In Persian]
- Raziei, T., & Pereira, L. S. (2013). Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2012.12.019>
- Sharafi, S., & Mohammadi Ghaleni, M. (2021). Evaluation of multivariate linear regression for reference evapotranspiration modeling in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 143, 1409-1423. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03473-0>
- Soltani, K., Masoompour Samakosh, J., Mojarad, F., Hadi Pour, S., & Jalilian, A. (2024). Spatial changes of seasonal reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 models. *The Journal of Earth and Space Physics*, 49(4), 175-192. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.364373.1007556> [In Persian]
- Tabari, H., Aeini, A., Hosseinzadehtalaei, P., & Some'e, B. S. (2012). Spatial distribution and temporal variation of reference evapotranspiration in arid and semi-arid regions of Iran. *Hydrological Processes*, 26 (4), 500-512. <https://doi.org/10.1002/hyp.8146>
- Thiemeßl, M. J., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2011). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31 (10), 1530-1544. <https://doi.org/10.1002/joc.2168>
- Wu, Z., Cui, N., Xu, J., Cui, Y., Liang, J., & Qian, J. (2022). Prediction of reference crop evapotranspiration in Guangxi Basin by improved Hargreaves-Samani model. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 40(4), 404-410. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8530.20.0337>
- Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., Mofidi, A., & Mirzaei, E. (2011). The effect of the Zagros Mountains on the formation and maintenance of the Iran Anticyclone using RegCM4. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 112 (3-4), 91-100. <https://doi.org/10.1007/s00703-011-0134-z>