



Sensitivity Analysis of Several Potential Evapotranspiration Equations to Climatic Variables in the Basetime and Future Periods Using the Sobol Method

Mahdi Vaziri¹ | Nozar Ghahreman^{2✉}

1. Irrigation and Reclamation Engineering, University-college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran E-mail: vaziri.mahdi@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Irrigation and Reclamation Engineering, University-college of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: ngahreman@ut.ac.ir

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Nov. 29, 2025

Revised: Dec. 25, 2025

Accepted: Jan. 31, 2026

Published online: Feb. 2026

Keywords:

**Potential evapotranspiration,
Sobol,
PyET,
Climate change,
CMIP6**

ABSTRACT

Due to complexity of the evapotranspiration process and the interactive effects of climatic variables, conducting sensitivity analysis is essential for identifying the most influencing parameters and reducing uncertainties in ETp estimation models. Sensitivity analysis is particularly important under climate change conditions, as it provides insights into how ETp responds to variations in temperature, radiation, humidity, and wind speed. This study evaluates the sensitivity of (ETp) to mean, minimum, and maximum temperature, wind speed, net radiation, and relative humidity across eight selected stations in Iran during the baseline (2001–2024) and the future (2025–2100) period. The global Sobol sensitivity analysis method, based on variance decomposition, was applied to quantify both the individual and interaction effects of input parameters on model outputs. Baseline climate data were obtained from IRIMO and Future climatic data were obtained from the CNRM-ESM2-1 and INM-CM5-0 climate models under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios of CMIP6. ETp was calculated using three methods FAO-56 Penman–Monteith, Romanenko and Thom–Oliver using the PyET package. Results indicated that Tmax and RH are the most influential variables in most stations. In the future period, the influence of temperature-related variables increases, while the role of radiation and wind decreases, confirming global warming and the reduction in atmospheric humidity effects on ET. A shift from radiation-dominated to temperature-dominated control was observed in humid northern regions, whereas increased sensitivity to relative humidity and mean temperature was evident in central arid regions. These findings suggest that revising water management strategies as a result of altered energy–moisture balance is essential,

Cite this article Vaziri, M., Ghahreman, N., (2026) Sensitivity Analysis of Several Potential Evapotranspiration Equations to Climatic Variables in the Basetime and Future Periods Using the Sobol Method, *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 56 (12),3293-3313. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407261.670061>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407261.670061>



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Potential evapotranspiration (ET_p) represents a key component of the hydrological cycle and is a major determinant in water resource management, irrigation planning, and climate impact assessments. Accurate estimation of ET_p requires understanding its dependence on multiple meteorological variables such as air temperature, humidity, wind speed, and net radiation. However, these variables interact in complex and nonlinear ways, resulting in uncertainty in ET_p estimation, especially under changing climate conditions. Sensitivity analysis is therefore an essential tool to identify which input parameters exert the greatest influence on ET_p , allowing researchers to prioritize data accuracy and model calibration efforts. Among global sensitivity analysis methods, the Sobol variance-based approach is one of the most robust techniques, as it quantifies both the individual and interaction effects of input variables on model outputs (Sobol, 2001; Saltelli et al., 2010). This study aims to evaluate the sensitivity of several ET_p equations to key climatic parameters across Iran's diverse climatic zones using the Sobol method. Three empirical and physically based ETP models FAO-56 Penman–Monteith, Romanenko, and Thom–Oliver were applied to assess and compare parameter sensitivities during a historical baseline period (2001–2024) and a projected future period (2025–2100) under climate change scenarios derived from CMIP6 global climate models.

Method

Meteorological data for the baseline period, including mean, minimum, and maximum temperature, relative humidity, wind speed, and shortwave and longwave radiation components, were obtained from the NASA POWER database with a monthly temporal resolution. Future climate data (2025–2100) were extracted from two CMIP6 models CNRM-ESM2-1 and INM-CM5-0 under two shared socioeconomic pathways, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, from the Copernicus Climate Data Store. Eight representative meteorological stations were selected to capture the climatic diversity of Iran, including Sari, Tehran, Kermanshah, Tabriz, Mashhad, Kerman, Ahvaz, and Bandar Abbas. These stations represent a broad range of climatic conditions, from humid coastal zones in the north to arid and semi-arid environments in the central and southern regions.

The ET_p was computed using three different models available in the open-source Python package PyET (Vremec et al., 2024):

- 1- FAO-56 Penman–Monteith, a physically based method recommended by FAO for semi-arid regions;
- 2- Romanenko, an empirical temperature–humidity model suitable for data-scarce and dry environments;
- 3- Thom–Oliver, which emphasizes the role of net radiation and energy balance, making it suitable for humid and coastal areas.

Sensitivity indices were computed using the Sobol method implemented in the Python libraries SALib and NumPy. The Sobol first-order index (Si) quantifies the direct effect of each variable on ETP, while the total-order index (ST_n) includes all interaction effects among variables. These indices were calculated for each ETP model, climate scenario, and time period to capture how the importance of meteorological drivers may evolve under climate change.

Results

The Sobol sensitivity analysis highlighted significant spatial and temporal differences in how climatic variables affect potential evapotranspiration (ET_p) across Iran. During the baseline period, ET_p in humid and coastal regions (e.g., Bandar Abbas and Sari) was mainly controlled by net radiation, reflecting high energy inputs, while in arid and continental areas (e.g., Kerman, Mashhad, Ahvaz), maximum temperature and relative humidity were the dominant factors. Mountainous regions (Kermanshah, Tabriz) showed sensitivity to both net radiation and maximum temperature due to solar exposure and large diurnal temperature ranges.

In future periods, ET_p became more sensitive to thermal variables, with temperature-driven vapor pressure deficits increasingly dominating over radiation and wind contributions. Humidity gained importance in arid regions, highlighting the role of atmospheric dryness in ET_p increases, while in coastal areas, temperature and wind effects slightly intensified due to land–sea thermal contrasts. Mountain stations exhibited reduced sensitivity to minimum temperature, reflecting smaller diurnal temperature variations under warmer nights. Humid northern stations shifted from radiation- to temperature-dominated control, indicating thermal forcing increasingly shapes surface energy balance.

Overall, maximum temperature and relative humidity were the most influential variables historically and in future scenarios, with net radiation and wind playing secondary roles. The findings underscore that local factors such as elevation, proximity to water, and surface characteristics modulate ET_p sensitivity, stressing the need for regional assessments. These results align with global studies showing enhanced ET_p sensitivity to temperature and humidity under climate change, while emphasizing spatial variability across Iran.

Conclusions

The Sobol sensitivity analysis provided a comprehensive quantitative framework for evaluating how different meteorological variables influence ET_P under current and future climate conditions in Iran. The results confirm that future ET_P dynamics are likely to be governed by enhanced temperature sensitivity and increased atmospheric dryness, particularly in arid and semi-arid regions. Conversely, in humid regions, the controlling mechanisms may shift from radiative to thermal dominance. The observed inter-station variability revealed the necessity of considering local climatic characteristics when modeling evapotranspiration across Iran's diverse environments. The combination of three selected ET_P models Penman-Monteith, Romanenko, and Thom-Oliver allowed for a robust assessment of both energy-driven and humidity-driven processes. Furthermore, this study highlights the relatively limited application of global sensitivity analysis techniques such as Sobol in Iranian hydrological studies and demonstrates their potential for improving ET_P modeling accuracy. In summary, climate change is expected to intensify thermal controls on evapotranspiration while diminishing the influence of radiation and wind, reshaping the surface energy balance and water demand across Iran. The findings of this research can aid in refining evapotranspiration models, improving irrigation planning, and guiding adaptation strategies for sustainable water management under future climatic conditions.

Author Contributions

M.V.: Data Analysis, programming, results synthesis, draft preparation

N.G.: Visualization, Supervision, Manuscript editing, Conceptualization, Methodology

Data Availability Statement

No datasets are available

Acknowledgements

We would like to express our sincere gratitude to the University of Tehran for the logistical supports and Iran Meteorological Organization for providing required data.

Ethical considerations

The study was approved by the Ethics Committee of the University of ABCD (Ethical code: IR.UT.RES.2024.500). The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

تحلیل حساسیت چند معادله تبخیر تعرق پتانسیل به متغیرهای اقلیمی در دو دوره پایه و آینده با بهره‌گیری از روش سوبل

مهدی وزیری^۱ | نوذر قهرمان^۲

۱. گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: vaziri.mahdi@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه:

nghahreman@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۱۱

تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

تبخیر تعرق پتانسیل،

سوبل،

PyET

تغییر اقلیم،

CMIP6

با توجه به پیچیدگی فرآیند تبخیر تعرق و اثرات برهمکنشی متغیرهای اقلیمی بر آن، انجام تحلیل حساسیت برای شناسایی مؤثرترین پارامترها، گامی اساسی در بهبود دقت مدل‌های برآورد و کاهش عدم قطعیت محاسبات تبخیر تعرق است. تحلیل حساسیت به‌ویژه در شرایط تغییر اقلیم، ابزاری کلیدی برای درک واکنش تبخیر تعرق به تغییرات دما، تابش، رطوبت و باد محسوب می‌شود. در این پژوهش، حساسیت تبخیر تعرق پتانسیل (ETP) نسبت به دمای میانگین، دمای کمینه و بیشینه، سرعت باد، تابش خالص و رطوبت نسبی در هشت ایستگاه منتخب ایران طی دوره پایه (۲۰۲۴-۲۰۰۱) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰) بررسی شد. بدین منظور از روش تحلیل حساسیت جهانی سوبل (Sobol) مبتنی بر تجزیه واریانس استفاده گردید که قادر است اثرات مستقل و تعاملی پارامترها را بر خروجی مدل آشکار سازد. داده‌های اقلیمی دوره پایه از سازمان هواشناسی کشور و داده‌های اقلیمی دوره آینده از مدل‌های CNRM-ESM2-1 و INM-CM5-0 تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پروژه CMIP6 استخراج شد. برای برآورد ETP از سه روش پنمن-مانتیش فائو ۵۶، رومانکو و تام-الیور در محیط پایتون با بسته PyET استفاده گردید. نتایج نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها، دمای بیشینه و رطوبت نسبی مؤثرترین متغیرها در کنترل تبخیر تعرق هستند. در دوره آینده، سهم متغیرهای دمایی افزایش و نقش تابش و باد کاهش یافت که بیانگر تأثیر مستقیم گرمایش جهانی و کاهش رطوبت جو بر فرآیند تبخیر تعرق است. در مناطق مرطوب شمالی، حساسیت بیشتر معادلات به دما در قیاس با تابش مشاهده شد، در حالی که در مناطق خشک مرکزی، افزایش حساسیت به رطوبت نسبی و دمای میانگین غالب بود. این نتایج نشان می‌دهد تغییر اقلیم می‌تواند ترازمندی انرژی-رطوبتی مؤثر بر ETP را در ایران تغییر دهد و لزوم بازنگری در مدل‌های پیش‌بینی و مدیریت منابع آب را برجسته می‌کند.

استناد: وزیری؛ مهدی، قهرمان؛ نوذر، (۱۴۰۴) تحلیل حساسیت چند معادله تبخیر تعرق پتانسیل به متغیرهای اقلیمی در دو دوره پایه و آینده با بهره‌گیری از روش سوبل،

مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۶ (۱۲)، ۳۳۱۳-۳۲۹۳. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407261.670061>



© نویسندگان.

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <https://doi.org/10.22059/ijswr.2026.407261.670061>

مقدمه

تبخیر تعرق^۱ (ET) یکی از اجزای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی و از مهم‌ترین مؤلفه‌های ترازمندی آبی در مقیاس‌های مختلف مکانی و زمانی به‌شمار می‌رود (Allen et al., 1998). برآورد دقیق ET نقش مهمی در مدیریت منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، طراحی سامانه‌های آبیاری و ارزیابی اثرات تغییر اقلیم دارد (Xu and Singh, 2005). با این حال، تبخیر تعرق پدیده‌ای پیچیده و تابعی از عوامل متعدد هواشناسی از جمله دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، تابش خورشیدی و فشار بخار آب است که به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم در مدل‌ها و معادلات تجربی و نیمه‌تجربی برآورد آن نقش دارند (Djaman et al., 2015). مدل‌های برآورد تبخیر تعرق نیازمند داده‌های متنوع هواشناسی مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد هستند. دقت این مدل‌ها وابسته به کیفیت و حساسیت ورودی‌ها است. به عبارت دیگر، تغییرات اندک در برخی پارامترهای ورودی می‌تواند اثر قابل توجهی بر خروجی مدل داشته باشد، در حالی که تغییرات برخی دیگر از پارامترها ممکن است تأثیر ناچیزی داشته باشند. بنابراین، شناسایی و تحلیل حساسیت این پارامترها نقش مهمی در بهبود مدل‌سازی تبخیر تعرق و کاهش عدم قطعیت‌ها ایفا می‌کند (Saltelli et al., 2008). تحلیل حساسیت^۲ ابزاری آماری برای بررسی میزان تأثیر هر یک از پارامترهای ورودی بر خروجی مدل است. در میان روش‌های مختلف تحلیل حساسیت، روش سوبل (Sobol method) به عنوان یکی از روش‌های مبتنی بر تجزیه واریانس^۳ شناخته می‌شود که قابلیت تحلیل تأثیرات مستقیم و تعاملی پارامترها را دارد (Sobol, 2001). این روش، شاخص‌های مرتبه اول^۴ و مرتبه کل^۵ را محاسبه می‌کند که به ترتیب میزان تأثیر مستقل هر پارامتر و تأثیر کلی آن شامل تعامل با سایر پارامترها را نشان می‌دهند (Saltelli et al., 2010). استفاده از روش سوبل در تحلیل حساسیت مدل‌های تبخیر تعرق به محققان این امکان را می‌دهد که مهم‌ترین متغیرهای تأثیرگذار را شناسایی و در صورت لزوم دقت اندازه‌گیری آن‌ها را بهبود دهند. علاوه بر این، با حذف یا ساده‌سازی متغیرهای کم‌اهمیت، می‌توان مدل را بهینه‌سازی کرد و هزینه‌های محاسباتی را کاهش داد (Razavi and Gupta, 2016). با توجه به تغییرات گسترده اقلیمی در ایران و تنوع بالای شرایط آب‌وهوایی از مناطق مرطوب شمالی تا اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مرکزی، بررسی واکنش تبخیر تعرق پتانسیل نسبت به عوامل اقلیمی مختلف اهمیت ویژه‌ای دارد. در این تحقیق از سه روش: پنمن-مانیت (Allen et al., 1998) به عنوان روش مرجع^۶ با عملکرد قابل قبول در اکثر اقلیم توصیه شده است و مدل تجربی روماننکو^۷ به دلیل وابستگی مستقیم به دما و رطوبت نسبی که در مناطق خشک و کم‌داده عملکرد مناسبی دارد (Djaman et al., 2015) و همچنین روش تام-الیور^۸ که با تأکید بر توازن انرژی و تابش خالص، برای مناطق مرطوب و با رطوبت بالای جو مناسب است (McMahon et al., 2013) استفاده شده است. با وجود کاربرد گسترده این روش‌ها در برآورد تبخیر تعرق، بررسی حساسیت پارامترهای مؤثر در آن‌ها در پهنه اقلیمی ایران تاکنون به‌صورت جامع انجام نشده است. مطالعات داخلی بیشتر بر ارزیابی آماری یا روندهای زمانی تمرکز داشته‌اند و درخصوص تحلیل حساسیت به روش سوبل برای این سه روش در ایران مطالعه چندانی انجام نشده است. متغیرهای سرعت باد، تابش خالص، دمای هوا و رطوبت نسبی نقش تعیین‌کننده‌ای در ترازمندی انرژی و فرآیند تبخیر تعرق دارند که میزان اثرگذاری آن‌ها در شرایط اقلیمی مختلف متفاوت است. استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل این امکان را فراهم می‌کند تا سهم نسبی هر یک از این متغیرها در مدل‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق به‌صورت کمی مشخص شود. مقایسه ضرایب حساسیت بین دوره پایه و آینده، تغییر نقش این متغیرها را تحت سناریوهای گرمایش و خشکی اقلیم ایران آشکار می‌سازد. هدف پژوهش، شناخت الگوی تغییر حساسیت متغیرهای اقلیمی در مناطق مختلف کشور و بهبود دقت مدل‌های پیش‌بینی تبخیر تعرق در شرایط اقلیمی آینده است.

پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی از روش سوبل برای تحلیل حساسیت مدل‌های هیدرولوژیکی و تبخیر تعرق استفاده کرده‌اند که

1 Evapotranspiration

2 Sensitivity Analysis

3 variance-based

4 First-order Sobol index

5 Total-order Sobol index

6 FAO

7 Romanenko

8 Thom-Oliver

نشان‌دهنده کارایی بالای این روش در درک بهتر رفتار مدل‌ها و پارامترهای آن‌ها است (Herman et al., 2013; Pianosi et al., 2016). مطالعه‌ای در سال ۲۰۲۳ (منتشر شده در ۲۰۲۴) در منطقه جنوب‌شرق ویتنام، با استفاده از روش تحلیلی روند بهبودیافته^۱ و تکنیک Sobol جهت محاسبه شاخص‌های حساسیت، به بررسی روندهای تبخیرتغرق در دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۹ پرداخت. نتایج نشان دادند که تبخیرتغرق سالانه به میزان ۱۳۵-۷۲ میلی‌متر افزایش داشته و حساسیت تبخیرتغرق به متغیرهایی مثل تابش خورشیدی، رطوبت نسبی و دمای کمینه به‌طور قابل توجهی بالا است (Phan Thi Ha et al., 2023). زنگ^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۱ در مطالعه‌ای بر روی کشور چین، میزان تغییرات تبخیرتغرق پتانسیل^۳ (ET_P) را تحت دو سناریوی تغییر اقلیم بررسی کردند. با به‌کارگیری آزمون Mann-Kendall برای شناسایی روندها و روش Sobol برای تحلیل حساسیت، محققان عوامل تأثیرگذار بر ET_P را شناسایی کردند. آن‌ها دریافتند که علاوه بر تغییرات مستقل متغیرها، تعامل میان آن‌ها نیز نقش قابل توجهی در تغییر تبخیرتغرق دارد. این پژوهش توانمندی روش Sobol را در تحلیل دقیق و کمی تأثیرات مستقلی و تعاملی پارامترهای اقلیمی بر ET_P نشان می‌دهد. چنین نتایجی می‌تواند در بهبود مدل‌های هیدرولوژیکی و پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم نقش مؤثری ایفا کنند. مطالعات اخیر در ایران نشان داده‌اند که تبخیرتغرق مرجع (ET₀) در مقیاس‌های فصلی واکنش‌های متفاوتی به تغییرات عناصر هواشناسی دارد. یحیوی‌دیزج و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های بلندمدت ایستگاه‌های همدیدی و روش پنمن-مانتیث^۴، روندهای زمانی و حساسیت فصلی تبخیرتغرق مرجع نسبت به دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که در بهار دمای کمینه، در تابستان و پاییز سرعت باد و در زمستان دمای بیشینه بیشترین سهم را در تغییرپذیری یا ET₀ دارند، در حالی که رطوبت نسبی اثر کاهشی بر آن دارد. این یافته‌ها اهمیت به‌کارگیری روش‌های دقیق تحلیل حساسیت مانند Sobol را در شناسایی متغیرهای کلیدی ورودی برای مدل‌سازی تبخیرتغرق تأیید می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

روش تحلیل حساسیت سوبل

در این مقاله، روش سوبل (Sobol) برای تحلیل حساسیت تبخیرتغرق پتانسیل (ET_P) نسبت به شش متغیر هواشناسی شامل: میانگین دمای هوا، کمینه و بیشینه دمای هوا، سرعت باد، تابش خالص و رطوبت نسبی در مقیاس ماهانه در دوره آینده ۲۱۰۰-۲۰۲۵ و دوره پایه از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ میلادی انتخاب شده است. این روش یک روش تحلیل حساسیت بر پایه تجزیه واریانس است که برای مدل‌ها یا الگوریتم‌های غیرخطی و غیرتک‌سویه مناسب است. روش سوبل توانایی متغیرهای منفرد را در تأثیرگذاری بر عملکرد مدل و همچنین تأثیر تعامل بین متغیرها بر مدل توصیف می‌کند؛ قابلیت‌هایی که با روش‌های تحلیل حساسیت محلی قابل دستیابی نیست (Looss and Lemaître, 2015)، مدل پارامتری شده به صورت رابطه ۱ زیر محاسبه می‌شود:

$$y=f(X,\theta) \quad \text{رابطه ۱)}$$

که در آن y و θ به ترتیب نشان‌دهنده تابع هدف و پارامتر تابع هدف هستند؛ X داده‌های ورودی تابع هدف را نشان می‌دهد. واریانس کل به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Sobol, 1993):

$$D(y)=\sum_{n=1}^k D_n+\sum_{n=1}^{k-1} \sum_{m=n+1}^k (D_{nm}+...+D_{n...k}) \quad \text{رابطه ۲)}$$

D_n و D_{nm} به ترتیب نشان‌دهنده واریانس جزئی در حساسیت مرتبه اول پارامتر θ_n و واریانس جزئی در حساسیت مرتبه دوم ناشی از برهم‌کنش بین پارامترهای θ_n و θ_m هستند، k تعداد کل پارامترها را نشان می‌دهد. شاخص‌های حساسیت مرتبه اول (S_n) و مرتبه کل (S_{Tn}) را می‌توان با استفاده از روابط ۳ و ۴ زیر محاسبه کرد (Sobol, 1993):

$$S_n=\frac{D_n}{D(y)} \quad \text{رابطه ۳)}$$

$$S_{Tn}=1-\frac{D_{\sim n}}{D(y)} \quad \text{رابطه ۴)}$$

S_n و S_{Tn} به ترتیب نشان‌دهنده حساسیت فردی ناشی از پارامتر θ_n و برهم‌کنش‌های حساسیت کلی مرتبط با آن هستند. $D_{\sim n}$ بیانگر

1 Improved Sen Trend Analysis

2 Zeng

3 Potential Evapotranspiration

4 penman-monteith

واریانس کل مربوط به سایر پارامترها به جز θ_n است. در این روش واریانس خروجی مدل به عنوان شاخصی از تغییرات کل سیستم در نظر گرفته می شود. این واریانس به اجزایی تفکیک می شود که هر جزء سهم یک پارامتر یا ترکیبی از پارامترها را نشان می دهد. در این روش می توان سهم مستقیم هر پارامتر بدون در نظر گرفتن برهم کنش ها و سهم یک پارامتر همراه با تمام برهم کنش هایش با پارامترهای دیگر را برآورد کرد (Zeng et al., 2021).

بسته ی پایتون برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل (PyET)

تبخیرتعرق (ET) یکی از شارهای کلیدی در ترازمندی آب است که معمولاً با استفاده از فرمول های (نیمه) تجربی برآورد می شود. مقدار برآورد شده این شار ممکن است به شدت به فرمول مورد استفاده وابسته باشد و این موضوع عدم قطعیت را در نتایج مطالعات محیط زیستی که از ET استفاده می کنند، افزایش دهد. تغییرات اقلیمی می تواند عدم قطعیت بیشتری ایجاد کند، زیرا ET برآورد شده توسط هر فرمول ممکن است به طور متفاوتی به تغییرات داده های ورودی هواشناسی واکنش نشان دهد. PyET یک بسته ی متن باز پایتون برای برآورد تبخیرتعرق پتانسیل روزانه با استفاده از داده های موجود هواشناسی است. این بسته امکان استفاده از ۲۰ روش مختلف ET_P را هم بر داده های سری زمانی و هم بر داده های شبکه ای فراهم می کند. بیشتر روش های پیاده سازی شده در این بسته بر اساس مقادیر مرجع موجود در منابع علمی ارزیابی شده و با یکپارچه سازی مستمر بررسی می شوند تا از صحت پیاده سازی اطمینان حاصل شود (Vremec et al., 2024). در این پژوهش از ۳ روش پنمن-مانتیت فائو ۵۶، روماننکو و تام-آلیور استفاده شده است.

۱- Penman-Monteith FAO-56 (PM-FAO56)

رابطه پنمن-مانتیت فائو ۵۶ برای تبخیر و تعرق مرجع محصول به صورت رابطه ۵ محاسبه شده است (Allen et al., 1998):

$$ETP = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad \text{رابطه ۵}$$

۲- Thom-Oliver (thom-oliver)

رابطه ETP تام-آلیور به صورت رابطه ۶ محاسبه شده است (Vremec et al., 2024):

$$ETP = \frac{\Delta (R_n - G) + 2/5 \gamma (e_s - e_a) \times a_w (1 + b_w U_2)}{\lambda \rho_w (\Delta + \gamma (1 + \frac{r_s}{r_a}))} \quad \text{رابطه ۶}$$

که در آن $a_w = 2/6$ و $b_w = 0/536$.

۳- Romanenko (romanenko)

رابطه ETP روماننکو به صورت رابطه ۷ محاسبه شده است (Vremec et al., 2024):

$$ETP = k \left(1 + \frac{T}{25} \right)^2 \times \left(1 - \frac{e_a}{e_s} \right) \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن $k = 4/5$ یک ضریب تجربی است.

در تمامی روابط بالا؛

Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع و برابر است با: $\frac{4098 e_s}{(237.3 + T)^2}$ ، $e_s = 0/6107 \times 10^{\frac{17.27 \times T}{237.3 + T}}$ فشار بخار اشباع در دمای خاص، T دما، U_2 سرعت باد در ارتفاع دو متری، $e_a = \frac{R_h}{100} \times e_s$ فشار بخار واقعی، r_s مقاومت سطحی، r_a مقاومت آئرو دینامیکی گیاه و ρ_w چگالی آب مایع (1000 kg/m^3) هستند.

داده های هواشناسی دوره پایه

داده های مربوط به متغیرهای؛ رطوبت نسبی، دمای های میانگین، کمینه و بیشینه، سرعت باد، تابش های طول موج بلند و کوتاه ورودی به زمین و آلبیدو سطح دوره پایه برای سال های میلادی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ از پایگاه داده های NASA POWER به صورت میانگین ماهانه



دریافت شد. برای بدست آوردن تابش خالص از رابطه استفان بولتزمن^۱ و ترازمندی انرژی به صورت رابطه ۸ (Verma et al., 2016)، رابطه ۹ (Manzo and Trishchenko, 2025) و رابطه ۱۰ (Diop et al., 2023) استفاده شده است:

$$LW\uparrow - LW\downarrow + SW\uparrow - SW\downarrow = R_n \quad \text{رابطه ۸}$$

$$T^4 \times \sigma = LW\uparrow \quad \text{رابطه ۹}$$

$$SW\downarrow \times \text{Albedo} = SW\uparrow \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در معادلات بالا σ ثابت استفان بولتزمن است که برابر $5/67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ، $SW\downarrow$ تابش طول موج کوتاه ورودی، $SW\uparrow$ تابش طول موج کوتاه خروجی، $LW\downarrow$ تابش طول موج بلند ورودی و $LW\uparrow$ تابش طول موج بلند خروجی هستند.

منبع داده‌های این پایگاه از ترکیب مشاهدات ماهواره‌ای ناسا و مدل‌های بازتحلیل جوی (مثل MERRA-2 و GMAO) تولید می‌شوند. داده‌ها معمولاً از سال ۱۹۸۱ یا ۱۹۹۷ (بسته به متغیر) تا زمان حاضر به صورت روزانه، ماهانه یا ساعتی موجودند. پوشش مکانی این پایگاه کل سطح زمین با وضوح مکانی حدود $0/5^\circ \times 0/5^\circ$ (تقریباً 50×50 کیلومتر) می‌باشد. با توجه به عدم کفایت و دقت داده‌های تابش کل/خالص در شبکه ایستگاه‌های دیدبانی سازمان هواشناسی برای محاسبه تابش خالص باید از روابطی تجربی مانند آنگستروم استفاده کرد که خود متضمن خطاهای ذاتی و نیازمند واسنجی هستند (مانند تعیین ضرایب a و b ، تعیین دقیق طول روز و ساعات آفتابی) بدین جهت بر اساس مرور منابع از داده‌های پایگاه NASA POWER استفاده شد. همچنین با توجه به ماهیت شبکه‌ای داده‌های ماهواره‌ای، این مقادیر بیانگر میانگین شرایط اقلیمی در یک سلول شبکه‌ای هستند و لزوماً تمامی نوسانات محلی و خردمقیاس ایستگاه‌های زمینی را بازنمایی نمی‌کنند. داده‌ها پیش از تحلیل حساسیت، از نظر وجود داده‌های مفقود، مقادیر پرت و همگنی داده‌ها (توسط نرم افزار آماری SPSS) بررسی شده‌اند.

داده‌های دوره آینده

داده‌های میانگین ماهانه مربوط به متغیرهای هواشناسی؛ سرعت باد نزدیک به سطح زمین، بیشیه و کمینه دمای هوا، میانگین دمای هوا نزدیک سطح زمین، رطوبت نسبی و تابش طول موج‌های کوتاه و بلند ورودی و خروجی به سطح برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۵ میلادی برای هشت ایستگاه منتخب در کشور ایران طبق جدول ۲ با استفاده از دو مدل CNRM-ESM2-1 و INM-CM5-0 تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از پایگاه داده‌های اقلیمی کوپرنیکوس^۲ نسخه ششم از مجموعه پروژه‌های CMIP^۳ انتخاب شده است. با استفاده از داده‌های تابش دریافتی برای محاسبه تابش خالص به صورت رابطه ۱۱ که ترازمندی تابش خالص دریافتی را نشان می‌دهد عمل شده است.

$$(RLDS+RSUS)-(RLUS+RSUS)=R_n \quad \text{رابطه ۱۱}$$

در رابطه ۱۱ RLDS، RSUS، RLUS و RSUS به ترتیب تابش طول موج بلند ورودی به سطح، تابش طول موج کوتاه ورودی به سطح، تابش طول موج بلند خروجی از سطح و تابش طول موج کوتاه خروجی از سطح می‌باشند.

در این مطالعه، هر ایستگاه به‌عنوان نماینده یک سلول شبکه‌ای با ابعاد متناظر با دقت مکانی مدل‌های GCM در نظر گرفته شده است. به‌عنوان نمونه، در مدل CNRM-ESM2-1 هر ایستگاه درون شبکه‌ای با ابعاد تقریبی 155×155 کیلومتر قرار دارد که هر نقطه در این شبکه داده اقلیمی مشابهی را دارد و نام ایستگاه صرفاً به عنوان نماینده شبکه در نظر گرفته شده است. این فرض به‌منظور امکان مقایسه با دوره پایه اتخاذ شده است. در واقع هر ایستگاه (در دوره پایه) با پهنه‌ای اقلیمی مشابه خود در آینده مقایسه شده است. هرچند دقت مکانی نسبتاً پایین مدل‌ها می‌تواند به‌عنوان یکی از منابع عدم قطعیت در نظر گرفته شود. برای ارزیابی کیفیت داده‌های دوره آینده، ابتدا سازگاری آماری داده‌های شبیه‌سازی شده با بررسی شاخص‌های توصیفی شامل میانگین، انحراف معیار و دامنه تغییرات در مقایسه با دوره پایه ارزیابی شد. همگنی داده‌ها از طریق تحلیل سری داده‌ها و بررسی وجود پرش‌های غیرواقعی یا ناپیوستگی‌های ناگهانی در روند متغیرهای اقلیمی توسط نرم افزار آماری SPSS کنترل گردید. همچنین، دامنه تغییرات فیزیکی متغیرها با مقادیر گزارش شده در مطالعات اقلیمی و حدود فیزیکی شناخته‌شده هر مت (مانند بازه‌های دما، رطوبت نسبی و سرعت باد) تطبیق داده شد تا از واقع‌گرایی خروجی مدل‌ها اطمینان حاصل شود.

1 Stefan-Boltzmann

2 Copernicus

3 Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

سناریوهای SSP^۱

در پروژه CMIP6 برای شبیه‌سازی آینده از سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مشترک یا همان SSP استفاده می‌شود. این سناریوها در واقع مسیرهای احتمالی آینده توسعه‌ی جهان هستند که با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و سیاست‌های اقلیمی ترکیب می‌شوند. SSP1 (پایداری): جهان پایدار، سرمایه‌گذاری روی آموزش و سلامت، استفاده گسترده از انرژی‌های تجدیدپذیر، رشد جمعیت آهسته و انتشار گازهای گلخانه‌ای کم. SSP2 (مسیر میانه): ادامه روندهای تاریخی بدون تغییر اساسی، توسعه متعادل، اما با مشکلاتی مثل نابرابری و تخریب محیط زیست و سطح متوسط انتشار. SSP3 (رقابت منطقه‌ای): ملی‌گرایی قوی، تمرکز بر امنیت غذایی و انرژی داخلی، همکاری بین‌المللی ضعیف، جمعیت بالا، رشد اقتصادی ضعیف و انتشار زیاد. SSP4 (نابرابری): تفاوت زیاد بین کشورهای فقیر و غنی، فناوری‌های پاک فقط در کشورهای ثروتمند و کشورهای فقیر به سوخت‌های فسیلی وابسته می‌مانند. SSP5 (توسعه مبتنی بر سوخت فسیلی): رشد سریع اقتصادی با اتکای زیاد بر سوخت‌های فسیلی، انتشار بسیار بالا و بعداً احتمالاً با فناوری جذب کربن سعی در کاهش انتشار دارد (Riahi et al., 2017). ویژگی‌های تشعشعی سناریوهای SSP در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. سناریوهای SSP (Riahi et al., 2017)

سناریو	وضعیت	افزایش دما (درجه سانتی‌گراد)
SSP1-1.9	آینده پایدار، کاهش شدید انتشار گازهای گلخانه‌ای	محدود به ۱/۵
SSP1-2.6	آینده پایدار، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای	حدود ۲
SSP2-4.5	مسیر میانه، انتشار متوسط گازهای گلخانه‌ای	حدود ۲/۵ تا ۳
SSP3-7.0	رقابت منطقه‌ای، انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای	حدود ۳ تا ۴
SSP5-8.5	توسعه سوخت‌های فسیلی، انتشار بسیار زیاد گازهای گلخانه‌ای	بیش از ۴

عدد بعد از خط تیره نشان دهنده واداشت (Forcing) تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای در سال ۲۱۰۰ است. به عنوان مثال در سناریوی SSP2-4.5، این مقدار حدود ۴/۵ وات بر متر مربع است.

منطقه مطالعاتی

منطقه‌ی مطالعاتی این پژوهش شامل هشت ایستگاه مهم ایران است که از نظر جغرافیایی و اقلیمی تنوع چشمگیری دارند. این ایستگاه‌ها عبارتند از: ساری، تهران، کرمان، کرمانشاه، بندرعباس، اهواز، تبریز و مشهد که در شکل ۱ آورده شده است. محدوده‌ی انتخابی، گستره‌ای از شمال تا جنوب و از شرق تا غرب کشور ایران را دربرمی‌گیرد. از نظر اقلیمی، این منطقه شامل شرایط بسیار متفاوتی از اقلیم مرطوب خزری در ساری تا اقلیم بیابانی و گرمسیری در بندرعباس و اهواز است. همچنین شهرهایی مانند تهران، کرمانشاه و تبریز دارای اقلیم کوهستانی یا نیمه‌خشک هستند و مشهد و کرمان در مناطق خشک و مرتفع قرار دارند. این تنوع جغرافیایی و اقلیمی باعث می‌شود منطقه‌ی مطالعاتی مورد نظر، بازتاب‌دهنده‌ی بخش مهمی از شرایط اقلیمی ایران باشد که مشخصات هر یک از ایستگاه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های منتخب

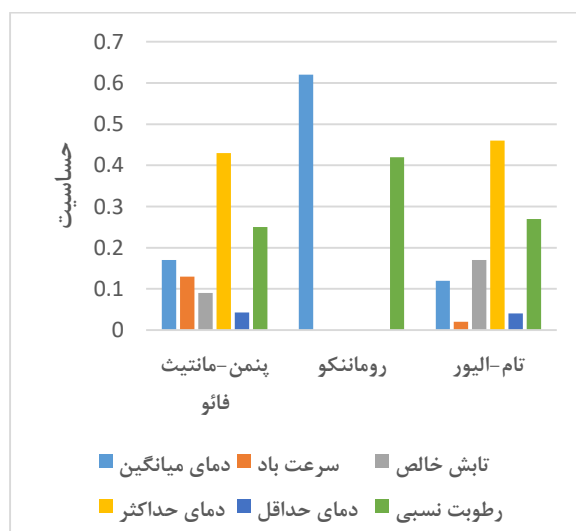
ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع (متر)
اهواز	۴۸/۶۷	۳۰/۳۱	۱۶
بندرعباس	۲۸/۵۶	۱۸/۲۷	۹
تهران	۵۱/۱۸	۶۸/۳۵	۱۱۶۸
تبریز	۴۶/۲۸	۰۸/۳۸	۱۵۲۰
ساری	۰۵/۵۳	۵۶/۳۶	۵۰
کرمان	۰۷/۵۷	۲۸/۳۰	۱۷۵۵
کرمانشاه	۰۶/۴۷	۳۱/۳۴	۱۳۵۰
مشهد	۵۶/۵۹	۳۱/۳۶	۱۰۰۳



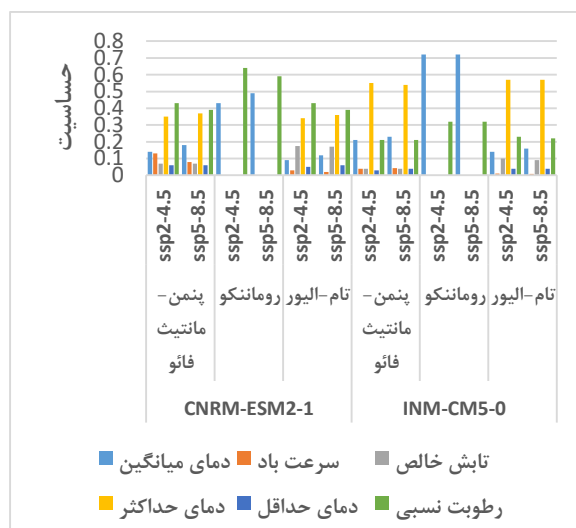
شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های منتخب بر روی گستره کشور ایران

یافته‌های پژوهش

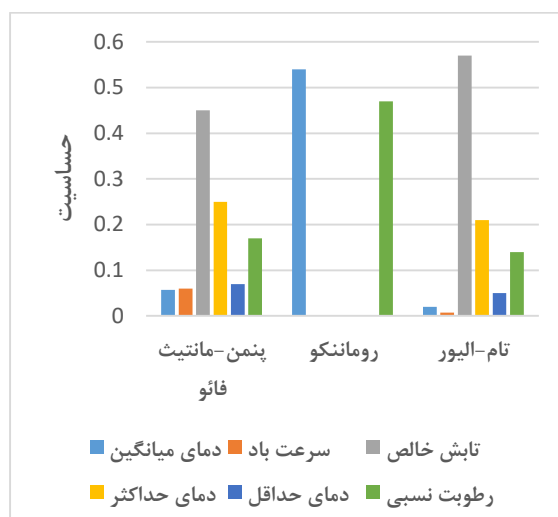
مقادیر میانگین تبخیرتعرق پتانسیل ماهانه با استفاده از سه روش پنمن-مانتیت ۵۶، رومانکو و تام-الیور با استفاده از بسته PyET برای دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۲۴) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۲۸) برای هریک از ایستگاه‌های منتخب محاسبه شده است. در این پژوهش به منظور بررسی میزان تأثیر پارامترهای هواشناسی در برآورد تبخیرتعرق پتانسیل، از روش تحلیل حساسیت Sobol استفاده شده است. این روش به‌عنوان یکی از روش‌های جامع و شناخته‌شده تحلیل حساسیت، سهم نسبی هر ورودی و همچنین اثرات متقابل آن‌ها را بر خروجی مدل مشخص می‌کند. برای محاسبه تبخیرتعرق پتانسیل، سه روش مختلف شامل پنمن-مانتیت ۵۶، تام-الیور و رومانکو به کار گرفته شده است که سهم (حساسیت) هر یک از ورودی‌ها در این روش‌ها برای دوره پایه و آینده تحت دو سناریو و مدل مختلف در اشکال ۲ تا ۱۷ آورده شده است.



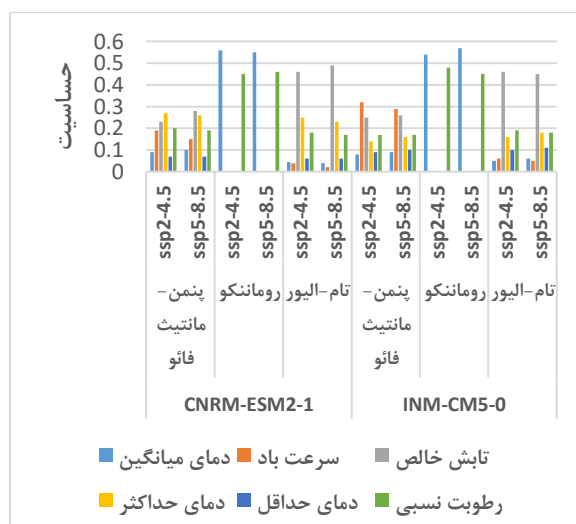
شکل ۲. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه اهواز



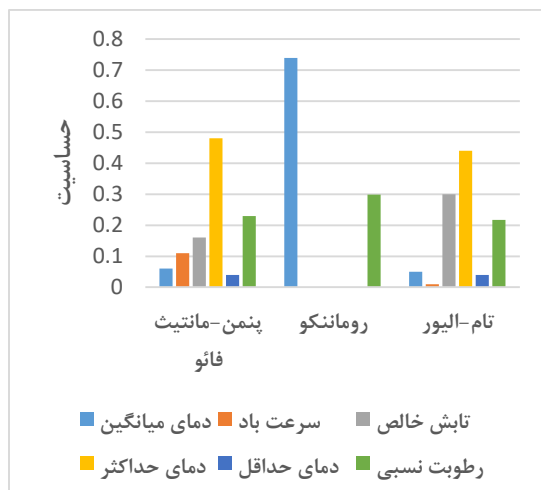
شکل ۳. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هریک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه اهواز



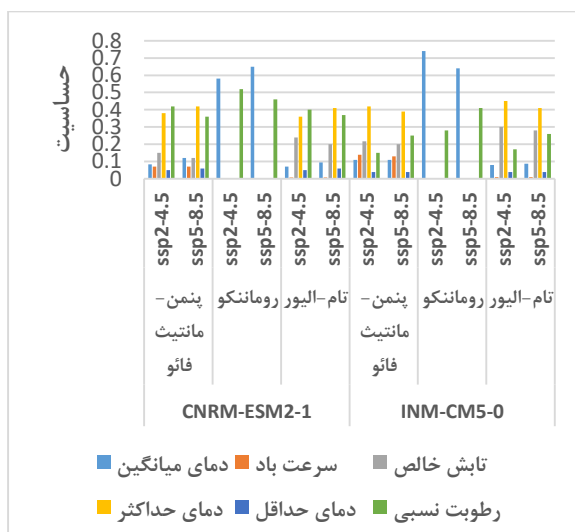
شکل ۴. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه بندرعباس



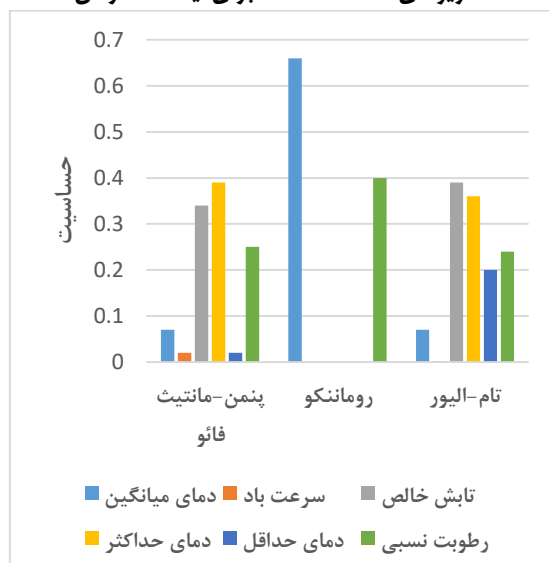
شکل ۵. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه بندرعباس



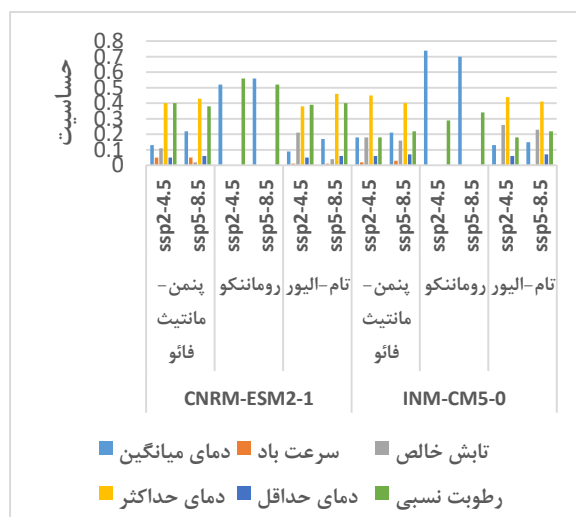
شکل ۶. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه کرمان



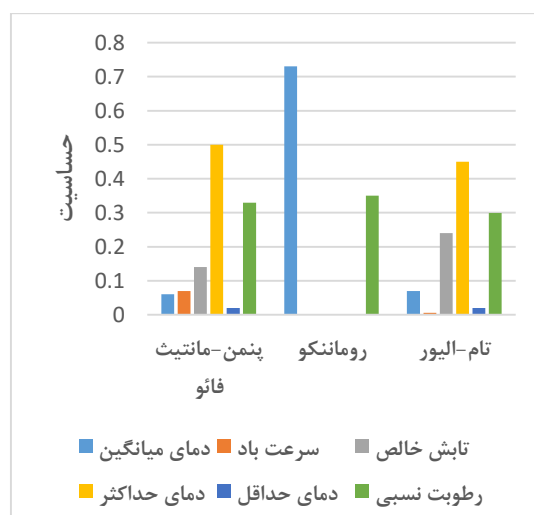
شکل ۷. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه کرمان



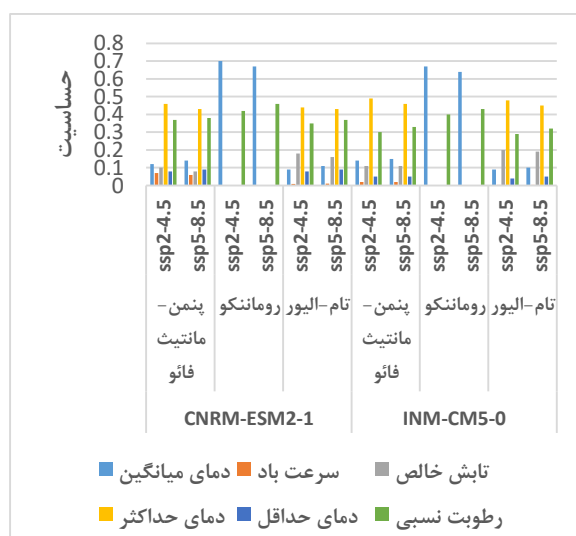
شکل ۸. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه کرمانشاه



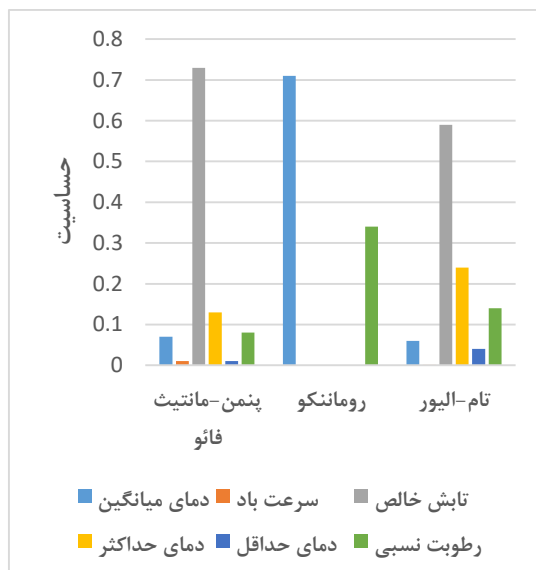
شکل ۹. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه کرمانشاه



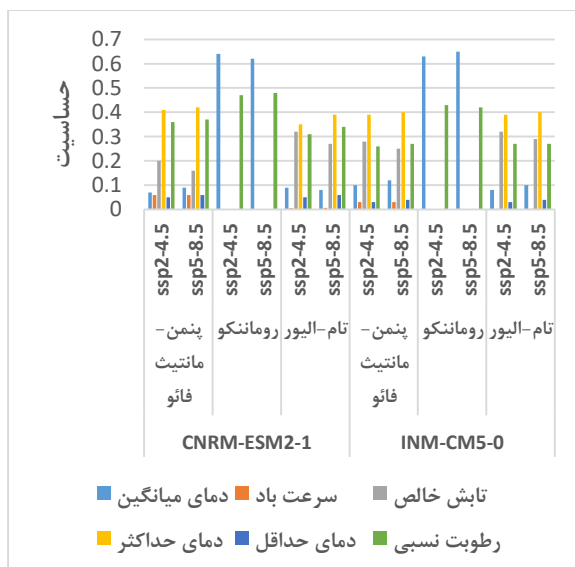
شکل ۱۰. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه مشهد



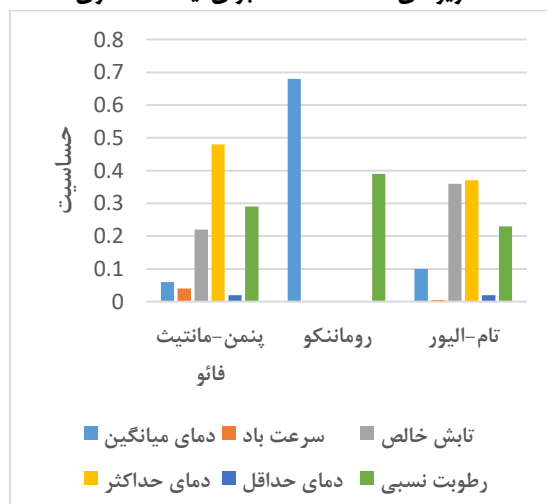
شکل ۱۱. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه مشهد



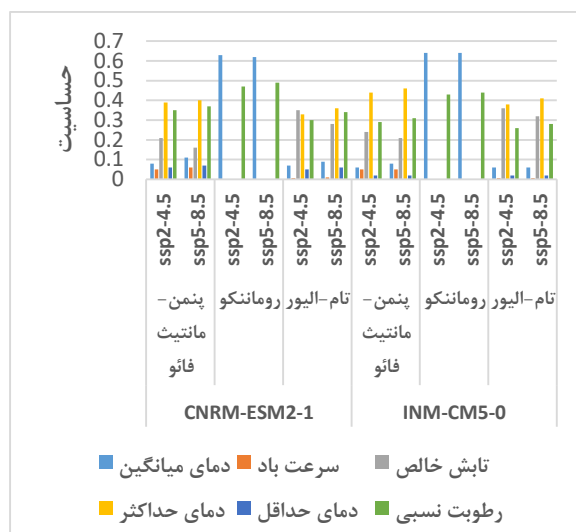
شکل ۱۲. میزان حساسیت هریک از متغیرهای هواشناسی در هریک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای ایستگاه ساری



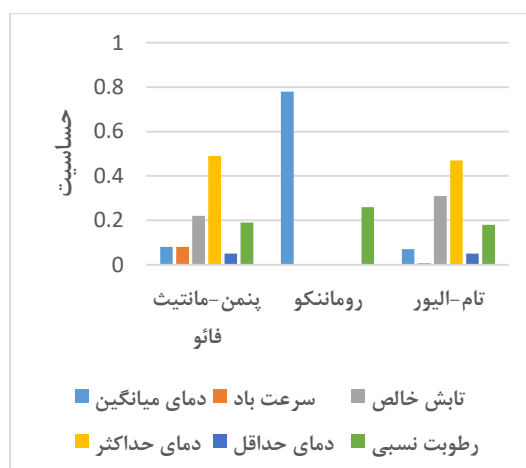
شکل ۱۳. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه ساری



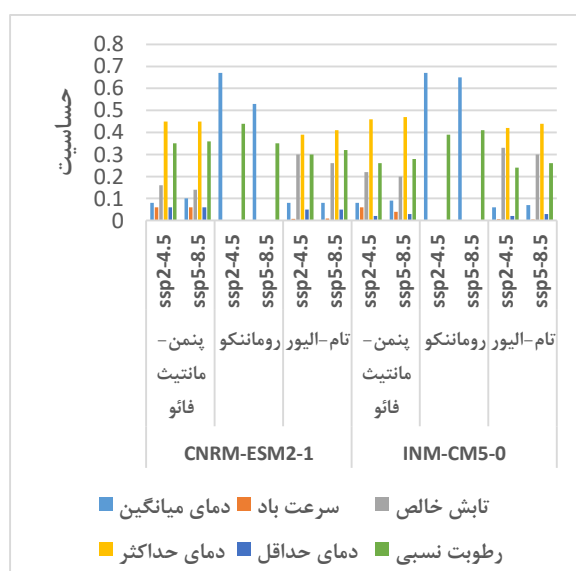
شکل ۱۴. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه تبریز



شکل ۱۵. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه تبریز



شکل ۱۶. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل دوره پایه برای ایستگاه تهران



شکل ۱۷. میزان حساسیت هر یک از متغیرهای هواشناسی در هر یک از روش‌های مختلف برآورد تبخیر تعرق پتانسیل برای دوره آینده با مدل‌ها و سناریوهای مختلف CMIP6 برای ایستگاه تهران

در اینجا به علت استفاده از شاخص کل در روش تحلیل حساسیت سوبل که شامل برهمکنش متغیرها نیز هست، مجموع ضرایب حساسیت‌ها بیشتر از ۱ شده است یعنی اثرات مشترک در چند شاخص ظاهر می‌شوند و جمع کل از ۱ عبور می‌کند. همچنین علت دیگر آن می‌تواند غیرخطی بودن متغیرها باشد.

بحث

طبق نتایج بدست آمده از تحلیل نمودارها در ایستگاه اهواز، در هر دو دوره پایه و آینده، دمای بیشینه و رطوبت نسبی نقش غالب در حساسیت تبخیر تعرق پتانسیل را داشته‌اند؛ با این حال در دوره آینده، سهم رطوبت نسبی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد که بیانگر تشدید نقش فشار بخار و کسری رطوبتی هوا در فرآیند انتقال جرم بخار است. علاوه بر این، دمای میانگین در دوره آینده حساسیت بیشتری نسبت به دوره پایه کسب کرده است و این امر با روند گرمایش منطقه‌ای و تشدید تنش حرارتی سازگار است. در مقابل، سهم تابش خالص و سرعت باد در دوره آینده کاهش نسبی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از ثبات نسبی الگوهای ابرناکی و کاهش نقش آشفته‌گی لایه مرزی در این منطقه کم باد باشد. این نتایج نشان می‌دهد که در اهواز، سازوکار غالب افزایش ET_p در آینده، بیشتر متکی بر تشدید گرمایش و کاهش رطوبت جو است تا افزایش توان تابشی یا باد. در این ایستگاه دمای بیشینه و رطوبت نسبی در هر دو دوره نقش غالب در حساسیت تبخیر تعرق پتانسیل را داشته‌اند؛ در دوره آینده افزایش سهم رطوبت نسبی نشان‌دهنده تشدید کسری فشار بخار و افزایش نقش تبادل جرم بخار در شرایط خشکی اقلیم است (Scheff and Frierson, 2014). همچنین افزایش حساسیت دمای میانگین با گرمایش منطقه‌ای سازگار است که در مناطق خشک منجر به تشدید تنش گرمایی و افزایش پتانسیل تبخیر می‌گردد (McMahon et al., 2013). کاهش سهم تابش خالص و سرعت باد در آینده می‌تواند ناشی از ثبات نسبی الگوهای تابشی و کاهش آشفته‌گی لایه مرزی باشد (Allen et al., 1998). ایستگاه بندرعباس، در دوره پایه تابش خالص نقش اصلی را در تعیین حساسیت تبخیر تعرق پتانسیل را داشته است، که این امر با اقلیم گرم و مرطوب منطقه و مقادیر بالای انرژی تابشی دریافتی در سطح زمین سازگار است؛ اما در دوره آینده، نقش دمای میانگین و دمای بیشینه افزایش یافته و سهم تابش خالص دریافتی در سطح زمین کاهش می‌یابد. این تغییر بیانگر انتقال سازوکار کنترل ET_p از غالبیت انرژی تابشی به غالبیت نیروی دمای و گرادیان اشباع بخار آب است که تحت سناریوهای گرمایش آینده منطقی به نظر می‌رسد. همچنین سهم سرعت باد نیز در آینده افزایش یافته که می‌تواند نتیجه تغییرات در الگوهای جریانی و افزایش ناپایداری‌های حرارتی سطحی در سواحل جنوبی باشد. این یافته‌ها حاکی از آن است که در آینده، تغییرات دما عامل کلیدی کنترل ET_p در بندرعباس خواهد بود. در دوره پایه تابش خالص عامل اصلی کنترل ET_p بوده است که با اقلیم گرم و مرطوب منطقه سازگار است (Allen et al., 1998). اما در دوره آینده تقویت نقش دمای میانگین و دمای بیشینه نشان‌دهنده انتقال کنترل فرآیند تبخیر از انرژی تابشی به نیروهای ترمودینامیکی و تفاوت فشار بخار اشباع است (Yang et al., 2019). افزایش سهم سرعت باد نیز می‌تواند ناشی از تغییر الگوهای گردش منطقه‌ای و ناپایداری‌های حرارتی ساحلی باشد (McMahon et al., 2013) زیرا افزایش سهم سرعت باد در دوره آینده می‌تواند ناشی از تغییر در گرادیان‌های دمای بین خشکی و دریا و در نتیجه تشدید جریانات همرفتی و نسیم‌های محلی در نواحی ساحلی جنوب ایران باشد. در شرایط گرمایش اقلیمی، افزایش دمای سطح زمین نسبت به دمای آب دریا باعث تقویت گرادیان فشار سطحی و افزایش فراوانی جریانات بادی روزانه می‌شود (McVicar et al., 2012) این پدیده موجب افزایش آشفته‌گی لایه مرزی و انتقال مؤثرتر بخار آب از سطح به جو می‌گردد، که در نهایت حساسیت بیشتر تبخیر تعرق نسبت به سرعت باد را توجیه می‌کند. نتایج ایستگاه کرمان نشان می‌دهد که دمای بیشینه و رطوبت نسبی در هر دو دوره نقش اصلی را در حساسیت ET_p بر عهده دارند؛ با این تفاوت که در دوره آینده، سهم رطوبت نسبی افزایش معناداری پیدا می‌کند. این وضعیت نشان‌دهنده تشدید کسری فشار بخار و افزایش نقش خشکیدگی جو در فرآیند تبخیر است. همچنین دمای میانگین حساسیت بیشتری کسب کرده است که می‌تواند ناشی از افزایش ماندگاری دماهای بالا در این منطقه خشک باشد. در مقابل، سهم تابش خالص تغییرات چشمگیری نشان نمی‌دهد که نشان‌دهنده پایداری نسبی الگوی انرژی تابشی در کرمان است. بنابراین، در این منطقه گرمایش اقلیمی از مسیر افزایش دما و تشدید خشکی جو بیشترین تأثیر را بر ET_p خواهد داشت. دمای بیشینه و رطوبت نسبی در هر دو دوره محرک اصلی حساسیت ET_p هستند و افزایش حساسیت رطوبت نسبی در دوره آینده بیانگر تشدید خشکیدگی جو تحت گرمایش اقلیمی است (Scheff and Frierson, 2014). پایداری سهم تابش خالص نشان‌دهنده ثبات الگوی انرژی سطحی و نقش غالب گرادیان اشباع بخار در کنترل تبخیر می‌باشد (Yang et al., 2019). در ایستگاه کرمانشاه، در دوره پایه تابش خالص و دمای بیشینه کنترل‌کنندگان اصلی حساسیت ET_p بوده‌اند، اما در دوره آینده سهم دمای میانگین و رطوبت نسبی افزایش قابل توجهی می‌یابد. این وضعیت نشان‌دهنده

انتقال مرکز کنترل تبخیر از ورود انرژی تابشی به فشار بخار و کمبود رطوبتی هوا است. همچنین کاهش سهم دمای کمینه در آینده بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش اختلاف دمای روز و شب است، که نشان‌دهنده تضعیف فرآیند تعدیل گرمایی (متعادل شدن دما در طول شبانه‌روز بر اثر تبادل گرما بین سطح زمین و جو) و برهم خوردن تعادل گرمایی شبانه‌روز در این منطقه‌ی کوهستانی است. همچنین این الگوی تغییراتی با پیش‌بینی افزایش دوره‌های خشکسالی و کاهش رطوبت نسبی در غرب ایران همسو است. الگوی انتقال کنترل ET_p از تابش خالص در دوره پایه به دما و کمبود رطوبتی هوا در دوره آینده مشاهده می‌شود (Tabari and Talaee, 2011). این الگو با افزایش فراوانی خشکسالی و کاهش رطوبت نسبی در غرب ایران همخوان است (Raziei et al., 2009). همچنین کاهش سهم دمای کمینه نشان‌دهنده کاهش اثر تعدیل حرارتی شبانه در اقلیم آینده است (McMahon et al., 2013). در ایستگاه مشهد، دمای بیشینه در هر دو دوره مهم‌ترین عامل کنترل ET_p باقی می‌ماند، اما سهم رطوبت نسبی و دمای میانگین در آینده نسبت به دوره پایه روندی افزایشی را نشان می‌دهد. این مسئله تأییدکننده نقش خشک‌تر شدن جو و تشدید گرمایش فصلی در منطقه است. در مقابل، تابش خالص و سرعت باد سهم کمتری در آینده دارند که احتمالاً به دلیل پایداری الگوی تابشی و کاهش آشفتگی جوی می‌باشد. بنابراین، افزایش ET_p در مشهد عمدتاً ناشی از افزایش تنش حرارتی و کاهش رطوبت هوا خواهد بود. دمای بیشینه در هر دو دوره عامل غالب در کنترل تبخیر-تعرق باقی می‌ماند که در اقلیم‌های خشک داخلی بسیار متداول است (Allen et al., 1998). افزایش حساسیت رطوبت نسبی و دمای میانگین نشان‌دهنده تشدید گرمایش و کاهش رطوبت جو است (Scheff and Frierson, 2014). در ایستگاه ساری، در دوره پایه تابش خالص بیشترین تأثیر را بر ET_p داشته است که با اقلیم مرطوب خزری سازگار است؛ اما در دوره آینده، سهم دمای بیشینه و رطوبت نسبی افزایش یافته و سهم تابش کاهش می‌یابد. این تحول بیانگر حرکت اقلیم منطقه از مرطوب - انرژی‌محور به سمت خشک‌تر - دما‌محور است. همچنین افزایش نقش دمای میانگین نشان می‌دهد که گرمایش میانگین سالانه به طور مستقیم فرآیند تبخیر را تشدید خواهد کرد. در ساری، نقش غالب تابش خالص در دوره پایه با اقلیم مرطوب خزری سازگار است (McMahon et al., 2013). اما افزایش حساسیت دمای بیشینه و رطوبت نسبی در آینده نشان‌دهنده حرکت اقلیم به سوی وضعیت خشک‌تر و دما‌محور است (Yang et al., 2019). در ایستگاه تبریز، دمای بیشینه در هر دو دوره عامل غالب در حساسیت ET_p باقی می‌ماند، اما سهم رطوبت نسبی در دوره آینده افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این مسأله نشان‌دهنده نقش فزاینده خشکی جو و کسری فشار بخار در افزایش تبخیر سطحی است. همچنین حساسیت سرعت باد در آینده اندکی افزایش یافته که می‌تواند نتیجه تشدید نوسانات جریانی در مناطق مرتفع باشد. بنابراین، افزایش ET_p در این منطقه بیشتر وابسته به افزایش دما و کاهش رطوبت خواهد بود تا تغییر در ورودی انرژی تابشی. در این ایستگاه غالبیت دمای بیشینه در هر دو دوره و افزایش حساسیت رطوبت نسبی در آینده نشان‌دهنده تشدید نقش کسری فشار بخار و گرمایش اقلیمی است (Scheff and Frierson, 2014). افزایش جزئی سهم باد می‌تواند به تغییر آشفتگی جوی در مناطق مرتفع مرتبط باشد (Vautard et al., 2010). در ایستگاه تهران، در دوره پایه دمای بیشینه و تابش خالص نقش اصلی را در تعیین حساسیت ET_p داشته‌اند؛ اما در دوره آینده، سهم رطوبت نسبی و دمای میانگین افزایش یافته و سهم تابش کاهش می‌یابد. این تغییر نشان‌دهنده تشدید خشکیدگی جو به دنبال افزایش دمای زمینه‌ای و کاهش رطوبت نسبی است. همچنین سهم سرعت باد در آینده کاهش یافته که می‌تواند ناشی از افزایش پایداری لایه مرزی در اقلیم شهری تهران باشد. این نتایج بیانگر آن است که در تهران، گرمایش اقلیمی و خشکی هوا دو محرک اصلی افزایش ET_p در آینده خواهند بود. کاهش سهم سرعت باد در دوره آینده می‌تواند با پدیده (کاهش باد سطح‌زمین) مرتبط باشد (Vautard et al., 2010). افزایش نقش دما و رطوبت نسبی در آینده بیانگر تقویت گرادیان اشباع بخار و گرمایش زمینه‌ای در فضای شهری است (Tabari and Talaee, 2011). به‌طور خاص، عناصر اقلیمی مانند دما، رطوبت نسبی، تابش و باد تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع، فاصله از دریا، ناهمواری سطح زمین و نوع پوشش سطحی رفتار متفاوتی دارند. برای مثال، در ایستگاه‌های ساحلی مانند بندرعباس، رطوبت بالا و گرادیان گرمایی بین خشکی و دریا موجب افزایش نقش دما و باد در تبخیر می‌شود، در حالی که در مناطق کوهستانی نظیر کرمانشاه یا تبریز، تابش خالص و نوسانات دمای روزانه عامل تعیین‌کننده‌تر هستند. در نواحی خشک مرکزی همچون کرمان و مشهد نیز کاهش رطوبت نسبی و دمای بالاتر، حساسیت مدل‌ها را به دما و کسری فشار بخار افزایش می‌دهد. بنابراین، تفاوت نتایج هر ایستگاه بازتابی از تنوع انرژی سطحی، شرایط رطوبتی و فرآیندهای جوی محلی در پهنه اقلیمی ایران است. در نتایج حاصله دمای بیشینه اثر بیشتری نسبت به دمای کمینه و میانگین را نشان داده است که این می‌تواند به علت رابطه‌ی نمایی بین دما و فشار بخار اشباع باشد. طبق رابطه ۱۲ (Allen et al., 1998)



$$\left(\frac{17/27 T}{T+237/3}\right) \exp 0/6108=e_s$$

فشار بخار اشباع افزایش می‌یابد. به همین دلیل افزایش دمای بیشینه (مثلاً از ۳۰ به ۳۱ درجه سانتی‌گراد) فشار بخار اشباع را بیش از حد متناسب افزایش می‌دهد. در حالی که کاهش دمای کمینه (مثلاً از ۱۵ به ۱۴ درجه سانتی‌گراد) اثر بسیار کوچکتري دارد. بنابراین دمای بیشینه تأثیر بیشتری بر فشار بخار اشباع و Δ دارد. دلیل دیگر می‌تواند به علت تأثیر بر کمبود فشار بخار باشد، یعنی در طول روز وقتی دما به بیشینه می‌رسد رطوبت نسبی معمولاً کمینه است و در نتیجه $e_s - e_a$ بیشینه می‌شود. افزایش دمای بیشینه باعث افزایش شدید کمبود فشار بخار می‌شود و تبخیرتغرق بیشتر می‌شود و برعکس، دمای کمینه معمولاً در شب اتفاق می‌افتد که تبخیرتغرق ناچیز است. دمای میانگین از میانگین دمای بیشینه و کمینه است اگر تنها دمای میانگین افزایش یابد، این افزایش بین روز و شب توزیع می‌شود اما اگر دمای بیشینه زیاد شود در حالی که دمای کمینه ثابت باشد تبخیر در زمان‌های پر انرژی روزانه (وقتی تابش خورشید زیاد است) افزایش می‌یابد، دقیقاً همان ساعتی که تبخیرتغرق کنترل کننده مصرف آب گیاه است.

الگوهای کلی حساسیت در مناطق خشک و نیمه‌خشک

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تبخیرتغرق پتانسیل عمدتاً تحت کنترل دمای بیشینه و رطوبت نسبی قرار دارد. محدودیت رطوبتی و افزایش کسری فشار بخار سبب تقویت نقش متغیرهای ترمودینامیکی در کنترل ET_P می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که در این مناطق، تبخیر بیشتر تابع شرایط جو است تا انرژی تابشی.

الگوهای کلی حساسیت در مناطق مرطوب و ساحلی

در مناطق مرطوب و ساحلی، تابش خالص عامل غالب کنترل تبخیرتغرق در دوره پایه است. رطوبت نسبی بالا باعث تعدیل اثر دما و محدود شدن کسری فشار بخار می‌شود. با این حال، در دوره آینده نقش دما افزایش یافته و کنترل ET_P به تدریج از حالت صرفاً انرژی‌محور فاصله می‌گیرد.

الگوهای کلی حساسیت در مناطق کوهستانی

در مناطق کوهستانی، حساسیت ET_P ناشی از اثر هم‌زمان تابش خالص و متغیرهای دمایی است. اختلاف دمای شبانه‌روزی در دوره پایه نقش مهمی در تنظیم تبخیرتغرق دارد. کاهش سهم دمای کمینه در آینده بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها و تضعیف تعدیل حرارتی است.

انتقال غالبیت از تابش به دما و رطوبت تحت تغییر اقلیم

نتایج نشان‌دهنده انتقال تدریجی کنترل ET_P از تابش خالص به دما و رطوبت نسبی در دوره آینده است. افزایش دما و کاهش رطوبت جو موجب تقویت کسری فشار بخار می‌شود. این تغییر بیانگر دگرگونی سازوکارهای کنترل تبخیرتغرق تحت گرمایش اقلیمی است.

مقایسه رفتار سه مدل ET_P از دیدگاه حساسیت

مدل پنمن-مانیتث فائو ۵۶ حساسیت متعادلی به متغیرهای انرژی و آئروپدینامیکی نشان می‌دهد. مدل رومانکو بیشتر به دما و رطوبت وابسته بوده و در اقلیم‌های خشک واکنش قوی‌تری دارد. روش تام-الپور نیز عمدتاً تابش‌محور است و برای مناطق مرطوب مناسب‌تر به نظر می‌رسد.

پیامدهای نتایج برای مدیریت آب و مدل‌سازی

افزایش حساسیت ET_P به متغیرهای دمایی در آینده می‌تواند منجر به افزایش تقاضای آبی، به‌ویژه در مناطق خشک شود. این موضوع ضرورت بازنگری در برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت آبیاری را برجسته می‌کند. نتایج همچنین بر اهمیت انتخاب مدل ET_P متناسب با شرایط اقلیمی منطقه تأکید دارد.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که حساسیت تبخیرتغرق پتانسیل در ایران به‌طور عمده تحت کنترل متغیرهای ترمودینامیکی، به‌ویژه دمای بیشینه و رطوبت نسبی قرار دارد و این کنترل در دوره آینده تقویت می‌شود. غالب بودن دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه و میانگین، ناشی از رابطه نمایی بین دما و فشار بخار اشباع و تشدید کسری فشار بخار در ساعات پرانرژی روز است، زمانی که تبخیرتغرق بیشترین

شدت را دارد. افزایش سهم رطوبت نسبی در بسیاری از ایستگاه‌ها بیانگر نقش فزاینده خشک شدن جو و انتقال جرم بخار در شرایط گرمایش اقلیمی است. در مقابل، کاهش یا ثبات سهم تابش خالص و سرعت باد در آینده، با پایداری نسبی الگوی انرژی تابشی و کاهش آشفته‌گی لایه مرزی سازگار بوده و در برخی مناطق می‌تواند با پدیده کاهش باد سطحی مرتبط باشد. نتایج همچنین نشان‌دهنده انتقال سازوکار غالب کنترل تبخیرتعرق از ورودی انرژی تابشی به گرادیان دما و فشار بخار تحت سناریوهای تغییر اقلیم است. این تغییر سازوکار حاکی از آن است که افزایش تبخیرتعرق آینده در ایران بیش از آنکه ناشی از افزایش انرژی دریافتی باشد، حاصل تشدید گرمایش و کاهش رطوبت جو خواهد بود. در مجموع، یافته‌ها بر لزوم توجه ویژه به متغیرهای دمایی و رطوبتی در مدل‌سازی تبخیرتعرق و مدیریت منابع آب تحت شرایط اقلیمی آینده تأکید دارند. یافته‌های این پژوهش چهارچوبی کمی و مبتنی بر شواهد برای اولویت‌بندی نظارت بر متغیرهای اقلیمی و بهینه‌سازی مدل‌های برآورد ET_P در سناریوهای تغییر اقلیم ایران را فراهم می‌کند و لزوم گذار از مدل‌سازی یکسان به سمت رویکردهای منطقه‌ای و مبتنی بر سازوکار غالب کنترل‌کننده تبخیرتعرق را آشکار می‌سازد.

پیشنهادهای

- ۱- استفاده از روش تحلیل حساسیت سوبل در سایر مدل‌های تبخیرتعرق و در مقیاس‌های زمانی روزانه و ساعتی
- ۲- واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی موجود در مناطق خشک با تمرکز بر دو متغیر دمای بیشینه و رطوبت نسبی
- ۳- بازنگری سیاست‌های مدیریت آب باید بر مبنای افزایش کسری فشار بخار ناشی از خشک شدن جو در مناطق مرکزی و شرقی کشور
- ۴- مقایسه نتایج با داده‌های لایسیمتر و اندازه‌گیری‌های میدانی در آینده جهت تدقیق مدلها
- ۵- انجام تحلیل حساسیت با استفاده از مجموعه گسترده‌تری از مدل‌های اقلیمی و روش‌های کاهش عدم قطعیت، برای بهبود دقت برآورد شرایط آینده
- ۶- برای مناطق شمالی (مانند ساری) که انتقال از حساسیت تابش‌محور به دما محور پیش‌بینی می‌شود، استفاده از مدل‌های ET_P مبتنی بر انرژی مانند Penman-Monteith نسبت به مدل‌های مبتنی بر دما مانند Romanenko در بلندمدت ضروری‌تر به نظر می‌رسد.

REFERENCES

- 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.
- Diop, S., Durand, J.-L., Morand, S., & Alimi, F. (2023). Four-component net radiometers to quantify albedo and heat fluxes in conservation agriculture. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4, 678. doi: 10.1038/s43017-023-00432-x.
- Djaman, K., Irmak, S., & Rathje, W. R. (2015). Comparison of the FAO-56 Penman-Monteith and other evaporation estimation methods under limited data conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 141(3), 04014068.
- Herman, J. D., Kollat, J. B., Reed, P. M., & Wagener, T. (2013). Technical note: Method of Morris effectively reduces the computational demands of global sensitivity analysis for distributed watershed models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 5109–5125. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2893-2013>, 2013.
- Iooss, B., & Lemaître, P. (2015). Sobol' sensitivity analysis: A tool to guide the development and use of models. *Environmental Modelling & Software*, 67, 1–13.
- Manzo, L., & Trishchenko, A. (2025). Improved representations of longwave surface emissivity to better estimate surface radiation fluxes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 130.
- McMahon, T. A., Peel, M. C., Lowe, L., Srikanthan, R., & McVicar, T. R. (2013). Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: A pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), 1331–1363. <https://doi.org/10.5194/hess-17-1331-2013>.
- McVicar, T. R., Roderick, M. L., Donohue, R. J., Li, L. T., Van Niel, T. G., Thomas, A., Grieser, J., Jhajharia, D., Himri, Y., Mahowald, N. M., Mescherskaya, A. V., Kruger, A. C., & Dinpashoh, Y. (2012). Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near-surface wind speeds: Implications for evaporation. *Journal of Hydrology*, 416–417, 182–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.024>.
- Phan Thi Ha, Le Van Trung, Nguyen Thi Thu Ha, Nguyen Thanh Long, & Hoang Thi Thu Hang. (2023). Trends of reference evapotranspiration and their sensitivity to meteorological parameters in Southeastern



- Vietnam using improved Sen trend analysis and Sobol method. *Earth Science Informatics*, 17, 325–342. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01176-4>.
- Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J. W., Rougier, J., Stephenson, D. B., & Wagener, T. (2016). Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow. *Environmental Modelling & Software*, 79, 214–232. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.008>.
- Razavi, S., & Gupta, H. V. (2016). A new framework for comprehensive, robust, and efficient global sensitivity analysis: 1. Theory. *Water Resources Research*, 52(1), 423–439. <https://doi.org/10.1002/2015WR017558>.
- Raziei, T., Saghaian, B., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in Western Iran. *Water Resources Management*, 23(3), 439–455. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9282-4>.
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Crespo Cuaresma, J., K.C., S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., Ebi, K., ... Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.10.009>.
- Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259–270. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- Saltelli, A., Tarantola, S., Campolongo, F., & Ratto, M. (2008). Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models. *John Wiley & Sons*. doi: 10.1002/0470870958
- Scheff, J., & Frierson, D. M. W. (2014). Scaling potential evapotranspiration with greenhouse warming. *Journal of Climate*, 27(4), 1539–1558. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00233.1>.
- Sobol, I. M. (2001). Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates. *Mathematics and Computers in Simulation*, 55(1-3), 271–280. [https://doi.org/10.1016/S0378-4754\(00\)00270-6](https://doi.org/10.1016/S0378-4754(00)00270-6).
- Sobol', I. M. (1993). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modeling and Computational Experiments*, 1(4), 407–414.
- Tabari, H., & Hosseinzadehtalaei, P. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. *Global and Planetary Change*, 79(1–2), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2011.07.008>.
- Vautard, R., Cattiaux, J., Yiou, P., Thépaut, J.-N., & Ciais, P. (2010). Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness. *Nature Geoscience*, 3(11), 756–761. <https://doi.org/10.1038/ngeo979>.
- Verma, M., Fisher, J. B., Mallick, K., Ryu, Y., Kobayashi, H., Guillaume, A., Moore, G., Ramakrishnan, L., Hendrix, V., Wolf, S., Sikka, M., Kiely, G., Wohlfahrt, G., Gielen, B., Rouspard, O., Toscano, P., Arain, A., & Cescatti, A. (2016). Global Surface Net-Radiation at 5 km from MODIS Terra. *Remote Sensing*, 8(9), 739. <https://doi.org/10.3390/rs8090739>.
- Vremec, M., Collenteur, R. A., & Birk, S. (2024). PyEt v1.3.1: A Python package for the estimation of potential evapotranspiration. *Geoscientific Model Development*, 17(18), 7083–7103. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-7083-2024>, 2024.
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2005). Evaluation of three complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate actual regional evapotranspiration in different climatic regions. *Journal of Hydrology*, 308(1–4), 105–121. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.024>.
- Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, Sh., & Javan, Kh. (2023). Seasonal analysis of reference evapotranspiration and its sensitivity to meteorological elements in Iran. *Journal of Water and Soil (Ab va Khak)*, 37(4), 643–657. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.83328.1307>.
- Yang, Y., Roderick, M. L., Zhang, S., McVicar, T. R., & Donohue, R. J. (2019). Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections. *Nature Climate Change*, 9(1), 44–48. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0361-0>.
- Zeng, P., Sun, F., Liu, Y., & Feng, Y. (2021). Changes of potential evapotranspiration and its sensitivity across China under future climate scenarios. *Atmospheric Research*, Article 105763. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105763>.

ضمیمه

بخشی از کد تهیه شده پایتون برای تحلیل حساسیت به روش Sobol و استفاده از بسته PyET (روش روماننکو)

```
import pyet
from SALib.sample import saltelli
from SALib.analyze import sobol
lat = float(input("latitude : "))
elev = float(input("elevation : "))
file = pd.read_excel("meteo.xlsx",index_col=0)
file.columns=['tmean','tmax','tmin','rh','rs','wind']
tmean, tmax, tmin, rh, rs, wind = (file[col] for col in file.columns)
ro=pyet.romanenko(tmean,rh)
def romanenko():
    problem = {'num_vars': 2,'names': ['tmean', 'rh'],'bounds': [[min(tmean),max(tmean)],[min(rh),max(rh)]]}
    def process_function(params):
        tmean, rh=params
        return pyet.romanenko(tmean,rh)
    param_values=saltelli.sample(problem, 1024)
    output_values = [process_function(params) for params in param_values]
    sobol_indices = sobol.analyze(problem, np.array(output_values))
    print("First-Order Sobol Indices:")
    for name, sensitivity_index in zip(problem['names'], sobol_indices['S1']):
        print(f"{name}: {sensitivity_index}")
    print("\nTotal Sobol Indices:")
    for name, sensitivity_index in zip(problem['names'], sobol_indices['ST']):
        print(f"{name}: {sensitivity_index}")
    with open ("sobol.txt",'a') as f:
        print ("romanenko - "+f"{name}: {sensitivity_index}",file=f)
    romanenko()
data={"ro":ro }
df = pd.DataFrame(data)
df.to_excel('example.xlsx', index=True)
```