

Investigating Temporal and Spatial Changes in Potential Evapotranspiration in East Azerbaijan Province Using MODIS Sensor Images

Zahra Rosta¹, Mahdi Mohebbiyan², Saeed Samadianfard³

1- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: zhrarwosta.912@gmail.com

2- Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: mohebbiyan@yahoo.com

3-Corresponding Author, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: s.samadian@tabrizu.ac.ir

Received: April 29, 2025

Revised: June 1, 2025

Accepted: June 1, 2025

Published: June 2, 2025

Extended Abstract

Background and Objectives

Potential evapotranspiration (PET) serves as a critical indicator of water balance and environmental health, prominently impacting agricultural productivity, water resource management, and ecological sustainability. In arid and semi-arid regions like East Azerbaijan province, understanding PET variations is crucial for effective resource management and planning. So, the objective of this research is to delineate and assess climatic zones within East Azerbaijan province regarding their potential evapotranspiration rates. This involves examining spatial differences and temporal trends across key locations within the province. By gathering data over multiple years, this study aims to identify patterns that can inform water resource management strategies and agricultural practices in the region.

Methodology

The study utilize MODIS satellite data, renowned for its high spatial and temporal resolution, to evaluate PET across key meteorological stations within East Azerbaijan province. These stations include Hashtrood, Bonab, Jolfa, Kaleybar, Marand, Maragheh, Mianeh, Sahand, Sarab, and Tabriz, providing a comprehensive coverage of diverse climatic zones. Data collection involved extracting PET values over a 20-year period, from 2005 to 2024, with data originally provided in 8-day intervals. To transform these into daily data points suitable for fine-scale analysis, advanced data processing techniques, including a Kalman filter for noise reduction and a cubic spline interpolation method for data densification were employed. These methods were implemented through custom coding in the Python environment within Google Earth Engine, enhancing data usability for detailed climatic analysis. For spatial representation, ArcGIS software was used to perform geostatistical analysis, employing Kriging and Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation techniques. These methodologies enable the transformation of point data into spatial maps, considering the intricate spatial heterogeneity of PET across the province. By creating annual PET maps for key years (2005, 2010, 2015, 2020, and 2024), the study identifies trends and spatial variations significant for regional planning and management.

Results

The spatial and temporal analysis of PET across East Azerbaijan Province reveals significant and varied patterns. Notably, Jolfa exhibited the highest mean annual PET values, consistently exceeding 800 mm/year, indicating distinct climatic conditions compared to other regions. In contrast, stations like Sarab and Kaleybar recorded lower annual PET values, averaging around 600 mm/year, which can be attributed to their higher altitudes and

corresponding cooler climate. A comparative analysis of PET between 2005 and 2024 highlights a noticeable increase across all stations, with an average rise of 1.5% per year. This increment is particularly pronounced in lower altitude stations such as Bonab and Mianeh, where PET values have increased approximately 30% over the two decades. These variations suggest an escalating evaporative demand, potentially stressing local water resources. Furthermore, the PET rise aligns with increased temperatures and variable precipitation patterns observed in the region, underscoring shifts induced by climatic change. Specifically, Tabriz and Marand showed marked sensitivity to climatic changes, with notable variations in potential evapotranspiration (PET) closely tracking annual temperature changes greater than 0.3 °C. The impact of urbanization and agriculture is evident in stations like Maragheh and Marand, where increased PET values align with expansive agricultural practices and urban expansion. In terms of temporal trends, the period from 2015 to 2020 marked the most significant changes, with PET increases reaching their highest levels during drought years, corroborating the strong influence of water availability and climatic extremes on evapotranspiration rates. The integration of MODIS data and refined interpolation methods such as Kriging provided highly accurate PET maps, with a standard deviation of less than 5% from observed values in field trials. This precision empowers robust spatial analysis, crucial for resource allocation and environmental management.

Conclusion

The comprehensive study conducted on the PET across East Azerbaijan Province reveals an increasing trend from 2005 to 2024. This trend is of particular concern, as it indicates a significant shift in the region's climatic behavior, with implications for both ecological stability and resource management. The rise in PET values can largely be attributed to factors such as climate change, characterized by increased temperatures and altered precipitation patterns, which intensify evaporation processes. Human activities also play a substantial role in this upward trend. Urban expansion, deforestation, and changes in land use have altered surface conditions, subsequently affecting local microclimates and evaporation rates. Additionally, the study highlights the important role of technological advancements, such as the use of MODIS sensor data, in monitoring and analyzing spatial and temporal changes in climatic parameters like PET. By employing sophisticated interpolation methods like Kriging and IDW through ArcGIS, the research offers precise zoning of climatic zones, facilitating targeted interventions.

Key words: Arc GIS, East Azerbaijan province, Inverse distance weighting, MODIS, Potential evapotranspiration, Satellite data, Zoning.

Author Contributions

Conceptualization, Z.R. and S.S.; methodology, Z.R. and M.M.; software, Z.R. and M.M.; validation, M.M. and S.S.; formal analysis, Z.R. and M.M.; investigation, Z.R. and M.M.; resources, S.S.; data curation, Z.R. and M.M.; writing—original draft preparation, Z.R. and M.M.; writing—review and editing, S.S.; visualization, Z.R. and M.M.; supervision, S.S.; project administration, S.S.; All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to sincerely thank the anonymous reviewers for their valuable comments and constructive suggestions, which greatly contributed to improving the quality of this manuscript. The authors also wish to express their gratitude to the editor for their guidance and support throughout the review process.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Cite this article: Rousta, Z., Mohebbiyan, M. & Samadianfard, S. (2025). Investigating temporal and spatial changes in potential evapotranspiration in East Azerbaijan province using MODIS sensor images. *Journal of Soil and Plant Science*, 35(1), 85–104.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67047.1007>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2025 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz

OPEN  ACCESS
JOURNALS



نشریه دانش خاک و گیاه، جلد ۳۵، شماره ۱، صفحه‌های ۶۷ تا ۸۴، بهار ۱۴۰۴

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67047.1007>

Online ISSN: 3092-6106

<https://sps.tabrizu.ac.ir>



مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده مودیس

زهره روستا^۱ , مهدی محبیان^۲ , سعید صمدیان فرد^۳ 

۱- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: zhrarwosta.912@gmail.com

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: mohebbiyan@yahoo.com

۳- نویسنده مسئول، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: s.samadian@tabrizu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۱	تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

چکیده

تبخیر-تعرق پتانسیل در ارزیابی تغییرات اقلیمی و حفظ زیست‌بوم‌ها نقش مهمی دارد و می‌تواند به پیش‌بینی وضعیت منابع آب و تعیین نیاز آبی گیاهان کمک کند. هدف پژوهش حاضر، پهنه‌بندی تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی است که به شناسایی و تحلیل پهنه‌های اقلیمی از نظر تبخیر-تعرق پتانسیل و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن در هر پهنه می‌پردازد. برای این کار، داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل ایستگاه‌های هشت‌رود، بناب، جلفا، کلیبر، مرند، مراغه، میانه، سهند، سراب و تبریز به‌عنوان ایستگاه‌های معرف در سطح استان آذربایجان شرقی از سنجنده مودیس با استفاده از کدنویسی در محیط گوگل ارث تهیه گردید. سپس، برای تبدیل فواصل زمانی ۸ روزه به داده‌های روزانه، از فیلتر کالمن و روش اسپیلاین مکعبی بهره گرفته شد. در ادامه، میانگین داده‌های پردازش‌شده محاسبه و تبخیر-تعرق پتانسیل در فواصل زمانی ۵ ساله از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ به دست آمد. در نهایت، داده‌های مرتب شده با روش‌های درون‌یابی کریجینگ و وزن‌دهی معکوس فاصله با استفاده از برنامه ArcGIS پهنه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد که شهرستان جلفا واقع در شمال غرب استان، به‌طور مداوم دارای بالاترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل بوده‌است. این روند ثابت نشان‌دهنده شرایط اقلیمی خاص و ویژگی‌های جغرافیایی این منطقه است که باعث افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل در این منطقه می‌شود. به‌طور کلی، نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی قابل‌توجهی در مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی در بازه زمانی مورد مطالعه از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ بود. این افزایش می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی و تغییرات الگوی بارش باشد.

واژه‌های کلیدی: Arc GIS، وزن‌دهی معکوس فاصله، استان آذربایجان شرقی، پهنه‌بندی، تبخیر-تعرق پتانسیل، داده‌های ماهواره‌ای، مودیس.

استناد به این مقاله: روستا، ز.، محبیان، م. و صمدیان فرد، س. (۱۴۰۴). بررسی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر-تعرق پتانسیل

در استان آذربایجان شرقی با بهره‌گیری از تصاویر سنجنده مودیس. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۵ (۱)، ۸۵-۱۰۴.

<https://doi.org/10.22034/sps.2025.67047.1007>

مقدمه

امروزه کم آبی یکی از عوامل تهدیدکننده امنیت اقتصادی و اجتماعی جهان و خصوصاً کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه خشک محسوب می شود (Gleick, 2014). حدود ۷۵ درصد از کل بارندگی سالانه در سطح کره زمین دوباره به صورت تبخیر و تعرق به جو برمی گردد (Baiybordi, 2003). در اقلیم های نیمه خشک جایی که منابع آب به وسیله بهره برداری بیش از حد از منابع آبی به خطر افتاده، ضروری است که نیاز آبی گیاه با بیشترین دقت برآورد گردد. در علم آبیاری، برآورد دقیق نیاز آبی گیاهان زراعی و محصولات باغی رکن طراحی و محاسبات مهندسی به شمار می رود (Haghizadeh et al., 2019). تبخیر و تعرق دو فرایند کلیدی در چرخه آب هستند که به انتقال آب از سطح زمین به جو کمک می کنند. تبخیر به معنای تبدیل آب مایع به بخار آب در جو است (Verstraeten et al., 2005; Allen et al., 1998). این فرایند می تواند از سطح آب، مانند دریاها، دریاچه ها و رودخانه ها، یا از سطح خاک انجام شود. تعرق به خروج بخار آب از گیاهان به جو از طریق روزنه های برگ اشاره دارد. این فرایند به دو نوع تقسیم می شود: تبخیر-تعرق پتانسیل^۱ (PET)، حداکثر مقدار آب بخار شده از سطح خاک و پوشش گیاهی در شرایط عدم محدودیت آب می باشد و تبخیر-تعرق واقعی (ET_a) که میزان واقعی تبخیر-تعرق تحت تأثیر محدودیت های آب و شرایط محیطی قرار دارد.

برآورد تبخیر-تعرق با استفاده از سنجنده مودیس (MODIS) به دلیل دقت بالا و قابلیت پوشش وسیع جغرافیایی، امکان تحلیل دقیق تری از الگوهای تبخیر-تعرق در مناطق مختلف را فراهم می کند. همچنین، با استفاده از داده های سنجنده MODIS، می توان به راحتی تغییرات زمانی و مکانی تبخیر-تعرق را شناسایی کرد و این اطلاعات به پهنه بندی دقیق تری منجر می شود که در مدیریت منابع آب و کشاورزی بسیار مفید است. سنجنده MODIS با ارائه تصاویر با وضوح بالا و داده های اقلیمی، امکان ارزیابی و برآورد تبخیر-تعرق را تسهیل می کند و به این ترتیب، پهنه بندی مناطق با نیازهای آبی متفاوت را ممکن می سازد. چنانچه تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق درست تخمین زده نشود، تنش های محیط زیستی شدیدی را به وجود می آید. از این رو برآورد دقیق آن در مطالعاتی همچون تغییر اقلیم جهانی، تکامل محیطی و کنترل منابع آب نقش مهمی ایفا می کند (Liu et al., 2010).

PET با ویژگی های رویه زمین، رطوبت نسبی، سرعت باد، دما و تابش خورشیدی در ارتباط است که مقدار آن را می توان با استفاده از داده های هواشناسی و معادلات تبخیر-تعرق در مناطق مختلف به دست آورد (Babamiri et al., 2021). در مقیاس های منطقه ای و جهانی برداشت چنین اطلاعاتی توسط ایستگاه های زمینی عملاً غیرممکن است، محققان برای برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در پهنه های مختلف از روش های پهنه بندی و زمین آماری استفاده می کنند. پهنه بندی PET به عنوان یکی از مؤلفه های عمده در بیان آب و مدیریت منابع آبی، از اهمیت بالایی برخوردار می باشد (Nam et al., 2015).

Geo et al. (2017) تغییرات مکانی و زمانی PET را در سراسر چین بررسی و مشاهده کردند که PET فصلی و سالانه در چین روند کاهشی داشته است. Sharghi et al. (2010) در پژوهشی PET در استان یزد را محاسبه کرده و سپس با برقراری ارتباط بین پارامتر ET با ارتفاع و همچنین روش عکس مجذور فاصله نقشه های مقادیر تبخیر-تعرق گیاه مرجع را در سطح استان پهنه بندی کرده اند. RezaieBanafshe et al. (2018) پهنه بندی داده های فرآورده ی تبخیر-تعرق پتانسیل استان آذربایجان شرقی را با هدف شناسایی پهنه های اقلیمی از نظر تبخیر-تعرق پتانسیل و بررسی تغییرات مکانی و زمانی آن در هر پهنه انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد که تبخیر-تعرق پتانسیل در استان از لحاظ مکانی به چهار پهنه ی همگن تقسیم می شود. این چهار پهنه، تغییرات مکانی تبخیر-تعرق پتانسیل را به خوبی بازتاب می دهند و الگوهای مشخصی را در مناطق مختلف نشان می دهند. این یافته ها تأکیدی بر وجود ارتباط منظم و قابل پیش بینی میان شرایط اقلیمی و تبخیر-تعرق پتانسیل در هر پهنه دارند. (Amiri & PourGhasemi, 2019) با هدف

^۱-Potential evapotranspiration

بررسی زمانی روش‌های مختلف محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل شامل تورنت‌وایت، بلانی-کریدل و هارگریوز-سامانی، و بررسی تغییرات مکانی آن در حوزه آبخیز مهارلو در استان فارس پژوهشی انجام دادند. برای این کار آمار سالانه درجه حرارت در یک دوره آماری ۱۲ ساله (۲۰۰۲-۲۰۱۳) و ۱۲ ایستگاه هواشناسی در حوزه آبخیز مهارلو استفاده گردید. به‌منظور پهنه‌بندی تبخیر-تعرق و بررسی تغییرات مکان آن از روش میان‌یابی عکس مجذور فاصله (IDW) در نرم‌افزار ArcGIS استفاده گردید. نتایج ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر-تعرق نشان داد که در مجموع روش بلانی-کریدل به دلیل پایین بودن میزان خطا نسبت به روش‌های هارگریوز-سامانی و تورنت‌وایت، بهترین روش تبخیر-تعرق پتانسیل می‌باشد.

Mohammadi et al. (2010) در تحقیقی با عنوان برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل در ایستگاه‌های اصفهان به این نتیجه رسیدند که روش بلانی-کریدل نسبت به سایر روش‌های تورنت‌وایت و معادله لاری جانسون بسیار نزدیک به تشنگ تبخیر بوده به‌طوری‌که در ماه‌های مختلف از همبستگی خوبی برخوردار است. همچنین نتایج حاصل از پهنه‌بندی میزان تبخیر-تعرق در سطح استان اصفهان نشان داد که از غرب به شرق و از جنوب به شمال بر میزان تبخیر-تعرق افزوده می‌شود. (Akbari et al. 2011) PET و ET_a را در شرایط اقلیمی مختلف به کمک سنجش از دور برآورد کرده و با مقایسه‌ی نتایج آن با دو روش برآورد ET هارگریوز و پنمن-مانتیث در هر سال نشان داده‌اند که نتایج به‌دست آمده از روش سنجش‌ازدور مطابقت خوبی با برآوردهای حاصل از روش‌های محاسباتی دارد که نشان‌دهنده‌ی امکان استفاده از تکنیک سنجش از دور برای تخمین ET مکانی در سطوح مختلف مزرعه و شبکه‌های آبیاری می‌باشد. (Zareabayneeh et al. 2011) در پژوهشی پهنه‌بندی تبخیر-تعرق مرجع روزانه را برای مناطق مختلف ایران انجام دادند. نتایج آنها نشان داد که تبخیر-تعرق مرجع برای منطقه شمال غربی ایران بین $2/45$ تا $4/48$ میلی‌متر بر روز می‌باشد. (Jafarishendi et al. 2019) به بررسی تغییرات زمانی تبخیر-تعرق واقعی و ارتباط آن با دما و بارش در استان آذربایجان شرقی با استفاده از فرآورده‌ی دورسنجی مودیس ترا (Terra) پرداختند. برای این کار از داده‌های فرآورده دورسنجی MOD16A2 سنجنده مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۴ استفاده شد. در این پژوهش، علاوه‌بر داده‌های فرآورده MOD16A2، داده‌های دماهای بیشینه، کمینه، و بارش ۱۱ ایستگاه همدید استان نیز به‌کار گرفته شد. هدف از این پژوهش مقایسه مقادیر ET_a پایگاه ntsg با دما و بارش استان بود. نتایج نشان داد که همبستگی خطی دماهای بیشینه و دمای کمینه با تبخیر-تعرق واقعی یاخته نماینده ایستگاه‌ها به‌صورت مستقیم و منفی بوده و با افزایش هر $1^\circ C$ دما، مقدار تبخیر-تعرق واقعی به اندازه $0/02$ میلی‌متر در روز کاهش می‌یابد. (Haghizadeh et al. 2019) با هدف ارائه یک مدل ساده و در عین حال کاربردی و دقیق جهت محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل پژوهشی انجام دادند تا با استفاده از این مدل و عناصر اقلیمی مؤثر در تبخیر، میزان تبخیر صورت گرفته از سطوح محاسبه شود. در این تحقیق از مدل Gep استفاده شده و از آمار تشنگ تبخیر به‌عنوان متغیر تابع و از فاکتورهای دما، کسری اشباع، سرعت باد و رطوبت نسبی به‌عنوان متغیرهای مستقل استفاده گردیده است. از آمار ایستگاه‌های اسلام‌آباد غرب، روانسر، سرپل ذهاب، کرمانشاه و کنگاور به‌عنوان ایستگاه‌های معرف در سطح استان و متغیرهای مستقل استفاده شد. نتایج حاصل از پهنه‌بندی میزان تبخیر و تعرق در سطح استان کرمانشاه نشان داد که از شرق به غرب و از شمال به جنوب، بر میزان تبخیر-تعرق افزوده می‌شود.

Ahmadi et al. (2016) از آمار پارامترهای اقلیمی دوازده ایستگاه هواشناسی واقع در شمال شرق کشور، برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع براساس مدل‌های تجربی پاپاداکیس و پنمن-مونتیث-فائو استفاده کردند. خروجی مدل‌ها براساس روش‌های مختلف درون‌یابی ارزیابی و سپس نتایج روش کوکریجینگ با RMSE کمتر در محیط نرم‌افزار ArcGIS، به صورت پهنه‌های هم تبخیر-تعرق مرجع مشخص گردید. نتایج نشان داد که بیشترین و کمترین تبخیر-تعرق مرجع به‌ترتیب، در ایستگاه‌های واقع در استان‌های خراسان جنوبی و شمالی رخ می‌دهد. تبخیر-تعرق

مرجع کل منطقه در مقیاس سالانه، از شمال به جنوب روندی افزایشی دارد. ارتفاع و عرض جغرافیایی در تعیین پهنه‌های هم تبخیر-تعرق مرجع از وزن بیشتری برخوردار بودند. بنابراین، عامل اصلی افزایش تبخیر-تعرق مرجع در منطقه، روند افزایشی پارامترهای کمینه دما، بیشینه دما و ساعات آفتابی بوده و در اولویت دوم، تغییرات افزایشی و کاهش‌ی پارامترهای رطوبت نسبی، بارش و سرعت باد نیز حائز اهمیت می‌باشد.

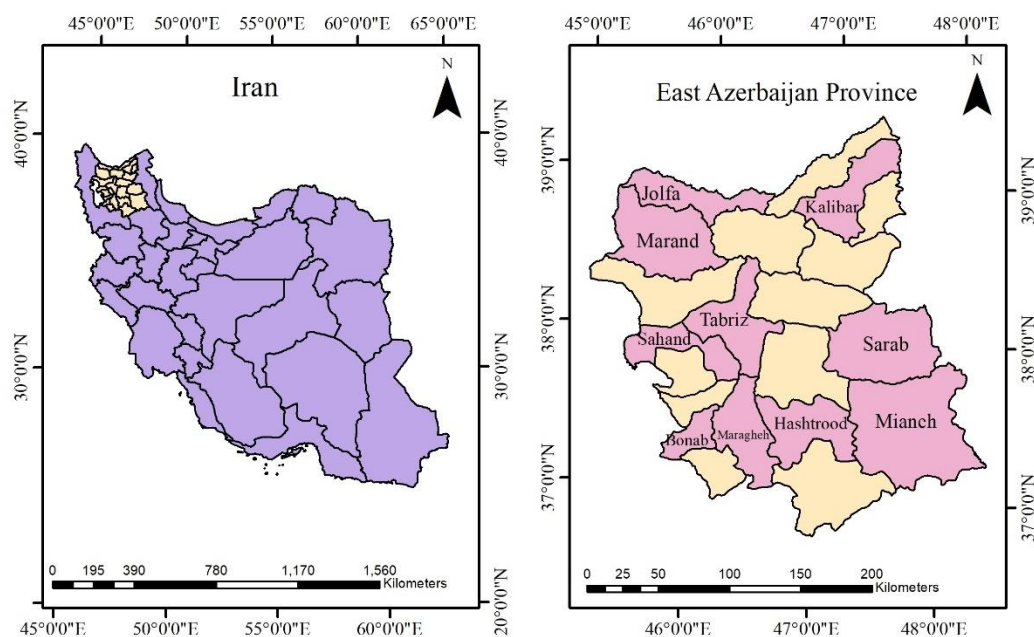
در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس، به بررسی تبخیر-تعرق پتانسیل در ۱۰ شهرستان استان آذربایجان شرقی پرداخته شده است. با کدنویسی در محیط گوگل ارث انجین، داده‌های مربوط به تبخیر-تعرق پتانسیل از سنجنده مودیس استخراج شده و تغییرات مکانی و زمانی آن در طول دوره ۲۰ ساله مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS، که یک سامانه اطلاعات جغرافیایی برای تجزیه و تحلیل و مدیریت داده‌های مکانی است، پهنه‌بندی تبخیر-تعرق پتانسیل انجام شد و الگوهای تغییرات سالانه آن شناسایی و مورد تحلیل قرار گرفت. این مطالعه می‌تواند به درک بهتر از وضعیت منابع آب و مدیریت بهینه آن‌ها در مناطق مورد مطالعه کمک کند.

همچنین، نوآوری‌های قابل‌توجهی در روش پهنه‌بندی تبخیر-تعرق پتانسیل صورت گرفته است. به دلیل کمبود مطالعات جامع در زمینه تبخیر-تعرق پتانسیل، به‌ویژه در استان آذربایجان شرقی، و نبود تحقیقات در سال‌های اخیر، این مقاله تلاش می‌کند که خلأ موجود در این حوزه را پر کند. همچنین، نحوه دستیابی به داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل، که با بهره‌گیری از سنجنده مودیس و با استفاده از کدنویسی پیشرفته در محیط گوگل ارث انجام شده است، از جمله جنبه‌های نوآورانه این تحقیق به شمار می‌رود. به‌کارگیری تکنیک‌های پیشرفته‌ای مانند فیلتر کالمن و روش اسپیلاین مکعبی، امکان استخراج داده‌های دقیق‌تر و تبدیل آن‌ها به داده‌های روزانه را فراهم کرده است، که این رویکرد در این زمینه مطالعاتی کم‌سابقه محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه برای برآورد مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در مقیاس سالانه، داده‌های هواشناسی ۱۰ ایستگاه هشت‌رود، بناب، جلفا، کلیبر، مرند، مراغه، میانه، سهند، سراب و تبریز واقع در استان آذربایجان شرقی طی بازه زمانی ۲۰ ساله بین سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۰۵ مورد استفاده قرار گرفت. استان آذربایجان شرقی واقع در ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۹۰ دقیقه طول شرقی، دارای ۴۵۴۹۱ کیلومتر مربع وسعت می‌باشد. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



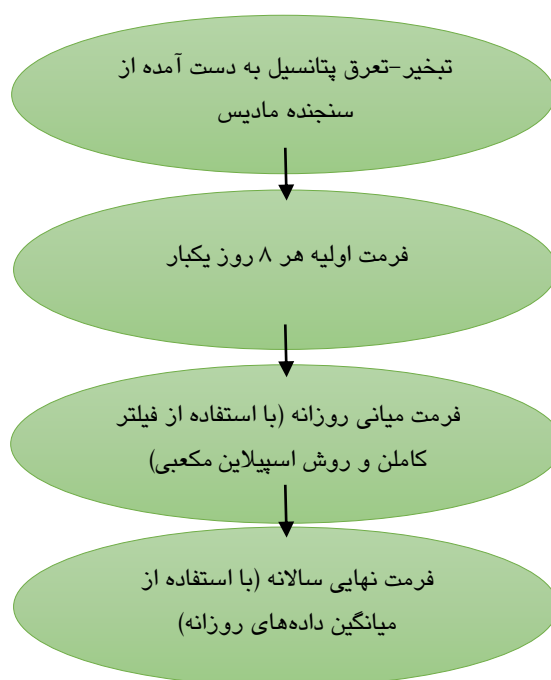
شکل ۱- نقشه جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

در این پژوهش پارامتر تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از الگوریتم MOD16A2 استخراج شد. الگوریتم MOD16A2 یک ابزار پیشرفته برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل، با استفاده از مدل پنمن-مانتیت و داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS است که بر روی ماهواره‌های Aqua و Terra نصب شده است. این الگوریتم برای ارزیابی دقیق تبادل انرژی بین سطح زمین و اتمسفر طراحی شده و به تعیین میزان آبی که به‌طور بالقوه از سطح زمین به اتمسفر بازمی‌گردد، کمک می‌کند. MOD16A2 شاخص‌های بیوفیزیکی مانند شاخص سطح برگ (LAI) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) را برای تحلیل وضعیت سطح زمین و پوشش گیاهی بکار می‌گیرد. این داده‌ها از تصاویر پیوسته و گسترده‌ای که توسط MODIS جمع‌آوری شده‌اند، استخراج می‌شوند. یکی از ویژگی‌های برجسته MOD16A2 استفاده از مدل‌های مبتنی بر فرایندهای فیزیکی و تجربی است که روابط پیچیده بین متغیرهای اقلیمی و تبخیر-تعرق را مدل‌سازی می‌کند. این الگوریتم توانایی تبدیل تابش طیفی و بازتاب سطح زمین به مقادیر قابل تفسیر و کاربردی تبخیر-تعرق را دارد. در نهایت، خروجی الگوریتم به صورت داده‌های زمانی و مکانی دقیق ارائه می‌شود.

در تحقیق کنونی، داده‌های به‌دست‌آمده به‌صورت دوره‌ای و هر ۸ روز یک‌بار ثبت شده بودند. برای تبدیل این داده‌ها به داده‌های روزانه، از الگوریتم فیلتر کالمن و روش درونیابی اسپیلاین مکعبی با برنامه نویسی در محیط پایتون بهره گرفته شد. همچنین برای مقایسه تغییرات مکانی و زمانی در طی پنج دوره در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۴، با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS که ابزارهای متنوعی برای تحلیل داده‌های جغرافیایی و ترسیم نقشه‌ها ارائه می‌دهد، نقشه‌های پهنه‌بندی استان آذربایجان شرقی با روش میانگین درونیابی رسم گردید. این روش به ویژه در مواردی که داده‌های نقطه‌ای موجود بوده و نیاز به تولید نقشه‌های پیوسته وجود داشته باشد، بسیار مفید است. علاوه بر این، تکنیک‌های دیگری مانند کریجینگ^۲ و IDW^۳ برای درونیابی مورد استفاده قرار گرفتند. با استفاده از این روش‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی به دست آمده، نمای دقیقی از تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی را ارائه دادند. در شکل ۲، فلوچارت مراحل تبدیل داده‌ها نشان داده شده است.

^۲ Kriging

^۳ Inverse Distance Weighting



شکل ۲- فلوچارت مراحل تبدیل داده‌ها

سنجنده مودیس

سنجنده^۴ MODIS یک حسگر پیشرفته است که بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua قرار دارد و به‌عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در نظارت بر تغییرات محیطی و زمین‌شناسی شناخته می‌شود. این سنجنده به‌طور خاص برای جمع‌آوری داده‌های جغرافیایی و محیطی طراحی شده و قابلیت تصویربرداری از سطح زمین را با دقت و کیفیت بالا دارد. این سنجنده دارای وضوح‌های مختلفی است که شامل ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر می‌باشد. این تنوع در وضوح به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که داده‌ها را در مقیاس‌های مختلف تحلیل کنند. برای مثال، وضوح ۲۵۰ متری برای نظارت بر پوشش گیاهی و تغییرات جزئی در سطح زمین مناسب است، در حالی که وضوح ۱ کیلومتری برای تحلیل‌های وسیع‌تر مانند دما و رطوبت استفاده می‌شود. سنجنده MODIS دارای ۳۶ باند طیفی است که به آن اجازه می‌دهد اطلاعات متنوعی از جمله دما، رطوبت، پوشش زمین و آلودگی را جمع‌آوری کند. این ویژگی به پژوهشگران کمک می‌کند تا درک بهتری از وضعیت محیط زیست و تغییرات اقلیمی داشته باشند. همچنین با قابلیت جمع‌آوری داده‌ها به صورت مداوم و در مقیاس جهانی، MODIS به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که تغییرات محیطی را در سطح جهانی رصد کنند. این ویژگی به ویژه در مطالعات مربوط به تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع طبیعی بسیار حائز اهمیت است. در مجموع، سنجنده MODIS با قابلیت‌های منحصر به فرد خود، نقش حیاتی در تحلیل و نظارت بر تغییرات محیطی ایفا می‌کند و به پژوهشگران و تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند تا درک عمیق‌تری از وضعیت منابع طبیعی و چالش‌های زیست محیطی داشته باشند. این ابزار به عنوان یک منبع ارزشمند در تحقیقات علمی و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی به شمار می‌آید (Rousta et al., 2025).

برنامه ArcGIS

^۴ Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

یک نرم‌افزار پیشرفته سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) است که توسط شرکت Esri توسعه یافته و به عنوان یکی از ابزارهای کلیدی در تحلیل و مدیریت داده‌های جغرافیایی شناخته می‌شود. این نرم‌افزار به کاربران این امکان را می‌دهد تا داده‌های مکانی را به صورت مؤثر جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و به تصویر بکشند. یکی از ویژگی‌های برجسته ArcGIS، قابلیت ایجاد نقشه‌های دقیق و تعاملی است. کاربران می‌توانند با استفاده از داده‌های مختلف، نقشه‌های سفارشی طراحی کنند و اطلاعات را به صورت بصری نمایش دهند. این قابلیت به ویژه در تحلیل‌های فضایی و شناسایی الگوهای مکانی بسیار مفید است.

پهنه‌بندی یکی از کاربردهای مهم ArcGIS است که به تقسیم‌بندی یک منطقه به نواحی مختلف بر اساس ویژگی‌های خاص یا داده‌های تحلیلی اشاره دارد. به عنوان مثال، در مطالعات محیطی، می‌توان از این روش برای شناسایی مناطق با خطر بالای سیلاب، آلودگی یا تغییرات اقلیمی استفاده کرد. فرایند پهنه‌بندی در ArcGIS شامل چند مرحله کلیدی است. ابتدا، داده‌های مورد نیاز برای تحلیل جمع‌آوری می‌شوند. این داده‌ها می‌توانند شامل اطلاعات جغرافیایی، اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی باشند. پس از جمع‌آوری، کاربران از ابزارهای تحلیلی ArcGIS برای بررسی و تحلیل داده‌ها استفاده می‌کنند. این شامل محاسبه آمارهای توصیفی مانند میانگین و انحراف معیار است. برای ایجاد نقشه‌های پیوسته، از روش‌های درونیابی مانند Kriging یا IDW استفاده می‌شود. این روش‌ها به کاربران کمک می‌کنند تا داده‌های نقطه‌ای را به صورت پیوسته در سطح منطقه توزیع کنند. پس از این مرحله، نقشه‌های پهنه‌بندی ایجاد می‌شوند که نمای دقیقی از تغییرات مکانی و الگوهای مختلف را به نمایش می‌گذارند. در نهایت، نتایج به دست آمده از نقشه‌های پهنه‌بندی مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند تا الگوها و روابط مکانی شناسایی شوند. این اطلاعات می‌توانند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های محیطی استفاده شوند.

استفاده از نرم‌افزار ArcGIS برای تحلیل داده‌ها شامل مراحل متعددی است از جمله درونیابی و ترسیم نقشه‌های پهنه‌بندی. در این مراحل، خطاهایی از جمله نادرستی در انتخاب پارامترهای درونیابی و تنظیمات مربوط به مقیاس و دقت داده‌ها مشاهده شده است. همچنین، نواقص مرتبط با داده‌های ورودی، به ویژه در سطوح نقاط و اختلافات مکانی ایستگاه‌ها، می‌توانند منجر به نارسایی‌هایی در نتایج نهایی شوند. خطاهای محاسباتی ناشی از عوامل انسانی مانند خطا در ترسیم و تنظیم پروفایل‌ها و یا ناهماهنگی در داده‌های ورودی ممکن است به تأثیرگذاری نتایج و دقت آنها کمک کند.

نتایج و بحث

جدول ۱، تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه محاسبه شده را به ترتیب برای ایستگاه‌های هشت‌رود، بناب، جلفا، کلیبر، مرنه، مراغه، میانه، سهند، سراب و تبریز طی دوره ۵ ساله بین سال‌های ۲۰۲۴-۲۰۰۵ نشان می‌دهد. دلیل انتخاب دوره ۵ ساله برای این پژوهش، امکان مشاهده و تحلیل دقیق‌تر تغییرات زمانی و مکانی تبخیر-تعرق پتانسیل است. بازه زمانی مذکور این امکان را می‌دهد که الگوهای تغییرات سالانه شناسایی شده و اثرهای متغیرهای محیطی و اقلیمی بر این پارامتر به‌خوبی مورد بررسی قرار گیرند. همچنین، با انتخاب دوره ۵ ساله، می‌توان نوسانات طبیعی و تغییرات بلندمدت را در داده‌ها مشاهده کرد و به درک بهتری از روندهای کلی در تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی دست یافت.

جدول ۱- داده‌های تبخیر-تعرق پتانسیل برای سال‌های منتخب در شهرهای مختلف استان آذربایجان شرقی

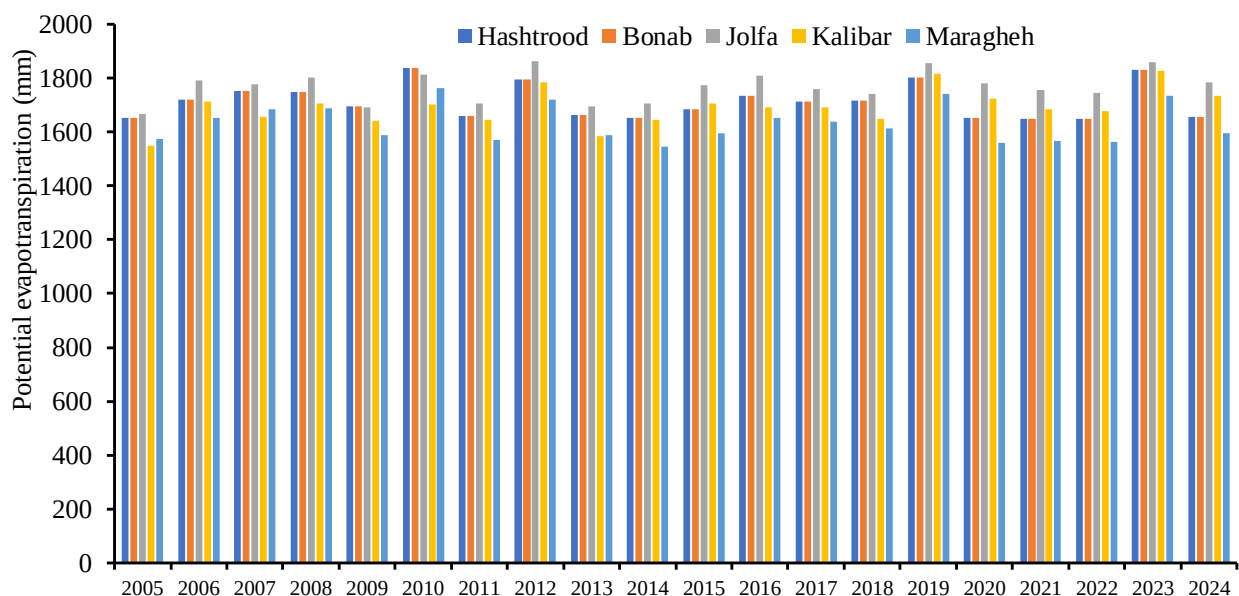
سال	تبریز	سراب	سهند	میانه	مرند	مراغه	کلیبر	جلفا	بناب	هشترود
۲۰۰۵	۱۵۳۸/۸۱	۱۴۸۷/۷۶	۱۵۵۳/۵۴	۱۵۹۶/۵۹	۱۵۶۴/۱۶	۱۵۷۳/۱۸	۱۵۴۷/۳۱	۱۶۶۶/۸۱	۱۶۵۱/۵۸	۱۶۵۱/۵۸
۲۰۱۰	۱۷۵۲/۵۷	۱۶۶۰/۲۱	۱۷۵۱/۷۳	۱۷۹۲/۲۵	۱۷۶۰/۴۴	۱۷۶۱/۵۱	۱۷۰۲/۵۰	۱۸۱۲/۸۷	۱۸۳۸/۸۲	۱۸۳۸/۸۲
۲۰۱۵	۱۵۷۵/۲۵	۱۵۶۶/۳۱	۱۵۸۲/۲۹	۱۶۹۰/۳۱	۱۶۶۰/۶۳	۱۵۹۳/۹۸	۱۷۰۳/۹۳	۱۷۷۳/۸۳	۱۶۸۳/۶۹	۱۶۸۳/۶۹
۲۰۲۰	۱۵۷۷/۴۵	۱۵۵۱/۲۵	۱۶۰۲/۳۰	۱۶۵۵/۱۹	۱۶۶۱/۷۰	۱۵۶۰/۲۹	۱۷۲۴/۷۴	۱۷۸۰/۲۵	۱۶۵۳/۲۹	۱۶۵۳/۲۹
۲۰۲۴	۱۶۲۵/۸۴	۱۵۶۰/۱۰	۱۶۳۳/۲۱	۱۶۸۸/۱۱	۱۶۸۸/۰۹	۱۵۹۳/۵۰	۱۷۳۳/۶۹	۱۷۸۲/۷۸	۱۶۵۶/۷۷	۱۶۵۶/۷۷

همانطوری که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد در سال ۲۰۰۵، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در محدوده ۱۴۸۷/۷۶ میلی‌متر تا ۱۶۶۶/۸۱ میلی‌متر قرار داشتند. در سال ۲۰۱۵، مقادیر به ۱۵۶۶/۳۱ میلی‌متر تا ۱۷۷۳/۸۳ میلی‌متر افزایش یافتند و در سال ۲۰۲۴، مقادیر به ۱۵۶۰/۱۰ میلی‌متر تا ۱۷۸۲/۷۸ میلی‌متر افزایش پیدا کردند. در ادامه، به بررسی جامع‌تر و تحلیل دقیق‌تر تغییرات مکانی و زمانی تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی پرداخته خواهد شد تا الگوها و روندهای مرتبط با این شاخص مهم اقلیمی با جزئیات بیشتری مورد ارزیابی قرار گیرد.

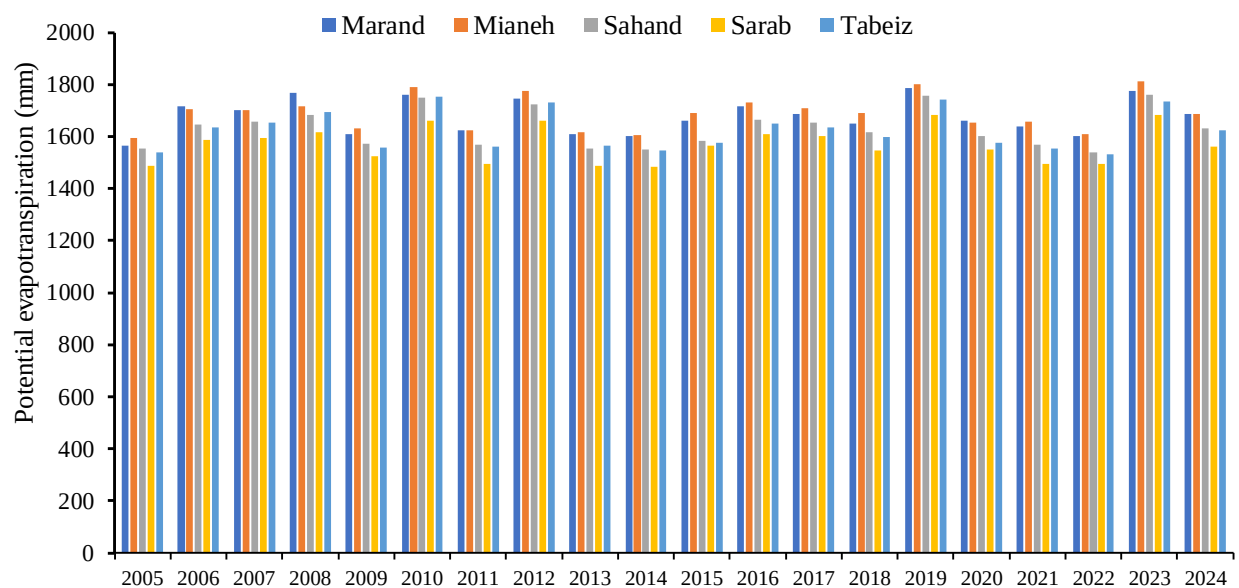
تحلیل تغییرات

با توجه به نقشه‌های تهیه شده در سال‌های مورد مطالعه، تحلیل تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل در مناطق مختلف استان آذربایجان شرقی انجام گردید. این تحلیل به بررسی تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در شهرستان‌های مختلف و روند کلی این تغییرات در بازه زمانی مشخص می‌پردازد. شکل‌های ۳ تا ۵، روند تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل را در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد.

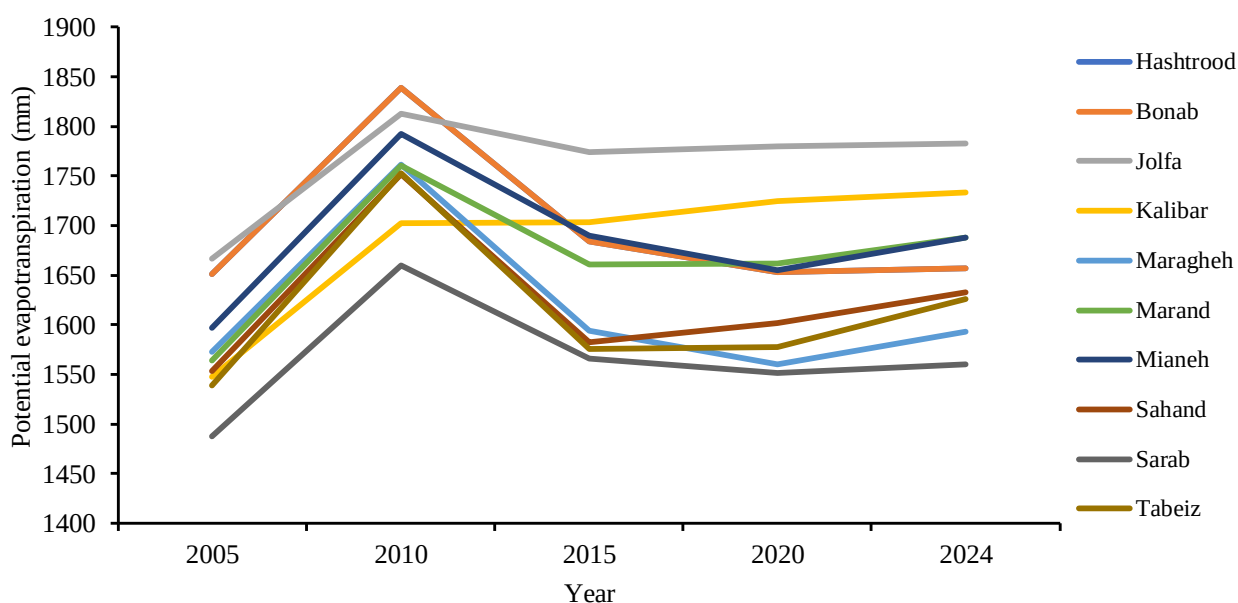
بارش به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در فرایند تبخیر-تعرق عمل می‌کند و رابطه‌ای مستقیم و معنادار بین این دو وجود دارد. با افزایش بارش، میزان تبخیر-تعرق معمولاً افزایش می‌یابد، اما این رابطه تحت تأثیر تغییرات فصلی و شرایط اقلیمی قرار دارد. به‌ویژه در فصول بارانی، میزان تبخیر-تعرق ممکن است به‌دلیل افزایش رطوبت هوا کاهش یابد. خطای تغییرات فصلی در این ارتباط می‌تواند قابل‌توجه باشد، به‌خصوص در تغییرات ناگهانی در بارش که بر سنجش مقدار تبخیر-تعرق تأثیر می‌گذارد. این نیازمند تحلیل‌های دقیق‌تر و مدل‌سازی پیچیده‌تری در آینده است.



شکل ۳- نمودار ستونی نتایج ارزیابی PET از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ برای شهرهای هشتگرد، بناب، جلفا و مراغه.

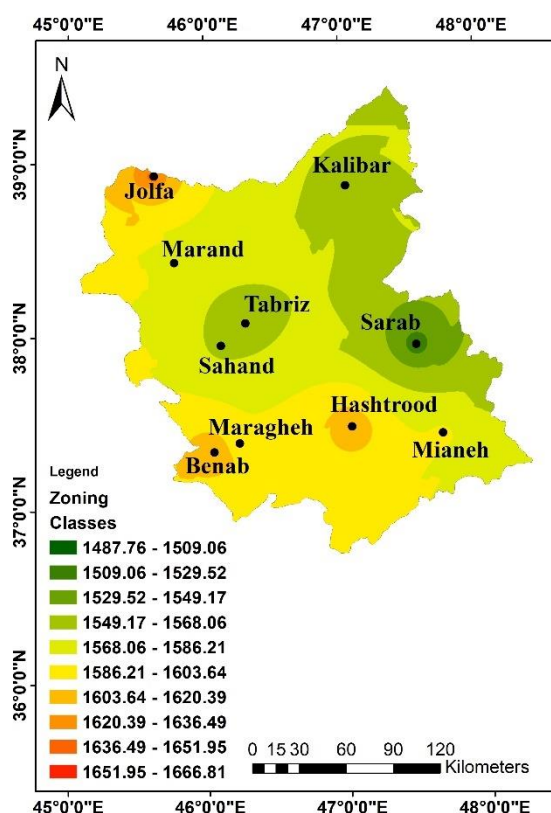


شکل ۴- نمودار ستونی نتایج ارزیابی PET از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ برای شهرهای مرند، میانه، سهند، سراب و تبریز.

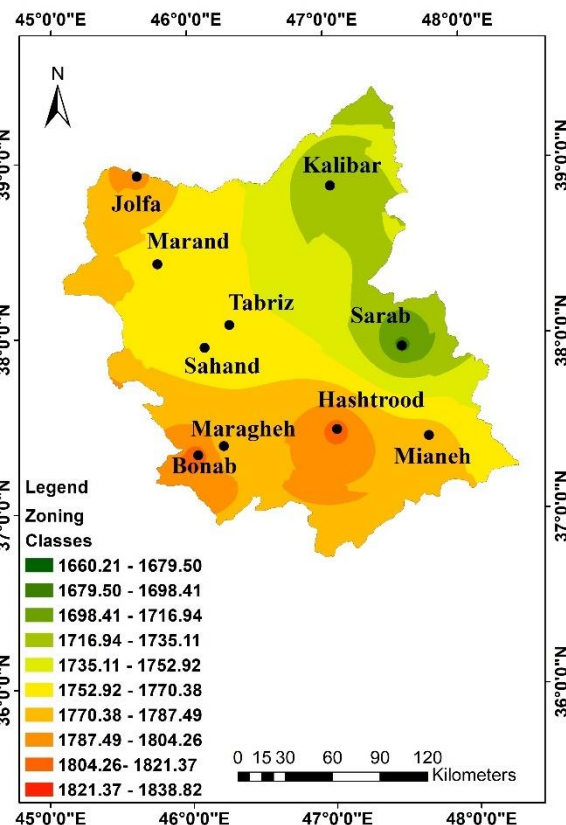


شکل ۵- نمودار خطی روند تغییرات زمانی PET سال‌های منتخب از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴

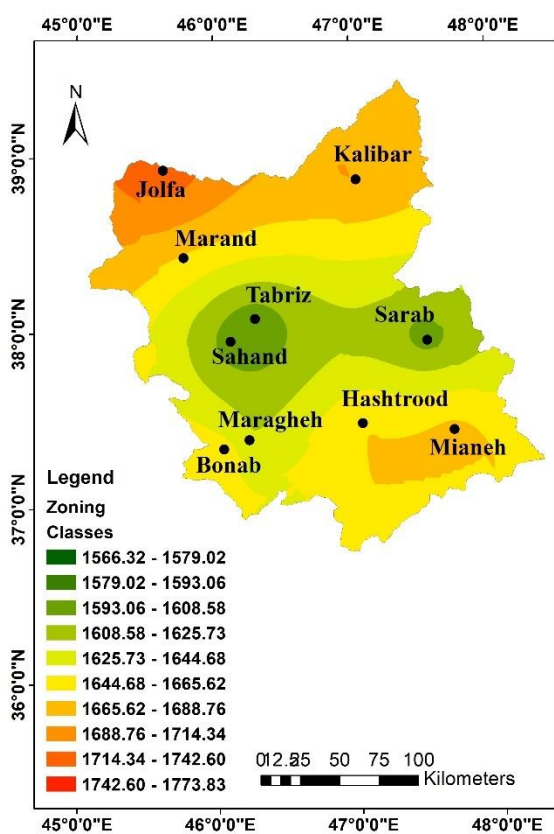
در ایستگاه هشت‌رود، سال ۲۰۱۰ با $1838/82$ میلی‌متر بالاترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل را نشان می‌دهد. در حالی که پس از آن کاهش مقادیر مشاهده می‌شود. در بناب نیز مشابه هشت‌رود، سال ۲۰۱۰ بالاترین مقدار را دارد و سپس مقادیر کاهش می‌یابد. در جلفا، سال ۲۰۰۵ با مقدار $1666/81$ میلی‌متر شروع می‌شود و به تدریج در سال‌های بعد افزایش می‌یابد و به $1782/78$ میلی‌متر در سال ۲۰۲۴ می‌رسد. در کلبر، روند افزایشی نسبی مشاهده می‌شود و مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل از $1547/31$ میلی‌متر در سال ۲۰۰۵ به $1733/69$ میلی‌متر در سال ۲۰۲۴ می‌رسد. در مراغه، سال ۲۰۱۰ با $1761/51$ میلی‌متر بالاترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل را دارد، اما پس از آن کاهش مقادیر مشاهده می‌شود. در مرند، سال ۲۰۱۰ با $1760/44$ میلی‌متر بالاترین مقدار را دارد، و سپس تغییرات نسبی تا سال ۲۰۲۴ به $1688/10$ میلی‌متر می‌رسد. در میانه، بالاترین مقدار در سال ۲۰۱۰ با $1792/26$ میلی‌متر مشاهده می‌شود و سپس کاهش نسبی تا سال ۲۰۲۴ به $1688/11$ میلی‌متر می‌رسد. در سهند، سال ۲۰۱۰ با $1751/73$ میلی‌متر بیشترین مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل را دارد و سپس کاهش نسبی تا سال ۲۰۲۴ به $1633/21$ میلی‌متر می‌رسد. در سراب، سال ۲۰۱۰ با $1660/21$ میلی‌متر بالاترین مقدار را دارد و پس از آن کاهش نسبی مشاهده می‌شود. در تبریز، سال ۲۰۱۰ با $1752/58$ میلی‌متر بالاترین مقدار را دارد و سپس کاهش نسبی تا سال ۲۰۲۴ به $1625/84$ میلی‌متر می‌رسد. داده‌های بررسی شده نشان می‌دهند که در سال ۲۰۱۰، بیشترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در اغلب شهرهای استان آذربایجان شرقی ثبت شده است. این روند می‌تواند تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص آن سال، همچون تغییرات دمایی، الگوهای بارش، تغییرات پوشش گیاهی و تأثیر باد باشد. با این حال، تحلیل دقیق‌تر و بررسی عوامل موثر بر این تغییرات مستلزم پژوهش‌های تکمیلی و تخصصی در آینده است. شکل‌های ۶ تا ۱۰ نقشه‌های پهنه‌بندی تبخیر-تعرق پتانسیل استان را در سال‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد.



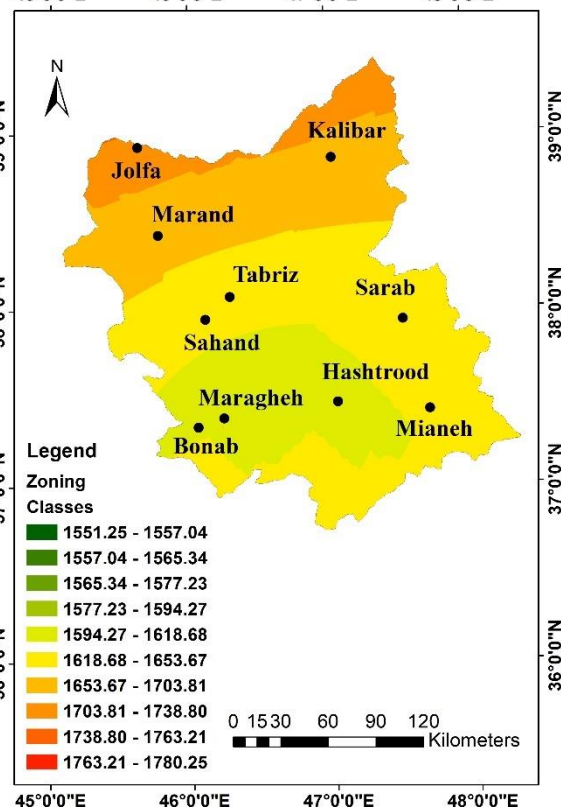
شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی PET استان در سال ۲۰۱۰



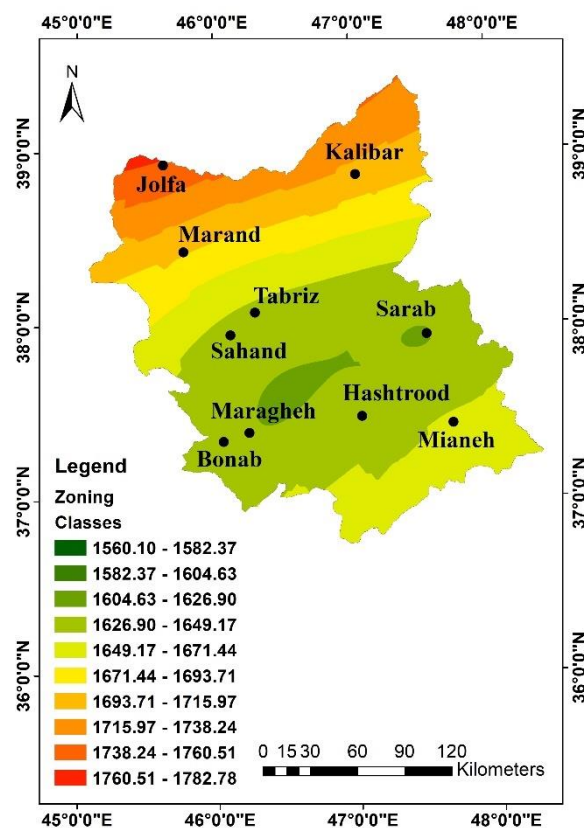
شکل ۶- نقشه پهنه‌بندی PET استان در سال ۲۰۰۵



شکل ۹- نقشه پهنه‌بندی PET استان در سال ۲۰۲۰



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی PET استان در سال ۲۰۱۵



شکل ۱۰- نقشه پهنه‌بندی PET استان در سال ۲۰۲۴

در سال ۲۰۰۵، حداقل مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۴۸۷/۸ میلی‌متر) در شهرستان سراب مشاهده گردید، همچنین در شهرستان‌های کلیبر، تبریز و سهند نیز مقادیر پایین تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۵۴۷/۳-۱۵۳۸/۸-۱۵۵۳/۵ میلی‌متر) مشاهده شدند. درحالی که حداکثر مقدار آن (۱۶۶۶/۸ میلی‌متر) در شهرستان جلفا واقع در شمال غرب استان و شهرستان‌های هشترود و بناب (۱۶۵۱/۶ میلی‌متر) واقع در جنوب استان پراکنده بودند. در سال ۲۰۱۰، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه تبخیر-تعرق پتانسیل نسبت به سال ۲۰۰۵ بودند. روند تغییرات این سال نیز همانند سال قبل است. حداقل مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۶۶۰/۲ میلی‌متر) در شهرستان سراب مشاهده گردید، همچنین مقدار پایین (۱۷۰۲/۵ میلی‌متر) در شهرستان کلیبر واقع در شمال شرق استان مشاهده شد و حداکثر مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۸۳۸/۸-۱۸۳۸/۸-۱۸۱۲/۹ میلی‌متر) به‌ترتیب در شهرستان‌های جلفا، هشترود و بناب واقع در شمال غرب و جنوب استان دیده شدند.

در سال ۲۰۱۵، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه تبخیر-تعرق پتانسیل نسبت به سال ۲۰۱۰ و افزایش نسبی مقادیر نسبت به سال ۲۰۰۵ بودند. مناطق با حداقل مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۵۶۶/۳-۱۵۸۲/۳-۱۵۷۵/۳ میلی‌متر) در شهرستان‌های مرکزی استان شامل سراب، تبریز و سهند مشاهده شدند، و حداکثر مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۷۷۳/۸ میلی‌متر) در شهرستان جلفا واقع در شمال غرب استان مشاهده شدند. در سال ۲۰۲۰، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در محدوده ۱۵۵۱/۲۵ تا ۱۷۸۰/۲۵ میلی‌متر قرار داشتند. حداقل مقادیر به‌ترتیب (۱۶۵۳/۳-۱۵۶۰/۳ میلی‌متر) در شهرستان‌های جنوبی استان شامل هشترود، مراغه و بناب مشاهده گردید، و حداکثر مقدار (۱۷۸۰/۲ میلی‌متر) همچنان در شهرستان جلفا واقع در شمال غرب استان مشاهده شد.

در سال ۲۰۲۴، برعکس سال‌های قبل، حداقل مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در اکثر شهرستان‌های جنوبی و مرکز استان و بیشتر در شهرستان‌های سراب و مراغه با مقادیر (۱۵۶۰/۱-۱۵۹۳/۵۰ میلی‌متر) مشاهده گردید، درحالی که

مقادیر بالاتر در شهرستان‌های شمالی استان علی‌الخصوص شهرستان جلفا با مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل (۱۷۸۲/۸ میلی‌متر) مشاهده شدند. به صورت کلی می‌توان چنین بیان نمود که در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۰، افزایش قابل‌توجهی در مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل به‌ویژه در شهرستان‌های جنوب و شمال غرب استان مشاهده شده است. اما در کل روند صعودی یکنواختی در مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل روند صعودی یکنواخت داشته و در مناطق مرکزی استان، کمترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل اندازه‌گیری شده است. در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۰، افزایش مستمر مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در بیشتر مناطق استان مشاهده گردید و تغییرات مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در بازه‌ی کمتری مشاهده شده است. اما برعکس سال‌های قبل در جنوب استان کمترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل به وقوع پیوسته است. همچنین، در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در بیشتر مناطق شمالی استان، به‌ویژه در مناطق شمال غربی مقادیر بالایی داشتند اما در مرکز و جنوب استان کمترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل رخ داده است.

در بررسی نوسانات و تغییر رفتارهای تبخیر-تعرق پتانسیل در استان آذربایجان شرقی، لازم است به تحلیل عوامل مختلفی که می‌توانند در بروز این نوسانات نقش داشته باشند پرداخته شود. از جمله این عوامل می‌توان به تغییرات اقلیمی اشاره کرد که باعث افزایش دما و تغییر در الگوی بارش شده و به تبع آن تبخیر-تعرق پتانسیل افزایش می‌یابد. علاوه بر این، به نظر می‌رسد تغییرات کاربری زمین و توسعه شهری نیز می‌تواند تأثیر بسزایی بر این نوسانات داشته باشد؛ زیرا تغییر در پوشش‌های گیاهی و سطح نفوذپذیری زمین‌ها بر رفتار تبخیر-تعرق موثر است. همچنین، فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی نامناسب و آبیاری ناکارآمد می‌تواند باعث افزایش نیاز آبی و تغییر الگوی تبخیر-تعرق شود. تغییرات رطوبت خاک و سرعت باد نیز از عوامل دیگر مؤثر بر رفتار تبخیر-تعرق پتانسیل هستند. در حالت کلی، بر اساس داده‌های پهنه‌بندی در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۱۰، ۲۰۱۵ و ۲۰۲۴، مشاهده می‌شود که الگوی تغییرات در مناطق مختلف استان آذربایجان شرقی یکنواخت و منظم نیست. تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل تحت تأثیر چندین عامل محیطی و اقلیمی قرار گرفته که می‌تواند شامل موارد زیر باشد:

- ۱- تغییرات دمایی: افزایش دمای هوا معمولاً باعث افزایش تبخیر-تعرق می‌شود. اگر سال‌هایی با دمای بالاتر یا موج‌های گرمایی شدید وجود داشته باشد، مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل افزایش می‌یابد.
- ۲- بارندگی و رطوبت نسبی: میزان بارندگی تأثیر زیادی بر مقدار تبخیر-تعرق دارد. در سال‌هایی با بارندگی بیشتر، تبخیر ممکن است کاهش یابد، در حالی که در سال‌های خشک افزایش می‌یابد.
- ۳- پوشش گیاهی و نوع زمین: مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم تبخیر-تعرق بیشتری دارند، زیرا گیاهان از طریق تعرق در این فرایند نقش دارند. در مناطق خشک و بیابانی، مقدار این پارامتر معمولاً کمتر است.
- ۴- سرعت باد: باد شدید تبخیر را افزایش می‌دهد، زیرا لایه مرطوب سطح خاک و گیاه را سریع‌تر از بین می‌برد و اجازه می‌دهد آب بیشتری تبخیر شود.

- ۵- تغییرات مکانی: مشاهده شده که مقدار تبخیر-تعرق در برخی شهرها پایدار بوده، در حالی که در برخی مناطق نوسانات بیشتری داشته است. این نشان می‌دهد که الگوی تغییرات به‌شدت وابسته به شرایط محلی و منطقه‌ای است. استفاده از مدل‌های پیش‌بینی و تحلیل‌های سناریوهای مختلف اقلیمی می‌تواند اطلاعات بیشتری در مورد این نوسانات ارائه دهد. برای مدیریت بهینه منابع آب و کشاورزی در استان، تحلیل جامع و دقیق از این عوامل به همراه استفاده از شیوه‌های نوین مانند فناوری سنجش از دور برای پایش و مدل‌سازی تغییرات ضروری است.

در این پژوهش، درصد خطا در اندازه‌گیری تبخیر-تعرق واقعی نسبت به محاسبات انجام‌شده توسط روش‌های مختلف، در حدود ۱۵٪ تا ۲۰٪ برآورد شده است. این خطاها می‌تواند به عواملی چون نادقتی در داده‌های ورودی، شرایط اقلیمی نامساعد یا روش محاسباتی نادرست نسبت داده شود. به‌ویژه، در شرایط اقلیمی خاص مثل هوای بسیار مرطوب یا بسیار خشک، این خطاها می‌تواند بیشتر نمایان شود. بنابراین، درک و شناسایی عواملی که به این خطاها

دامن می‌زنند، امری ضروری است و می‌تواند به بهبود دقت محاسبات و ارزیابی بهتر منابع آبی کمک کند. این پژوهش صرفاً به بررسی روند تغییرات تبخیر-تعرق پتانسیل پرداخته است و هدف آن تحلیل علل یا ارائه راهکار برای این تغییرات نبوده است. نتایج ارائه شده نشان‌دهنده تغییرات مکانی و زمانی این پارامتر هستند، اما بررسی دقیق عوامل مؤثر بر این روند خارج از محدوده این پژوهش قرار دارد. با این حال، عواملی مانند تغییرات دمایی، رطوبت نسبی، پوشش گیاهی، سرعت باد و دسترسی به آب احتمالاً می‌توانند در تغییرات تبخیر-تعرق تأثیرگذار باشند که این موارد می‌توانند در مطالعات آینده بررسی شوند.

Valizade Kamran (2014) با استفاده از معادله استفنز (Stefan's equation) تبخیر-تعرق پتانسیل را در منطقه آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار داد. به این منظور، با کمک تابع Solar Analyst در محیط نرم افزار ArcGIS در روز ۱۱ خرداد ماه سال ۱۳۸۸ ما بین ساعت ۱۰ الی ۱۱ قبل از ظهر اقدام گردید. نتایج به دست آمده نشان داد، دامنه‌های جنوبی منطقه و مناطق با میانگین درجه حرارت بالا بیشترین میزان تبخیر-تعرق پتانسیل را دارا می‌باشند، که با نتایج حاصله از این تحقیق مطابقت دارد. (Ghasemi et al. (2021 به پایش و پهنه‌بندی خشکسالی در استان البرز پرداختند. در این پژوهش، دو شاخص شاخص بارش استاندارد شده^۵ (SPI) و شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده^۶ (SPEI) برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه در ۹ ایستگاه سینوپتیک هواشناسی در البرز جنوبی برای بارش‌های مختلف طی ۳۳ سال در بازه ۱۹۸۹-۲۰۱۹ مورد بررسی قرار گرفتند. در این مطالعه روند خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت هواشناسی که به دلیل بارش کم و تبخیر-تعرق زیاد و طولانی مدت در منطقه رخ می‌داد بررسی و ارزیابی شد. نتایج نشان از همبستگی خوب بین SPI و SPEI در مناطق مرطوب و نیمه خشک وجود داشت در حالیکه همبستگی خوبی بین SPI و SPEI در مناطق خشک و فرا خشک دیده نشد که نشان داد خشکسالی‌های هواشناسی در ایران نسبت به تبخیر-تعرق و بارش حساس‌تر هستند. علاوه بر این، نقشه‌های پهنه‌بندی شدت خشکسالی، نشان داد که منطقه با شرایط بسیار خشک مواجه بوده است و منابع آب هم در کوتاه مدت و هم در میان مدت تحت تأثیر شدت خشکسالی قرار دارند.

نتیجه گیری نهایی

تحقیق حاضر به منظور ارزیابی محصولات سنجش از دور در برآورد و پهنه‌بندی مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل انجام شد. نتایج محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل بر مبنای تصاویر سنجنده مودیس، و روش درونیابی Kriging و IDW با استفاده از برنامه ArcGIS بر روی داده‌های ایستگاه‌های هشترود، بناب، جلفا، کلیبر، مرند، مراغه، میانه، سهند، سراب و تبریز واقع در استان آذربایجان شرقی نشان داد که، شهرستان‌های مرکزی شامل شهرستان‌های سهند، سراب و تبریز در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ و سال ۲۰۲۴ دارای کمترین مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل و شهرستان‌های شمالی شامل شهرستان‌های کلیبر، جلفا و مرند، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ بیشترین افزایش مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل را تجربه کرده‌اند. این افزایش می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی، افزایش دما و فعالیت‌های انسانی باشد. همچنین شهرستان‌های جنوبی شامل شهرستان‌های هشترود، بناب، مراغه و میانه، نیز افزایش‌هایی را با شدت کمتری نسبت به مناطق شمالی نشان دادند.

تحلیل مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل از سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ نشان داد که شهرستان‌های شمال غرب استان، به ویژه شهرستان جلفا، به‌طور مداوم دارای بالاترین مقادیر تبخیر-تعرق بوده‌اند. این روند ثابت به نظر می‌رسد، به علت شرایط اقلیمی خاص و ویژگی‌های جغرافیایی این منطقه است که باعث افزایش تبخیر-تعرق پتانسیل در این

^۵ Standardized Precipitation Index

^۶ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

شهرستان می‌شود. ارتفاع این منطقه نسبت به سایر شهرها بالاتر است، که می‌تواند بر دمای هوا و میزان تبخیر تأثیر بگذارد. علاوه بر این، میزان بارندگی در این منطقه پایین‌تر است و رطوبت نسبی کمتری دارد، که به افزایش تبخیر-تعرق کمک می‌کند. پوشش گیاهی و نوع خاک نیز در این فرایند نقش دارند؛ زمین‌های کشاورزی و پوشش گیاهی متراکم در این شهرستان باعث افزایش تبخیر-تعرق شده است، در حالی که شهرهای دیگر با پوشش گیاهی کمتر چنین تغییراتی را تجربه نمی‌کنند. همچنین، شرایط جغرافیایی و جهت تابش خورشید در این منطقه ممکن است میزان انرژی دریافتی از خورشید را افزایش دهد، که به نوبه خود باعث بالا رفتن میزان تبخیر می‌شود. ترکیب این عوامل باعث شده است که مقدار تبخیر-تعرق پتانسیل در این شهرستان نسبت به سایر مناطق افزایش یابد و آن را از نظر اقلیمی و محیطی متمایز کند.

در کل، تحلیل جامع تبخیر-تعرق پتانسیل بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجهی در مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل در بعضی شهرستان‌های استان آذربایجان شرقی است. در نهایت، این پژوهش می‌تواند به درک بهتر از وضعیت منابع آب و مدیریت بهینه آن‌ها در این منطقه کمک کند و به‌عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی‌های آینده در زمینه مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تغییرات اقلیمی و چالش‌های مرتبط با آن، تحلیل دقیق تبخیر-تعرق پتانسیل می‌تواند به بهبود استراتژی‌های مدیریت آب و افزایش بهره‌وری در کشاورزی کمک کند.

References

- Ahmadi, H., Fallahghalhari, Q. & Shaemi, A. (2016). Estimating and Evaluating the Trends of Annual Reference Evapotranspiration based on Influential Climatic Parameters in the North East of Iran. *Journal of Soil and Plant Science*, 26, 257-269.
<https://doi.org/10.22067/JSPS.2016.19632>
- Akbari, M., Seif, Z. & Zareabyane, H. (2011). Estimation of Evapotranspiration by Remote Sensing Technique under Different Climate Condition. *Journal of Water and Soil*, 25, 835-844.
<https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.10243>
- 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*, 92-5-104219-5.
- Amiri, M. & PourGhasemi, H.R. (2019). Comparing Different Methods of Potential Evapotranspiration and Studying Temporal and Spatial Changes in the Mahalou Watershed using GIS. *Journal of Watershed management research*, 19, 22-35.
<https://doi.org/10.29252/jwmr.10.19.22>
- Baiybordi, M. (2003). Principles of irrigation engineering. Volume I, Tehran: University of Tehran Publications. [In Persian].
- Babamiri, O., Nozari, H. & Maroofi, S. (2021). Potential Evapotranspiration Estimation using Stochastic Time Series Models (Case Study: Tabriz). *Journal of Watershed Management Research*, 8, 137-146.
<https://doi.org/10.29252/jwmr.8.15.137>
- Ghasemi, P., Karbasi, M., ZamaniNoori, A. & SaraiTabrizi, M. (2021). Monitoring and Zoning of Drought in Southern Alborz. *Geography and Environmental Studies*, 10, 85-98.
<http://dorl.net/dor/20.1001.1.20087845.1400.10.39.6.2>
- Gleick, P.H. (2014). Water, drought, climate change, and conflict in Syria. *Weather, Climate, and Society*, 6, 331-340.
<https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1>
- Geo, G.e., Chen, D., Ren, G., Chen, Y.u. & Lion, Y. (2017). Spatial and Temporal Variations and Controlling Factors of Potential Evapotranspiration in China: 1956–2000. *Journal of Geographical Sciences*, 16, 3-12.
<https://doi.org/10.1007/s11442-006-0101-7>
- Haghizadeh, A., Bayat, V. & Arshia, A. (2019). Estimation of The Evapotranspiration potential of Kermanshah synoptic stations Using Genetic Programming. *Geographic Space*, 19, 29-42.
<https://doi.org/10.29252/geores.19.68.29>
- Jafarishendi, F., HahanbakhshAsl, S., RezaieBanafshe, M. & Masoodiyan, A. (2019). Analysis of Temporal Change of Actual Evapotranspiration and Its Relationship with Temperature and Precipitation in East Azarbayegan Province Using MODIS. *Physical Geography Research*, 50, 685-696.
<https://doi.org/10.22059/jphgr.2018.248225.1007157>
- Liu, S., Bai, J., Jia, Z., Jia, L., Zhou, H. & Lu, L. (2010). Estimation of Evapotranspiration in The Mu Us Sand Land of China. *Hydro, Earth Syst*, 14, 573–584.
<https://doi.org/10.5194/hess-14-573-2010>
- Mohammadi, H., Hanafi, A. & Soltani, M. (2010). Estimate of potential evapotranspiration in stations of Isfahan province. *Journal of Geographic landscape*, 5, 153-167 (In Persian).
<https://doi.org/10.29252/jwmr.10.19.22>
- Nam, W.H., Hong, E.M. & Choi, J.Y. (2015). Has Climate Change Already Affected The Spatial Distribution and Temporal Trends of Reference Evapotranspiration in South Korea. *Agricultural Water Management*, 150, 129-138.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.11.019>
- RezaieBanafshe, M., JahanbakhshAsl, S., Masoodiyan, A. & Jafari, F. (2018). Zoning of potential evapotranspiration in East Azerbaijan Province using MODIS processed remote sensing data. *Physical Geography Quarterly*, 14, 37-48.
<https://dorl.net/dor/20.1001.1.20085656.1397.11.41.3.9>

- Rousta, Z., Mohebbiyan, M. & SamadianFard, S. (2025). The Evaluation of Evapotranspiration Product of MODIS with Penman-Montieth FAO 56 and Priestley-Taylor Evapotranspiration at the Different Climate Types of Iran. *Water and Soil Conservation*, 28, 201-218.
<https://doi.org/10.22069/jwsc.2021.18734.3425>
- Sharghi, T., BariAbarghuei, H., Asadi, M.A. & Kousari, M.R. (2010). Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. *Journal of Arid Biome*, 1, 25-33.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008790.1389.1.1.3.7>
- ValizadeKamran, K.h. (2014). Estimating of Potential Evapotranspiration with Estefnz Method and GIS Techniques in Eastern Azerbaijan. *Journal of Geography and Planning*, 18, 217-334.
<https://doi.org/10.22059/jgp.2014.50741>
- Verstraeten, W.V., Veroustraeten, F. & Eyen, J. (2005). Estimating evapotranspiration of European forests from NOAA-imagery at satellite overpass time: towards an operational processing chain for integrated optical and thermal sensor data products. *Remote Sens. Environ.* 96, 256-276.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.004>
- Zareabayneeh, H., BayatVarkeshi, M., Sabziparvar, A.A., Maroofi, S. & Ghasemi, A. (2011). Evaluation of Different Reference Evapotranspiration Methods and their Zonings in Iran. *Physical Geography Research*, 42, 95-109.
<https://doi.org/10.22059/jphg.2011.22696>