

Predicting temperature and precipitation changes in the Shahrood region using CMIP6 climate models with a novel multi-criteria decision-making approach: OPLO-POCOD

Sina Khoshnevisan¹ , Samad Emamgholizadeh^{2✉} , and Reza Ashouri³ 

1. Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: sinakhoshnevisan@shahroodut.ac.ir
2. Corresponding author, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. Email: s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir
3. Department of Civil Engineering, Shahrood Institute of Higher Education, Shahrood. Iran. Email: reza.ashouri1400@gmail.com

Article Info.

Article type:
Research Article

Article history:

Received 07 August 2025
Received in revised form 08 December 2025
Accepted 10 February 2026
Available online 23 September 2026

Keywords:

climate change,
multi-criteria decision
making,
precipitation and
temperature,
emission scenarios,
APOLO-POCOD.

ABSTRACT

Objective: Climate change threatens water security in semi-arid Shahrood by increasing evaporation and water demand while reducing precipitation and groundwater recharge. This study assesses these impacts using advanced climate models and future climate scenarios.

Method: This study uses Shahrood's monthly precipitation and temperature data and evaluates three CMIP6 climate models using the OPLO-POCOD MCDM method based on R^2 , MAE, and KGE. The best-performing model was then downscaled using the delta change factor method.

Results: CMCC-EMS2 was identified as the best-performing model for both precipitation and temperature. OPLO-POCOD confirmed its superiority with the lowest lost-opportunity values. Future projections indicate 1.5–7.3% decreases in precipitation and temperature increases of about 1.4–1.9°C under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios.

Conclusions: Climate change is expected to reduce runoff and aquifer recharge while increasing groundwater pressure and water-resource instability. The OPLO-POCOD method provides a reliable approach for climate-model selection. Future research should use ensemble models and compare CMIP6 with CMIP5 to reduce uncertainty and improve projections.

Cite this article: Khoshnevisan, S., Emamgholizadeh, S., & Ashouri, R. (2026). Predicting temperature and precipitation changes in the Shahrood region using CMIP6 climate models with a novel multi-criteria decision-making approach: OPLO-POCOD. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 6(3), 26-55. <https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>



© The Author(s)
<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>

Publisher: Razi University.

Introduction

Climate change presents a significant and multifaceted threat to water resources, particularly in semi-arid regions. These areas are especially vulnerable due to their already limited water availability and high dependence on consistent precipitation patterns. Rising temperatures and reduced precipitation are two primary manifestations of climate change that pose a dual threat to these regions. On one hand, increasing temperatures enhance evaporation rates, thereby decreasing the availability of surface water. On the other hand, altered precipitation patterns lead to reduced natural recharge of aquifers. Concurrently, higher temperatures and changing weather patterns increase water demand for agricultural, industrial, and domestic uses, leading to excessive extraction of groundwater resources. The sustainability of water resources in such regions is thus seriously challenged. Ensuring water security requires a comprehensive understanding of how climate change impacts both surface and groundwater resources. This study aims to investigate these impacts in the Shahrood region, a semi-arid area where water scarcity is a pressing issue. By employing advanced climate models and innovative evaluation techniques, this research seeks to provide insights into the future climate scenarios.

Method

This study focuses on the Shahrood region, utilizing monthly precipitation and temperature data to assess climate change impacts. We employed three climate models from the CMIP6: CMCC-EMS2, MPI-ESM1-2-LR, and CNRM-CM6-1-HR. To evaluate and rank these climate models, we applied the OPLO-POCOD technique, a recently developed multi-criteria decision-making (MCDM) method. OPLO-POCOD (Opportunity Lost–Polar Coordinates Distance) integrates the concept of opportunity loss with the calculation of distances in polar coordinates to provide a comprehensive and fair comparison among alternatives. The method constructs an initial decision matrix, derives the opportunity loss matrix, and transforms the results into a polar coordinate framework where distances from the ideal solution are computed and weighted according to the importance of criteria. This approach not only captures both gains and losses across criteria but also allows a robust ranking of models by minimizing lost opportunities and maximizing achieved potential. Statistical indices such as R^2 , MAE, and KGE were used as performance criteria. Finally, to downscale the model outputs to a finer resolution, we applied the delta change factor method.

Results

To evaluate base on the metrics the CMCC-EMS2 model demonstrated superior performance, with the highest R^2 value of 0.188 for precipitation, indicating a better fit to observed data. It also had the lowest MAE value of 12.254 mm, suggesting smaller average errors in its predictions, and the highest KGE value of 0.381, reflecting a good balance between correlation, bias, and variability. For temperature, CMCC-EMS2 again performed best with an R^2 value of 0.928, an MAE of 3.161°C, and a KGE of 0.733. Using the OPLO-POCOD

technique, which evaluates models based on lost opportunity values in polar coordinates, the CMCC-EMS2 model was identified as the most suitable for both precipitation and temperature simulations. It had the lowest lost opportunity values of 0.29547 for precipitation and 0.22376 for temperature, indicating its superior performance relative to the other models. Subsequently, the CMCC-EMS2 model's outputs were analyzed for near-future (2015–2034) and far-future (2035–2056) periods under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The SSP2-4.5 scenario, representing moderate socio-economic trends, showed a 1.5% decrease in average annual precipitation compared to the baseline period (1995–2014). The more extreme SSP5-8.5 scenario exhibited a 7.3% reduction in precipitation. Additionally, the analysis of temperature data revealed significant changes under both scenarios. In the near-future period (2015–2034), both the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios showed an increase in the average annual temperature by approximately 1.4 degrees Celsius compared to the baseline period (1995–2014). However, in the far-future period (2035–2056) Under the SSP2-4.5 scenario, the average annual temperature increased to about 1.9 degrees Celsius, while the SSP5-8.5 scenario projected a similar increase, indicating a consistent rise in temperature across both scenarios.

Conclusions

The findings suggest that climate change will lead to decreased runoff, reduced aquifer recharge, and increased pressure on groundwater resources, ultimately resulting in heightened water resource instability. The use of the OPLO-POCOD technique for evaluating and ranking climate models offers a robust and comprehensive approach to selecting the most suitable model for climate change analysis. The results underscore the importance of considering multiple criteria and statistical indices in the evaluation process to ensure accurate and reliable predictions. The insights gained from this study can enable policymakers and water resource managers to reduce pressure on water resources and minimize their vulnerability to climate change through the development of smart strategies and optimal management practices. By understanding the potential impacts of climate change on precipitation and temperature, proactive measures can be taken to enhance water resource resilience and sustainability. For future research, it is recommended to employ ensemble models to aggregate results from multiple models, thereby reducing uncertainty and providing more accurate climate projections. Additionally, comparing the performance of CMIP6 models with those from CMIP5 could offer valuable insights into the structural and content improvements of the newer models.

Author Contributions

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank all participants in the present study.

Ethical Considerations

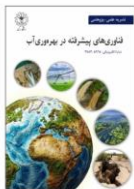
The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest



پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی CMIP6 با استفاده از رویکرد نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD

سینا خوشنویسان^۱، صمد امامقلی زاده^۲، و رضا آشوری^۳

۱. گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: sinakhoshnevisan@shahrootut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: s_gholizadeh517@shahroodut.ac.ir
۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه غیر انتفاعی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: j.ahadiyan@scu.ac.ir
۴. گروه سازه‌های آبی، دانشکده مهندسی آب و محیط زیست، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: reza.ashouri1400@gmail.com

درباره مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۶ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱	هدف: هدف این پژوهش، ارزیابی تغییرات اقلیمی و بررسی پیامدهای احتمالی آن بر منابع آب در بخش شمالی شهرستان شاهرود، با تمرکز بر تغییرات دما و بارش و شناسایی مناسب‌ترین مدل اقلیمی برای پیش‌بینی شرایط آینده است. روش پژوهش: در این مطالعه، سه مدل اقلیمی CMIP6 شامل MPI-ESM1-2-LR، CMCC-EMS2 و CNRM-CM6-1-HR با استفاده از شاخص‌های آماری R^2، MAE و KGE ارزیابی شدند. سپس با بهره‌گیری از روش چندمعیاره OPLO-POCOD، مدل‌ها رتبه‌بندی و مدل برتر برای شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) انتخاب شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد CMCC-EMS2 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش و دما دارد. پیش‌بینی‌ها کاهش ۵/۱ و ۷/۳ درصدی بارش سالانه و افزایش ۴/۱ تا ۹/۱ درجه سانتی‌گرادی دمای سالانه را نسبت به دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ نشان دادند. همچنین، کاهش بارش زمستانه و تغییر در الگوی زمانی بارش پیش‌بینی شد. نتیجه‌گیری: یافته‌ها نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی می‌تواند با کاهش بارش و رواناب و محدود شدن تغذیه آبخوان‌ها، فشار بر منابع آب زیرزمینی و ناپایداری منابع آبی در منطقه را افزایش دهد. از این رو، اتخاذ راهبردهای سازگاری و مدیریت پایدار منابع آب برای کاهش آسیب‌پذیری منطقه در برابر تغییرات اقلیمی ضروری است.

استناد: خوشنویسان، سینا؛ امامقلی زاده، صمد؛ و آشوری، رضا. (۱۴۰۵). پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی CMIP6 با استفاده از رویکرد نوین تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۶ (۳)، ۵۵-۲۶.

<https://doi.org/10.22126/atwe.2025.12566.1182>



مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی جهان تبدیل شده است؛ چالشی که ریشه در فعالیت‌های انسانی همچون صنعتی‌شدن، رشد جمعیت، و وابستگی فزاینده به سوخت‌های فسیلی دارد (دیتز و همکاران^۱، ۲۰۲۰؛ هوک و تانگ^۲، ۲۰۱۳). این روند منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسیدکربن، متان و بخار آب در جو زمین شده و با تشدید پدیده گلخانه‌ای، موجب برهم‌خوردن تعادل سیستم اقلیمی کره زمین گردیده است. شواهد علمی نشان می‌دهد که میانگین دمای کره زمین طی ۱۰۰ سال گذشته حدود ۰٫۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بر اساس پیش‌بینی‌ها، این افزایش ممکن است تا پایان قرن جاری به حدود ۳ درجه سانتی‌گراد برسد (لویسون و فتینگ^۳، ۲۰۱۳). این گرمایش جهانی، همراه با نوسانات بارشی، خشکسالی‌های شدید، افزایش پیک سیلاب‌ها و اختلال در چرخه هیدرولوژیکی پیامدهای گسترده‌ای به همراه دارد (دلقندی و همکاران^۴، ۲۰۱۷؛ ایمانی و همکاران^۵، ۲۰۲۳). از جمله پیامدهای مهم می‌توان به کاهش منابع آب در دسترس برای مصارف کشاورزی و آشامیدن، اختلال در تولیدات کشاورزی، افزایش فشار بر جوامع روستایی، ضرورت بهره‌گیری از روش‌های نوین آبیاری، بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی، و تهدید فزاینده امنیت غذایی و معیشت جمعیت‌های وابسته به منابع طبیعی اشاره کرد (خوشنویسان و همکاران، ۱۴۰۳؛ پولادگر و همکاران، ۱۴۰۱). در چنین شرایطی، پایش دقیق روندهای اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات آتی، به‌ویژه، در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران از اهمیت بالایی برخوردار است (الماسی و همکاران، ۱۴۰۳؛ لی و همکاران^۶، ۲۰۲۰). افزایش دما نه‌تنها موجب تشدید تبخیر و تعرق و کاهش رطوبت خاک می‌شود، بلکه می‌تواند به کاهش رواناب، کاهش بازده آبیاری، تغییر زمان‌بندی رشد گیاهان و افت بهره‌وری محصولات کشاورزی بینجامد. هم‌زمان، نوسانات بارشی و تغییر در الگوی فصلی بارش نیز منابع آب تجدیدپذیر و بیلان آب را تحت‌تأثیر قرار داده و پایداری سامانه‌های طبیعی و انسانی را با چالش مواجه می‌سازد (ایرز و دادمان^۷، ۲۰۱۰؛ مناهان و ثوبالد^۸، ۲۰۱۸). از این‌رو، پایش و تحلیل روند تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی و منابع آب، برای درک بهتر رفتار اقلیم، به‌منظور تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی یک ضرورت انکارناپذیر است (ایمانی و همکاران، ۱۴۰۱).

در پاسخ به نگرانی‌های فزاینده درباره روند گرم‌شدن زمین و پیامدهای آن، هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۹ (IPCC) در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان ملل متحد و سازمان جهانی هواشناسی تأسیس شد. این هیئت با مشارکت هزاران دانشمند از سراسر جهان، وظیفه دارد آخرین یافته‌های علمی درباره تغییر اقلیم را گردآوری، ارزیابی و در قالب گزارش‌هایی جامع منتشر کند. هدف اصلی این نهاد، ارائه اطلاعات علمی دقیق و بی‌طرفانه برای سیاست‌گذاران است تا تصمیم‌گیری در حوزه اقلیم و محیط‌زیست بر پایه شواهد علمی صورت گیرد. خروجی‌های این هیئت، به‌ویژه گزارش‌های دوره‌ای آن، در سطح بین‌المللی به‌عنوان معتبرترین مرجع برای تحلیل وضعیت کنونی اقلیم و پیش‌بینی‌های آینده شناخته می‌شوند. مدل‌های گردش عمومی جو و اقیانوس (AOGCM)^{۱۰} اصلی‌ترین ابزارهای محاسباتی هستند که برای شبیه‌سازی و مطالعه سیستم‌های آب‌وهوایی زمین تحت اثر تغییر اقلیم استفاده می‌شوند (پاچاوری و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۴). این مدل‌ها با ترکیب معادلات فیزیکی و شیمیایی، تعاملات بین جو، اقیانوس‌ها، سطح زمین و یخ‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند. AOGCM‌ها برای پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی و ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های انسانی بر اقلیم جهانی بسیار حیاتی هستند. بدین منظور این هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم مجموعه‌ای از سناریوهای توسعه و انتشار گازهای

¹ Dietz et al² Höök & Tang³ Levinson & Fettig⁴ Delghandi et al⁵ Imani et al⁶ Li et al⁷ Ayers & Dodman⁸ Monahan & Theobald⁹ The Intergovernmental Panel on Climate Change¹⁰ Atmosphere-Ocean General Circulation Model¹¹ Pachauri et al

گلخانه‌ای را منتشر نمود، نخستین مجموعه سناریوها در اوایل دهه ۱۹۹۰ منتشر شد. معروف‌ترین گزارش‌های IPCC که پایه بسیاری از مطالعات اقلیمی هستند، گزارش پنجم (CMIP5) و گزارش ششم (CMIP6) هستند. در CMIP5، مسیرهای واداشت تابشی یا RCP^۱ ها معرفی شدند که نشان‌دهنده میزان گرمایش جهانی ناشی از غلظت گازهای گلخانه‌ای تا سال ۲۱۰۰ هستند. در CMIP6، سناریوهای مسیرهای توسعه اجتماعی-اقتصادی مشترک^۲ (SSPs) ارائه شده‌اند که علاوه بر انتشار گازها، روندهای اقتصادی و اجتماعی را نیز در نظر می‌گیرند و طیفی گسترده‌تر از آینده‌های ممکن اقلیمی را پوشش می‌دهند. این سناریوها در پنج مسیر مختلف شامل SSP1 (توسعه پایدار)، SSP2 (میانگین تاریخی)، SSP3 (چالش‌های منطقه‌ای)، SSP4 (نابرابری) و SSP5 (توسعه مبتنی بر انرژی فسیلی) تعریف شده‌اند که هر کدام چشم‌انداز متفاوتی از روندهای جمعیتی، اقتصادی، فناوری و سیاست‌های اقلیمی را به تصویر می‌کشند؛ به‌عنوان مثال، SSP1 بر توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تمرکز دارد، SSP2 روندهای فعلی را ادامه می‌دهد، SSP3 به چالش‌های منطقه‌ای و رشد کند اقتصادی می‌پردازد، SSP4 بر افزایش نابرابری‌های اقتصادی و اجتماعی تأکید دارد و SSP5 به رشد سریع اقتصادی همراه با استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی مربوط می‌شود.

ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی در زمینه پژوهش حاضر به انجام رسیده است که به‌صورت مختصر در دو بخش مطالعات داخل کشور و مطالعات خارج از کشور ارائه می‌گردد.

۱. مطالعات داخل کشور

حقیقی و همکاران (۱۴۰۴)، تغییرات دمای بیشینه و بارش در سه ایستگاه سینوپتیک (آباد، شیراز و لار) را طی دوره پایه ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ مورد بررسی قرار دادند. برای پیش‌بینی دوره آینده نزدیک ۲۰۲۱-۲۰۴۰ از سه مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای انتشار مختلف (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) استفاده گردید. نتایج نشان داد که دمای بیشینه در هر سه ایستگاه و در همه سناریوها روند افزایشی دارد، به‌طوری که در ایستگاه آباد افزایش دما بین ۱/۵۷ تا ۱/۶۳ درجه سانتی‌گراد، در شیراز بین ۱/۳۷ تا ۱/۵ درجه و در لار بین ۱/۲۳ تا ۱/۳۷ درجه مشاهده شد. همچنین بارش فصلی الگوهای متفاوتی از تغییر را نشان داد؛ به‌طور مثال در آباد بارش زمستان افزایش و در بهار و تابستان کاهش یافت، در حالی که در شیراز و لار بسته به مدل و سناریو، بارش فصلی کاهش یا افزایش یافت.

در پژوهش نیرومندفرد و همکاران (۱۴۰۱) تغییرات دما و بارش در منطقه بیرجند طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره پایه مورد بررسی قرار گرفت و برای پیش‌بینی دوره آینده ۲۰۲۲-۲۰۵۰ از سه مدل اقلیمی MIROC-ES2L، MRI-ESM2-0 و IPSL-CM6A-LR استفاده شد. پس از ارزیابی معیارهای آماری، مدل MIROC-ES2L به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب گردید و تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تحلیل شد. نتایج نشان داد که دمای حداقل و حداکثر در همه سناریوها روند افزایشی قابل‌توجهی دارند، به‌طوری که دما نسبت به دوره پایه به‌طور معناداری افزایش خواهد یافت. بارش نیز روند سینوسی داشته و در برخی ماه‌ها افزایش و در برخی کاهش را نشان می‌دهد، اما میانگین بارش ماهانه در هر سه سناریو روند افزایشی دارد.

۲. مطالعات خارج از کشور

دهبان و همکاران^۳ (۲۰۲۵) با استفاده از ۱۰ مدل CMIP6، تغییرات آینده دما و بارش را در ایران و کشورهای همسایه بررسی کرد، نتایج نشان داد دمای منطقه در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰) بین ۱ تا ۲.۲ درجه و در آینده دور (۲۰۵۱-۲۰۸۰) تا ۴ درجه سانتی‌گراد به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت بر اساس پیش‌بینی‌ها، تغییرات بارش در این بازه‌ها متغیر خواهد

^۱ Representative Concentration Pathway

^۲ Shared Socioeconomic Pathways

^۳ Dehban et al

بود. در آینده نزدیک، این تغییرات از کاهش ۱۰ درصدی تا افزایش ۳۰ درصدی متغیر است، در حالی که در آینده دور، از کاهش ۳۰ درصدی تا افزایش بیش از ۳۰ درصدی پیش‌بینی شده است. احتمال کاهش بارش در ترکیه و افزایش آن در پاکستان نسبت به دیگر مناطق بیشتر است.

در پژوهشی که توسط زیدعلی نژاد و همکاران^۱ (۲۰۲۴) انجام شد به بررسی اثرات تغییر اقلیم در منطقه خرم‌آباد پرداخته شد. نتایج نشان داد که دمای منطقه در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ تحت سناریوی SSP2-4.5 به طور میانگین حدود ۱.۲۱ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت که این مقدار در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰ تحت سناریوی شدیدتر SSP5-8.5 به ۲.۹۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. همچنین میزان بارش در این منطقه نیز افزایش خواهد یافت، به‌طوری که میانگین تغییرات بارش بین ۲.۹۱ تا ۴.۸۶ میلی‌متر در ماه طی دوره‌های آینده متغیر خواهد بود. این نتایج نشان‌دهنده روند افزایشی گرما و افزایش بارش در منطقه مورد مطالعه است که به‌ویژه تحت سناریوی با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP5-8.5) شدت بیشتری خواهد داشت.

تهوری و همکاران^۲ (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای که با استفاده از مدل اقلیمی CanESM5 انجام شد، تغییرات دمایی در زیرحوضه‌های سد زاینده‌رود طی دوره ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰ تحت سه سناریوی اقلیمی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی گردید. نتایج نشان داد که میانگین دمای منطقه به ترتیب حدود ۱/۴۵، ۴ و ۹/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت در پژوهشی دیگر تغییرات دما و بارش در شهر تبریز طی دوره آینده (۲۰۱۵-۲۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفت، برای این منظور از مدل‌های اقلیمی BCC-CSM2-MR، CanESM5 و CESM2 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. نتایج حاکی از افزایش قابل‌توجه دما در تمام سناریوها بوده، به‌طوری که میانگین دما از مقدار پایه ۱۲/۶۱ درجه سانتی‌گراد به ترتیب به ۱۵/۴۲، ۱۶/۱۶ و ۱۷/۵۳ درجه سانتی‌گراد در سناریوهای فوق افزایش یافت. از سوی دیگر بارش سالانه نیز با کاهش نسبی همراه بود، به‌گونه‌ای که در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب کاهش‌هایی معادل ۰/۸۹، ۱/۶۹ و ۲/۲۱ میلی‌متر پیش‌بینی شد.

باتوجه به پیچیدگی سامانه‌های اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی جو (GCM)^۳ به‌عنوان ابزارهای اصلی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم جهانی توسعه یافته‌اند. تاکنون تعداد زیادی از این مدل‌ها طراحی شده‌اند که هر یک دارای ویژگی‌ها، دقت‌ها و کاربردهای خاص خود هستند؛ بااین‌حال، هیچ مدلی به طور کامل برای تمامی مناطق جغرافیایی و شرایط اقلیمی مناسب نیست (رحمان و پکات^۴، ۲۰۲۴؛ راجو و کومار^۵، ۲۰۲۰). تفاوت در پارامترهای ورودی، رزولوشن مکانی و فرضیات فیزیکی باعث می‌شود برخی مدل‌ها در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مناطق خاص عملکرد بهتری داشته باشند و برخی دیگر محدودیت‌هایی داشته باشند. به همین دلیل، انتخاب مدل‌های مناسب برای هر منطقه و هدف پژوهشی، به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها و کاهش خطاها، اهمیت زیادی پیدا کرده است. در واقع، برآوردهای مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) برای بارش و دما، دارای تنوع و پراکندگی قابل‌توجهی هستند. هر مدل نقاط قوت و ضعف خاص خود را دارد؛ برخی در مناطق گرمسیری و برخی دیگر در نواحی قطبی عملکرد بهتری دارند. ازاین‌رو، انتخاب مدلی که بهترین سازگاری با منطقه مورد مطالعه داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است (رجب‌هندری و همکاران^۶، ۲۰۱۶). به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی، از شاخص‌های مختلف ارزیابی استفاده می‌شود. استفاده از چندین شاخص مختلف این امکان را فراهم می‌کند که کارایی مدل‌ها از جنبه‌های گوناگون سنجیده شود و نقاط قوت و ضعف آن‌ها بهتر مشخص گردد. به‌کارگیری مجموعه‌ای از شاخص‌ها کمک می‌کند تا ارزیابی جامع‌تری از دقت و قابلیت اعتماد مدل‌ها به دست آید، اما این تنوع شاخص‌ها و نتایج متفاوت ارزیابی تحت هر شاخص می‌تواند فرایند رتبه‌بندی و انتخاب مدل برتر را

¹ Zeydlinejad et al

² Tahroudi et al

³ General Circulation Model

⁴ Rahman & Pekkatt

⁵ Raju & Kumar

⁶ Rajbhandari et al

پیچیده و دشوار کند (آیوگی و همکاران^۱، ۲۰۲۱؛ کلاتس و همکاران^۲، ۲۰۲۱). در این شرایط، استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره (MCDM)^۳ ضرورت می یابد، زیرا این روش ها قادرند معیارهای متعدد را به صورت هم زمان مورد ارزیابی قرار دهند و با در نظر گرفتن وزن و اهمیت هر شاخص، مدل هایی را که بهترین عملکرد کلی را دارند به طور دقیق تر شناسایی کنند (هاجکویز و کولینز^۴، ۲۰۰۷؛ هانگو و همکاران^۵، ۲۰۲۲). این روش ها با در نظر گرفتن مجموعه ای از شاخص های ارزیابی، امکان رتبه بندی مدل ها را بر اساس عملکرد کلی آن ها فراهم می سازند. یکی از پرکاربردترین این روش ها، روش TOPSIS (روش نزدیک ترین فاصله به راه حل ایده آل) است که بر پایه مفهوم فاصله هندسی از بهترین و بدترین گزینه تعریف می شود و گزینه ای را به عنوان برتر انتخاب می کند که کمترین فاصله را از راه حل ایده آل و بیشترین فاصله را از راه حل ضدایده آل داشته باشد (هونگو و همکاران^۶، ۲۰۲۲). در بسیاری از پژوهش ها مانند کریمی و قاسمی از TOPSIS به جهت شناسایی مدل اقلیمی برتر استفاده شد و نتایج نشان داد، بارش ماهانه تا ۳۹ درصد و دما تا ۲ درجه سانتیگراد در زیرحوضه آند آذربایجان غربی افزایش خواهد یافت (کریمی و قاسمی، ۱۳۹۶). علاوه بر TOPSIS، روش های VIKOR، AHP^۷ و PROMETHEE برای نیز در مطالعات اقلیمی به کار گرفته شده اند (بانانگ و همکاران^۸، ۲۰۲۴؛ گپتا و همکاران^۹، ۲۰۲۵). روش OPLO-POCOD^{۱۰} که در سال ۲۰۲۴ توسط شیخ و صنفی معرفی شد (شیخ و صنفی^{۱۱}، ۲۰۲۴). این روش یکی از جدیدترین تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره مبتنی بر مفهوم فرصت ازدست رفته در فضای مختصات قطبی به شمار می آید. این روش با استفاده از فاصله سنجی گزینه ها نسبت به بهترین وضعیت در فضای دوبعدی، شامل مقدار معیار و فرصت ازدست رفته، قادر است جایگاه گزینه ها را با دقت و شفافیت بالا ارزیابی نماید. نوآوری اصلی این تکنیک در ترکیب اطلاعات فرصت ازدست رفته با داده های اولیه در قالب زوج های مرتبی و محاسبه فاصله در فضای قطبی نهفته است که امکان وزن دهی معیارها و ارزیابی گزینه ها را به شیوه ای جامع تر فراهم می کند. همچنین، ارائه درجه فرصت ازدست رفته و درصد فرصت به دست آمده به عنوان شاخص های کمی، امکان مقایسه دقیق تر و تحلیل بهینه تر گزینه ها را مهیا می سازد.

منطقه شاهرود به عنوان یکی از نواحی خشک و نیمه خشک ایران، به دلیل شرایط اقلیمی خاص خود، به شدت در معرض پیامدهای منفی تغییر اقلیم قرار دارد. افزایش دما و تغییرات ناپایدار در الگوهای بارش می تواند تأثیرات گسترده ای بر منابع آب، کشاورزی و معیشت جمعیت محلی داشته باشد. با وجود اهمیت بالای این موضوع، مطالعات دقیق و جامع منطقه ای که با بهره گیری از جدیدترین داده ها و مدل های اقلیمی CMIP6 انجام شده باشد، محدود است. علاوه بر این، تنوع مدل های اقلیمی و تفاوت عملکرد آنها در مقیاس منطقه ای، نیازمند استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره برای ارزیابی جامع و انتخاب مدل های مناسب است. استفاده از این رویکرد امکان می دهد تا با در نظر گرفتن شاخص های مختلف ارزیابی، عملکرد مدل ها به صورت چندمعیاره تحلیل و بهترین مدل برای پیش بینی های اقلیمی منطقه شناسایی شود. هدف پژوهش حاضر، تحلیل و پیش بینی تغییرات دما و بارش در منطقه شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، در بازه تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و آینده ی نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶)، با استفاده از روش نوآورانه OPLO-POCOD است؛ روشی که تاکنون در مطالعات اقلیمی به کار گرفته نشده است. این روش با ارزیابی دقیق عملکرد مدل ها تحت شاخص های مختلف، میزان فرصت ازدست رفته هر مدل را

¹ Ayugi et al

² Klutse et al

³ Multi-Criteria Decision Making

⁴ Hajkiewicz & Collins

⁵ Houngue et al

⁶ Houngue et al

⁷ Analytic Hierarchy Process

⁸ Bhanage et al

⁹ Gupta et al

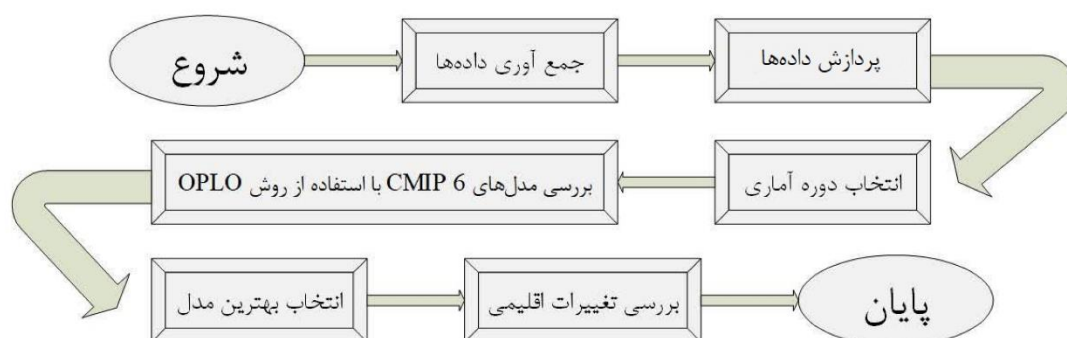
¹⁰ Opportunity Losses-Based Polar Coordinate Distance

¹¹ Sheikh & Senfi

به صورت کمی ارائه می‌دهد. چنین قابلیت‌های امکان مقایسه شفاف‌تر و دقیق‌تر مدل‌ها را فراهم می‌سازد و به انتخاب بهینه‌ترین مدل برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی منطقه کمک می‌کند.

روش پژوهش

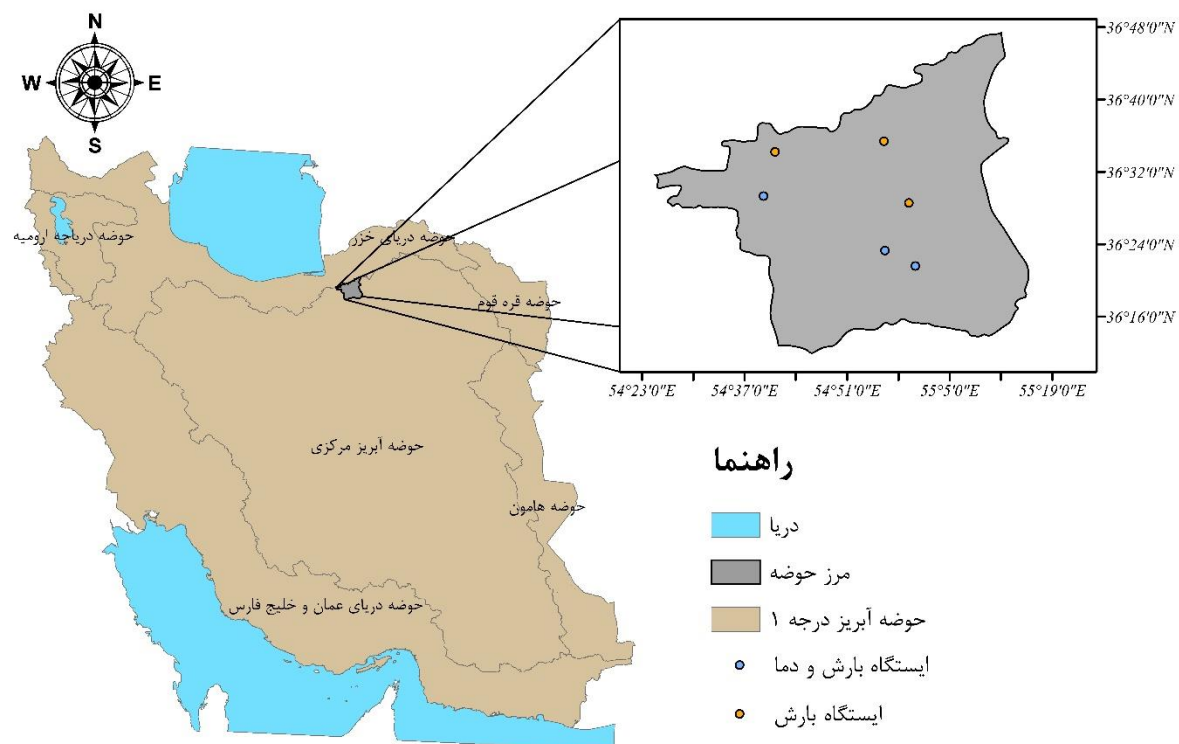
شکل (۱) برای شفاف‌سازی روند پژوهش و نمایش گام‌های اصلی انجام تحقیق، فلوچارت زیر ارائه شده است. این فلوچارت به صورت تصویری مراحل مختلف مطالعه را از جمع‌آوری داده‌ها تا تحلیل نتایج نشان می‌دهد و شامل مراحل انتخاب مدل‌ها، ارزیابی با شاخص‌های آماری، به‌کارگیری روش OPLO-POCOD و تحلیل تغییرات بارش و دما است.



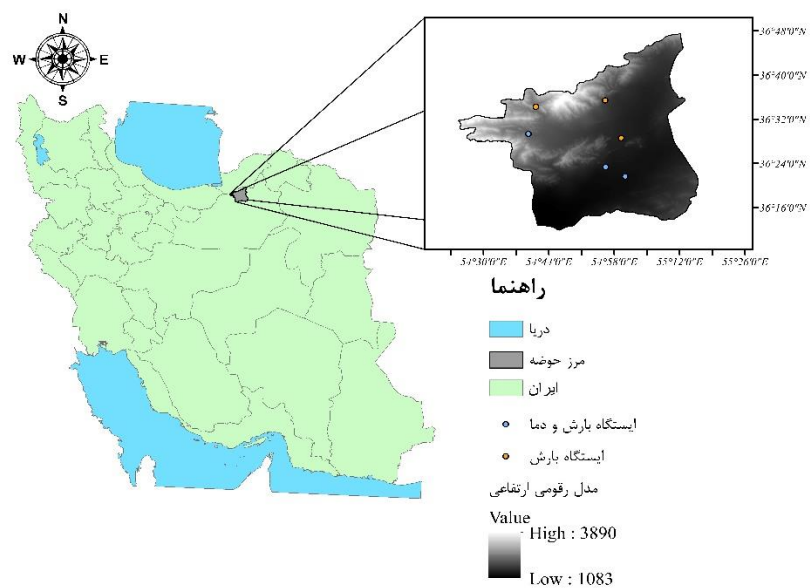
شکل ۱. فلوچارت انجام پژوهش

۱. منطقه مورد مطالعه

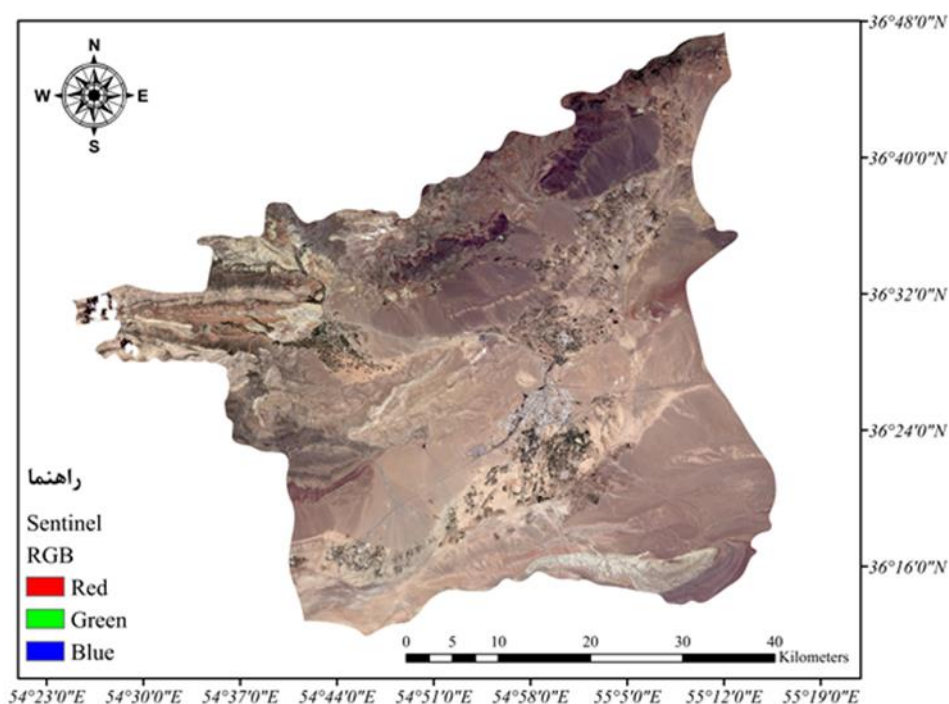
منطقه مورد مطالعه در بخش شمالی شهرستان شاهرود، استان سمنان واقع شده است. ناحیه‌ای که از مرز شهر دامغان آغاز می‌شود و تا مرز استان گلستان امتداد دارد. این منطقه در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز شرقی قرار گرفته و گذرگاه طبیعی میان نواحی خشک مرکزی ایران و مناطق مرطوب‌تر شمالی کشور به شمار می‌رود. از نظر موقعیت جغرافیایی، این بخش از شهرستان شاهرود از شمال با استان گلستان، از شرق با خراسان شمالی، از جنوب با نواحی مرکزی شهرستان شاهرود، و از غرب با شهرستان دامغان هم‌مرز است. بر خلاف بخش‌های مرکزی و جنوبی شاهرود که دارای اقلیم خشک و نیمه‌بیابانی هستند، نواحی شمالی این شهرستان به‌ویژه در محدوده‌های کوهستانی و جنگلی مجاور استان گلستان از آب‌وهوایی نسبتاً معتدل‌تر و مرطوب‌تر برخوردارند. این تفاوت اقلیمی، باعث افزایش تنوع زیستی و توانمندی کشاورزی در منطقه شده و امکان کشت محصولات باغی متنوع‌تری را فراهم ساخته است. همچنین، پوشش گیاهی طبیعی، مراتع کوهپایه‌ای، و جریان‌های سطحی فصلی در این ناحیه به مراتب غنی‌تر از نواحی خشک‌تر جنوب شهرستان است. شاهرود به واسطه تنوع اقلیمی و جغرافیایی خود، یکی از مهم‌ترین مناطق استان سمنان در زمینه کشاورزی و تولید محصولات باغی به شمار می‌آید و نقش قابل توجهی در تأمین بخشی از نیازهای غذایی استان و کشور ایفا می‌کند. موقعیت دقیق منطقه مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. شکل (۳ الف و ب)، مدل رقومی ارتفاع و تصویر ماهواره‌ای سنتینل منطقه مورد مطالعه بیانگر ناهمواری‌های چشمگیر و تنوع کاربری اراضی در شمال شهرستان شاهرود هستند. اختلاف ارتفاع از حدود ۱۰۸۳ تا ۳۸۹۰ متر نشان‌دهنده توپوگرافی متنوع از نواحی کوهستانی مرتفع در شمال تا دشت‌های پست در جنوب است. این شرایط سبب شکل‌گیری اقلیم‌های متفاوت، پوشش گیاهی متنوع و منابع آب سطحی غنی‌تر در بخش‌های شمالی شده است. همچنین، داده‌های ماهواره‌ای به‌خوبی پراکنش سکونتگاه‌ها، اراضی کشاورزی و مناطق تحت کشت را در کنار عرصه‌های مرتعی و کوهستانی نشان می‌دهند که نقش مهمی در فعالیت‌های اقتصادی و کشاورزی منطقه ایفا می‌کنند.



شکل ۲. نقشه ایران و منطقه مورد مطالعه



شکل ۳ الف. تصویر ماهواره‌ای و مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه



شکل ۳ ب. تصویر ماهواره‌ای و مدل ارتفاعی رقومی منطقه مورد مطالعه

۲. داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، از داده‌های ماهانه ۶ ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. یکی از این ایستگاه‌ها (ایستگاه سینوپتیک شاهرود) تحت نظارت سازمان هواشناسی کشور بوده و پنج ایستگاه دیگر توسط وزارت نیرو اداره می‌شوند. همچنین، برای بررسی متغیر دما از داده‌های ۳ ایستگاه استفاده شده است که یکی از آن‌ها ایستگاه سینوپتیک شاهرود و دو ایستگاه دیگر متعلق به وزارت نیرو هستند. ایستگاه‌های موردنظر به دلیل برخورداری از دوره آماری کامل و مستمر بیست‌ساله در بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ انتخاب شده‌اند. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

کد ایستگاه	UTMx	UTMy	نوع ایستگاه	مؤلفه
۴۷-۰۳۳	۲۸۹۴۸۷/۹	۴۰۳۹۳۲۵/۲	کلیماتولوژی	بارش، دما
۴۷-۰۴۶	۳۲۰۵۶۶/۹	۴۰۲۵۰۲۶/۷	کلیماتولوژی	بارش، دما
۴۰-۷۳۹	۳۱۴۳۲۵/۲	۴۰۲۸۱۹۸/۲	سینوپتیک	بارش، دما
۴۷-۰۴۴	۳۱۹۲۴۰/۲	۴۰۳۷۹۱۰/۸	کلیماتولوژی	بارش
۴۷-۲۰۶	۳۱۴۱۳۳/۹	۴۰۵۰۵۲۷/۲	کلیماتولوژی	بارش
۴۷-۹۳۶	۲۹۱۸۴۸/۲	۴۰۲۸۱۹۸/۲	کلیماتولوژی	بارش

به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم در محدوده مورد مطالعه از ۳ مدل مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده گردید. این مدل توسط سایر محققین مانند درزی (۱۴۰۴) مورد استفاده قرار گرفت. خروجی این مدل‌ها برای دوره زمانی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ (دوره پایه)، ۲۰۱۵-۲۰۳۴ (آینده نزدیک) و ۲۰۳۵-۲۰۵۶ (آینده دور) تحت دو سناریوی انتشار SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شدند. جدول (۲) خلاصه‌ای از فرضیات مرتبط با بخش‌های اقتصاد و سبک زندگی، همچنین سیاست‌ها و نهادهای سناریوهای اشتراکی جامعه را ارائه می‌دهد. در این جدول، گروه‌بندی کشور بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد، متوسط

درآمد و پردرآمد صورت گرفته است. در بخش اقتصاد و سبک زندگی، عوامل مختلفی همچون رشد اقتصادی، نابرابری، تجارت بین‌المللی، جهانی‌سازی و مصرف و رژیم غذایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش سیاست‌ها و نهادها، موضوعاتی نظیر همکاری بین‌المللی، سیاست‌های زیست‌محیطی، جهت‌گیری سیاستی و اثربخشی نهادها مورد توجه قرار گرفته است. این جدول به بررسی تفاوت‌ها و شباهت‌های بین سناریوهای مختلف در این زمینه‌ها می‌پردازد و دیدگاه‌های مختلفی را در مورد چگونگی تأثیرگذاری این عوامل بر جوامع ارائه می‌دهد. جدول (۳) خلاصه‌ای از فرضیات مرتبط با بخش‌های فناوری و همچنین محیط‌زیست و منابع طبیعی در سناریوهای اشتراکی جامعه را ارائه می‌دهد. در این جدول، گروه‌بندی کشورها بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد، متوسط درآمد و پردرآمد صورت گرفته است. در بخش فناوری، عوامل مختلفی همچون توسعه، انتقال، تغییرات فناوری انرژی، شدت کربن و شدت انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در بخش محیط‌زیست و منابع طبیعی، محدودیت‌های سوخت فسیلی، محیط‌زیست، استفاده از زمین و کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است.

جدول ۲. اطلاعات مدل‌های سناریو ششم مورد استفاده در پژوهش

نام مدل	مؤسسه	رزولوشن	پردازش	سناریوهای شبیه‌سازی شده
CMCC-EMS2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (Italy)	۲۸۸×۱۹۲	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5
CNRM-CM6-1-HR	Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques, and Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique (France)	۷۲۰×۳۶۰	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5
MPI-ESM1-2-LR	Max Planck Institute for Meteorology (Germany)	۱۹۲×۹۶	rlilp1fl	SSP2-4.5 SSP5-8.5

جدول ۳. خلاصه‌ای از فرضیات مربوط به بخش‌های اقتصاد و سبک زندگی و سیاست‌ها و نهادهای سناریوهای اشتراکی جامعه (SSPs) گروه‌بندی کشورهای اشاره شده در جدول بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد (LIC)، متوسط درآمد (MIC) و پردرآمد (HIC) صورت گرفته است.

SSP element	SSP2	SSP5
Economy & lifestyle		
Growth (per capita)	Medium, uneven	High
Inequality	Uneven moderate reductions across and within countries	Strongly reduced, especially across countries
International trade	Moderate	High, with regional specialization in production
Globalization	Semi-open globalized economy	Strongly globalized, increasingly connected
Consumption & Diet	Material-intensive consumption, medium meat consumption	Materialism, status consumption, tourism, mobility, meat-rich diets
Policies & institutions		
International Cooperation	Relatively weak	Effective in pursuit of development goals, more limited for envt. goals
Environmental Policy	Concern for local pollutants but only moderate success in implementation	Focus on local environment with obvious benefits to well-being, little concern with global problems
Policy orientation	Weak focus on sustainability	Toward development, free markets, human capital
Institutions	Uneven, modest effectiveness	Increasingly effective, oriented toward fostering competitive markets

جدول ۴. خلاصه‌ای از فرضیات مربوط به بخش‌های فناوری و محیط‌زیست و منابع طبیعی در سناریوهای اشتراکی جامعه (SSPs). گروه‌بندی کشورهای ذکر شده در جدول بر اساس تعریف بانک جهانی از کشورهای کم‌درآمد (LIC)، متوسط درآمد (MIC) و پردرآمد (HIC) انجام شده است.

SSP element	SSP2	SSP5
Technology Development Transfer Energy tech change Carbon intensity Energy intensity	Medium, uneven Slow Some investment in renewables but continued reliance on fossil fuels Medium Uneven, higher in LICs	Rapid Rapid Directed toward fossil fuels; alternative sources not actively pursued High High
Environment & natural resources Fossil constraints Environment Land Use Agriculture	No reluctance to use unconventional resources Continued degradation Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation Medium pace of tech change in ag sector; entry barriers to ag markets reduced slowly	None Highly engineered approaches, successful management of local issues Medium regulations lead to slow decline in the rate of deforestation Highly managed, resource-intensive; rapid increase in productivity

۳. شاخص‌های ارزیابی

به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی داده‌ها در دوره تاریخی، از سه شاخص آماری MAE ، R^2 و KGE استفاده شد. انتخاب این شاخص‌ها باهدف سنجش جنبه‌های مختلف ارزیابی از جمله میزان همبستگی، دقت مطلق و کارایی کلی مدل صورت گرفت تا تحلیلی جامع از رفتار مدل ارائه شود. روابط ریاضی این شاخص‌ها به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و مقدار بهینه هر یک، در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵. شاخص‌های ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در پژوهش

واحد	بهینه، بیشینه، کمینه	رابطه ریاضی	شاخص ارزیابی
-	0, 1, 1	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_o - \bar{P}_o)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_o - \bar{P}_o)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}_i)^2}} \right]^2$	ضریب تعیین
بارش (میلیمتر) دما (سانتی‌گراد)	0, ∞, 0	$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n P_i - P_o }{n}$	میانگین خطای مطلق
-	-∞, 1, 1	$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2}$	کارایی کلینگ-گوپتا
		$r: \text{Pearson correlation coefficient}$ $\beta = \mu_s / \mu_o$ $\gamma = \frac{\sigma_s / \mu_s}{\sigma_o / \mu_o}$	

برای ریزمقیاس‌نمایی و تبدیل خروجی بزرگ‌مقیاس مدل‌های AOGCM به مقادیر ماهانه، از روش تغییر عامل دلتا (Delta Change Factor method) استفاده گردید. در این روش، تغییرات میانگین مدل در دوره آینده نسبت به دوره گذشته محاسبه شده و سپس این تغییرات به داده‌های مشاهداتی دوره گذشته اعمال می‌شوند؛ به گونه‌ای که برای متغیرهای غیر نسبتی مانند دما، اختلاف میانگین‌ها به داده‌های مشاهداتی افزوده و برای متغیرهای نسبتی مانند بارش، نسبت تغییر ضرب می‌شود. معادلات روش تغییر عامل دلتا برای بارش و دما به ترتیب در روابط (۱) و (۲) آمده است.

$$P_{\text{future}} = P_{\text{observed}} \times \frac{\bar{P}_{\text{model, future}}}{\bar{P}_{\text{past, model}}} \quad (1)$$

$$T_{\text{future}} = T_{\text{observed}} + (\bar{T}_{\text{model, future}} - \bar{T}_{\text{model, past}}) \quad (2)$$

باتوجه به ماهیت پیچیده و چندبعدی ارزیابی مدل‌های اقلیمی، استفاده از چندین شاخص ارزیابی با ماهیت متنوع برای تحلیل دقیق عملکرد مدل‌ها ضروری است. اما یکپارچه‌سازی نتایج این شاخص‌ها و انتخاب بهترین مدل نیازمند به‌کارگیری روش‌های چندمعیاره پیشرفته است که بتوانند به طور هم‌زمان و متعادل تمامی شاخص‌ها را در نظر گرفته و با تحلیل درست و دقیق، فرایند رتبه‌بندی را انجام دهد. به همین منظور، تکنیک نوآورانه فرصت ازدست‌رفته بر مبنای فاصله در مختصات قطبی (OPLO-POCOD) به‌عنوان روشی کارآمد و مؤثر برای تلفیق شاخص‌های متعدد و انتخاب بهینه‌ترین مدل CMIP6 در این پژوهش به کار گرفته شد.

روش اپلو-پوکد (OPLO-POCOD) یک رویکرد نوین در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که با ترکیب مفهوم فرصت ازدست‌رفته و محاسبه فاصله در مختصات قطبی ارائه شده است. این تکنیک با ایجاد درکی دقیق‌تر از میزان فرصت‌های ازدست‌رفته هر گزینه در مقایسه با بهترین حالت، امکان ارزیابی منصفانه‌تر و کارآمدتر گزینه‌ها را فراهم می‌کند. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به توانایی آن در تلفیق داده‌های مثبت و منفی، در نظر گرفتن وزن معیارها، و نمایش جایگاه نسبی گزینه‌ها بر اساس میزان فرصت به‌دست‌آمده اشاره کرد. بدین ترتیب، OPLO-POCOD ابزاری قدرتمند برای تحلیل تصمیمات پیچیده در حوزه‌های مختلف مدیریت و اقتصاد محسوب می‌شود.

۴. تکنیک اپلو-پوکد (OPLO-POCOD)

تکنیک فرصت ازدست‌رفته بر مبنای فاصله در مختصات قطبی یک مفهوم اساسی در اقتصاد و مدیریت است که می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای تعیین ارزش مرتبط با اطلاعات استفاده شود. این تکنیک اولین بار توسط شیخ و سنفی در سال ۲۰۲۴ معرفی گردید (شیخ و سنفی، ۲۰۲۴). این تکنیک بر مبنای ایده اساسی فرصت ازدست‌رفته استوار است که با سنجش فرصت ازدست‌رفته هر گزینه می‌توان جایگاه گزینه‌ها را نسبت به بهترین وضعیت بر اساس فاصله در فضای مختصات قطبی نشان داد.

الگوریتم اجرایی این تکنیک به شرح ذیل است:

گام ۱. تشکیل ماتریس تصمیم اولیه.

ماتریس تصمیم اولیه X متشکل از m گزینه و n معیار، بر اساس اطلاعات دریافتی از تصمیم‌گیرندگان ایجاد می‌شود.

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \dots & X_{mj} & \dots & X_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (1)$$

گام ۲. تشکیل ماتریس فرصت ازدست‌رفته (OPL).

در این مرحله، فرصت ازدست‌رفته گزینه‌ها برای همه معیارها به دست می‌آید. اختلاف هر مقدار در یک ستون با بیشترین مقدار همان ستون (در صورتی که ماهیت معیار سود یا مثبت باشد) و اختلاف هر مقدار در یک ستون با کمترین مقدار همان ستون (در صورتی که ماهیت معیار زیان یا منفی باشد).

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mj} & \cdots & X_{mn} \end{matrix} & , & \begin{matrix} i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \end{matrix} \quad (2)$$

$X_{i1}^* \quad X_{ij}^* \quad X_{in}^*$ بهترین مقدار

بهترین مقدار در معیارهای مثبت حداکثر و برای معیارهای منفی حداقل است.

$$X = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} X_{11-x_1}^* & \cdots & X_{1j-x_j}^* & \cdots & X_{1n-x_n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1-x_1}^* & \cdots & X_{ij-x_j}^* & \cdots & X_{in-x_n}^* \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1-x_1}^* & \cdots & X_{mj-x_j}^* & \cdots & X_{mn-x_n}^* \end{matrix} & , & \begin{matrix} i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

$$opl = |x_{ij} - x_{best}| \quad \text{for } \forall x_{ij} \quad i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \quad (4)$$

بر اساس معادله (۲) تا (۴) ماتریس OPL با استفاده از فرصت‌های ازدست‌رفته به دست آمده، تشکیل می‌شود.

$$OPL = \begin{matrix} & \begin{matrix} c_1 & & c_j & & c_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} opl_{11} & \cdots & opl_{1j} & \cdots & opl_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ opl_{i1} & \cdots & opl_{ij} & \cdots & opl_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ opl_{m1} & \cdots & opl_{mj} & \cdots & opl_{mn} \end{matrix} & , & \begin{matrix} i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n. \end{matrix} \end{matrix} \quad (5)$$

گام ۳. تشکیل ماتریس زوج مرتبی

ماتریس زوج مرتبی بر اساس عناصر ماتریس تصمیم اولیه و ماتریس فرصت ازدست‌رفته تشکیل می‌شود.

$$X_{pair_{ij}} = (x_{ij}, opl_{ij}), \quad i=1 \text{ to } m ; j=1 \text{ to } n.$$

$$X_{pair} = \begin{bmatrix} (x_{11}, opl_{11}) & \dots & (x_{1j}, opl_{1j}) & \dots & (x_{1n}, opl_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{i1}, opl_{i1}) & \dots & (x_{ij}, opl_{ij}) & \dots & (x_{in}, opl_{in}) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (x_{m1}, opl_{m1}) & \dots & (x_{mj}, opl_{mj}) & \dots & (x_{mn}, opl_{mn}) \end{bmatrix}_{m \times n} \quad i=1 \text{ to } m ; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (6)$$

گام ۴. تشکیل ماتریس فاصله در فضای قطبی.

در این گام فاصله هر نقطه از بهترین مقدار برای آن معیار محاسبه شود. در اینجا، یک نقطه (x_{ij}, opl_{ij}) است و نقطه دیگر بهترین مقدار معیار مربوطه به صورت $(x_{best}, opl_{x_{best}})$ است. لازم بذکر است که فرصت ازدست رفته برای بهترین مقدار، همواره صفر است. در فضای مختصات فاصله بین دو نقطه بر اساس معادله زیر محاسبه می شود.

$$d_{ij} = \sqrt{A_{ij}^2 + B_{ij}^2 - 2A_{ij}B_{ij} \cos(\theta_2 - \theta_1)}, \quad (7)$$

$A = (x_{ij}, opl_{ij})$ and $B = (x_{best}, opl_{x_{best}})$ and (A, θ_1) and (B, θ_2) .

$$A.B = \|A\| \|B\| \cos \theta \quad (8)$$

کسینوس زاویه دو بردار طبق معادله (۹) بدست می آید.

$$\cos(\theta_2 - \theta_1) = \frac{A.B}{\|A\| \|B\|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}} \quad (9)$$

در نهایت باتوجه به مقادیر به دست آمده، ماتریس فاصله D تشکیل می شود.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{i1} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & \dots & d_{mj} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m ; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (10)$$

گام ۵. تشکیل ماتریس فاصله وزنی.

از آنجا که ارزش معیارها ممکن است یکسان نباشند، لذا وزن هر معیار بایستی مدنظر قرار گیرد. ماتریس فاصله وزنی D_w بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود.

$$\bar{d}_{ij} = w_j * d_{ij} \quad (11)$$

$$D_w = \begin{bmatrix} \bar{d}_{11} & \dots & \bar{d}_{1j} & \dots & \bar{d}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{d}_{i1} & \dots & \bar{d}_{ij} & \dots & \bar{d}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \bar{d}_{m1} & \dots & \bar{d}_{mj} & \dots & \bar{d}_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n}, \quad i=1 \text{ to } m; \quad j=1 \text{ to } n. \quad (12)$$

گام ۶: محاسبه فاصله کل.

در این گام فاصله کل برای هر گزینه بر اساس همه معیارها با جمع مقادیر هر سطر در ماتریس فاصله وزنی طبق رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \bar{d}_{ij}, \quad i=1 \text{ to } m. \quad (13)$$

$$S_T = \sum_{i=1}^m S_i \quad (14)$$

گام ۷. محاسبه درجه فرصت ازدست‌رفته و درصد فرصت به‌دست‌آمده.

درجه فرصت ازدست‌رفته (DOL) و درصد فرصت به‌دست‌آمده (POA) هر گزینه بر اساس روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$(DOL_i) = \frac{S_i}{S_T}, \quad (15)$$

در اینجا

$$\sum_{i=1}^m DOL_i = 1.$$

$$(POA_i) = 1 - DOL_i. \quad (16)$$

بدیهی است که DOL بین صفر و یک است. فرصت ازدست‌رفته صفر به این معناست که گزینه موردنظر در تمامی معیارها بهترین بوده است و هر چه این عدد به صفر نزدیک‌تر باشد، به این معناست که فرصت ازدست‌رفته کمتری برای گزینه وجود دارد و رتبه بالاتری را در ارزیابی نسبت به سایرین دارا است و در مورد POL بر عکس است. هر چه به عدد ۱۰۰ نزدیک باشد به معنای کسب موفقیت بالاتر و فرصت کسب شده بهتر است

یافته‌های پژوهش

در دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴، میانگین سالانه دمای منطقه برابر با ۱۴/۰۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. در این بازه، ۱۲ سال دما بالاتر از میانگین کل و ۸ سال دما پایین‌تر از میانگین کل قرار گرفته است، با بیشترین میانگین سالانه دما در سال ۲۰۱۰ برابر با ۱۴/۸۹ درجه و کمترین آن در سال ۲۰۱۲ برابر با ۱۳/۴۹ درجه. میانگین سالانه بارش در همین دوره برابر با ۱۹۸/۹ میلی‌متر بوده است که ۱۱ سال بارش کمتر از میانگین کل و ۹ سال بارش بالاتر از میانگین کل ثبت شده است. کمترین مقدار بارش مربوط به سال ۱۹۹۹ با ۱۱۲/۲ میلی‌متر و بیشترین آن مربوط به سال ۲۰۱۱ با ۳۲۰/۷ میلی‌متر بوده است.

۱. ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و دما با استفاده از روش OPLO-POCOD

در جدول (۶) و (۷) عملکرد سه مدل منتخب از مجموعه مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل CMCC-EMS2، CNRM- و CM6-1-HR و MPI-ESM1-2-LR در شبیه‌سازی بارش و دما منطقه مورد مطالعه ارائه شد. برای این منظور، از سه شاخص

آماري متداول شامل ضريب تعيين (R^2)، ميانگين قدرمطلق خطا (MAE) و ضريب کارايي نش-ساتکليف (KGE) استفاده شد. جدول زير مقادير اين شاخص ها را براي هر مدل ارائه مي دهد.

جدول ۶. عملکرد مدل های اقليمي در شبیه سازی بارش تحت شاخص آماری

مدل اقليمي (GCM)	KGE	MAE	R^2
CMCC-EMS2	۰/۳۸۱	۱۲/۲۵۴	۰/۱۸۸
CNRM-CM6-1-HR	۰/۱۲۵	۱۶/۳۷۹	۰/۱۲۶
MPI-ESM1-2-LR	۰/۱۲۸	۱۲/۸۲۴	۰/۱۲۹

جدول ۷. عملکرد مدل های اقليمي در شبیه سازی دما تحت شاخص آماری

مدل اقليمي (GCM)	KGE	MAE	R^2
CMCC-EMS2	۰/۷۳۳	۳/۱۶۱	۰/۹۲۸
CNRM-CM6-1-HR	-۰/۰۰۱	۵/۵۰۵	۰/۹۱۳
MPI-ESM1-2-LR	۰/۶۰۱	۴/۹۴۲	۰/۹۴۱

مدل CMCC-EMS2 در هر سه شاخص آماری در شبیه سازی بارش عملکرد بهتری از خود نشان داده است. این مدل دارای بالاترین مقدار R^2 با مقدار ۰/۱۸۸ است که نشان دهنده عملکرد بهتر آن در مقایسه به دو مدل دیگر در تبیین تغییرات داده های مشاهده شده است. همچنین، کمترین مقدار MAE با مقدار ۱۲/۲۵۴ میلیمتر و بیشترین مقدار KGE ۰/۳۸۱ نیز به این مدل تعلق دارد. بر این اساس، CMCC-EMS2 به عنوان بهترین مدل در شبیه سازی بارش منطقه انتخاب شد. مدل-MPI-ESM1-2-LR از نظر دو شاخص R^2 و MAE، مقادیری بسیار نزدیک به مدل برتر یعنی CMCC-EMS2 دارد به ترتیب ۰/۱۲۹ در مقابل ۰/۱۸۸ برای R^2 و ۱۲/۸۲۴ میلیمتر در مقابل ۱۲/۲۵۴ میلیمتر برای MAE. این شباهت نشان می دهد که این مدل نیز توان نسبتاً خوبی در بازتولید روند کلی و میانگین بارش دارد. با این حال، عملکرد ضعیف تر آن در شاخص KGE که ترکیبی از همبستگی، بایاس و نوسانات است، موجب می شود که دقت کلی آن نسبت به CMCC-EMS2 پایین تر ارزیابی شود. در مقابل، مدل CNRM-CM6-1-HR ضعیف ترین عملکرد را در میان سه مدل مورد بررسی داشته است. این مدل دارای کمترین مقدار R^2 ، بیشترین مقدار MAE و پایین ترین مقدار KGE است. به طور کلی، نتایج این مدل نشان می دهد که توانایی کمتری در بازنمایی ویژگی های آماری بارش منطقه دارد. در بخش دما نیز مدل CMCC-EMS2 با مقدار MAE برابر با ۳/۱۶۱ سانتی گراد و KGE برابر با ۰/۷۳۳ بهترین عملکرد را در میان مدل های مورد بررسی داشته است. این مقادیر نشان می دهند که این مدل هم کمترین خطای مطلق را داشته و هم بالاترین تعادل بین همبستگی، بایاس و واریانس را برقرار کرده است. مدل-MPI-ESM1-2-LR با ضريب تعيين R^2 برابر با ۰/۹۴۱ بالاترین مقدار این شاخص را داشته، اما از نظر MAE و KGE نسبت به مدل CMCC-EMS2 عملکرد ضعیف تری دارد. مدل CNRM-CM6-1-HR با MAE برابر با ۵/۵۰۵ سانتی گراد و مقدار KGE برابر با منفی ۰/۰۰۱ ضعیف ترین عملکرد را در بازسازی دما نشان داده است. در مجموع، مدل های CMCC-EMS2 و MPI-ESM1-2-LR به ترتیب بهترین و قابل قبول ترین عملکرد را داشته اند، در حالی که مدل CNRM-CM6-1-HR از دقت و کیفیت شبیه سازی نسبتاً پایینی برخوردار است. حال به منظور شناسایی بهترین مدل اقليمي از روش نوآورانه OPLO-POCOD استفاده گردید. روش یک تکنیک تصمیم گیری چندمعیاره است که بر پایه حداقل سازی زیان فرصت (Opportunity Loss) و فاصله کمتر در مختصات قطبی عمل می کند. که ابتدا ماتریس تصمیم گیری را نرمال سازی کرده، سپس ماتریس زیان فرصت را تشکیل می دهد و سپس با محاسبه فاصله قطبی بین گزینه ها و بهترین حالت، به ارزیابی وزنی گزینه ها می پردازد، در نهایت، گزینه ها بر اساس کمترین زیان فرصت و بیشترین درصد دستیابی به فرصت رتبه بندی می شوند. جدول (۸)، فرصت از دست رفته هر مدل را به تفکیک شاخص ها نشان می دهد، به طوری که می توان عملکرد هر مدل در هر شاخص را به صورت جداگانه مشاهده کرد. در مقابل، جدول ۹، فرصت از دست رفته را از دیدگاه شاخص ها ارائه می کند و میزان فرصت از دست رفته هر مدل را برای هر

شاخص مشخص می‌سازد. بر اساس شاخص فرصت ازدست‌رفته در روش OPLO-POCOD، مدل CMCC-EMS2 بهترین عملکرد را دارد زیرا کمترین مقدار فرصت ازدست‌رفته را برای بارش برابر ۰/۲۹۵۴۷ و برای دما برابر ۰/۲۳۳۷۶ ثبت کرده است. این مقدار کمتر نشان‌دهنده دقت بالاتر و خطای کمتر این مدل نسبت به سایر مدل‌هاست. مدل MPI-ESM1-2-LR با فرصت ازدست‌رفته ۰/۳۱۴۶۳ برای بارش و ۰/۳۴۸۸۲ برای دما در رتبه دوم قرار گرفته است که نشان می‌دهد دقت آن نسبت به مدل CMCC-EMS2 پایین‌تر است. مدل CNRM-CM6-1-HR با بیشترین فرصت ازدست‌رفته برای بارش برابر ۰/۳۸۹۹۰ و برای دما برابر ۰/۴۲۷۴۲ در جایگاه سوم است و عملکرد ضعیف‌تری نسبت به دو مدل دیگر دارد؛ بنابراین، از نظر شاخص فرصت ازدست‌رفته، بهترین مدل برای شبیه‌سازی بارش و دما CMCC-EMS2 است، سپس MPI-ESM1-2-LR و در نهایت CNRM-CM6-1-HR قرار می‌گیرد.

جدول ۸. نتایج ارزیابی و رتبه‌بندی با استفاده از روش OPLO-POCOD

رتبه	فرصت ازدست‌رفته	جمع	R ²	MAE	KGE	مدل اقلیمی (GCM)	
۱	۰/۲۹۵۴۷	۱	۰/۰۵۹۸	۰/۸۹۴۷	۰/۰۴۵۵	CMCC-EMS2	بارش
۲	۰/۳۸۹۹۰	۱	۰/۰۴۸۷	۰/۹۰۲۵	۰/۰۴۸۸	CNRM-CM6-1-HR	
۳	۰/۳۱۴۶۳	۱	۰/۰۶۰۲	۰/۸۷۹۵	۰/۰۶۰۳	MPI-ESM1-2-LR	
۱	۰/۲۳۳۷۶	۱	۰/۰۲۱۱	۰/۹۰۰۵	۰/۰۷۸۴	CMCC-EMS2	دما
۳	۰/۴۲۷۴۲	۱	۰/۰۱۳۵	۰/۸۳۳۳	۰/۱۵۴۲	CNRM-CM6-1-HR	
۲	۰/۳۴۸۸۲	۱	۰/۰۱۱۱	۰/۹۱۳۷	۰/۰۷۵۲	MPI-ESM1-2-LR	

جدول ۹. فرصت ازدست‌رفته بر اساس شاخص‌های ارزیابی

R ²	MAE	KGE	مدل اقلیمی (GCM)	
۰/۳۱۸	۰/۲۹۶	۰/۲۶۲	CMCC-EMS2	بارش
۰/۳۴۲	۰/۳۹۴	۰/۳۷۰	CNRM-CM6-1-HR	
۰/۳۴	۰/۳۱۰	۰/۳۶۸	MPI-ESM1-2-LR	
۰/۳۲۹	۰/۲۳۰	۰/۱۶	CMCC-EMS2	دما
۰/۴۰۱	۰/۴۰۶	۰/۶	CNRM-CM6-1-HR	
۰/۲۷۰	۰/۳۶۴	۰/۲۴	MPI-ESM1-2-LR	

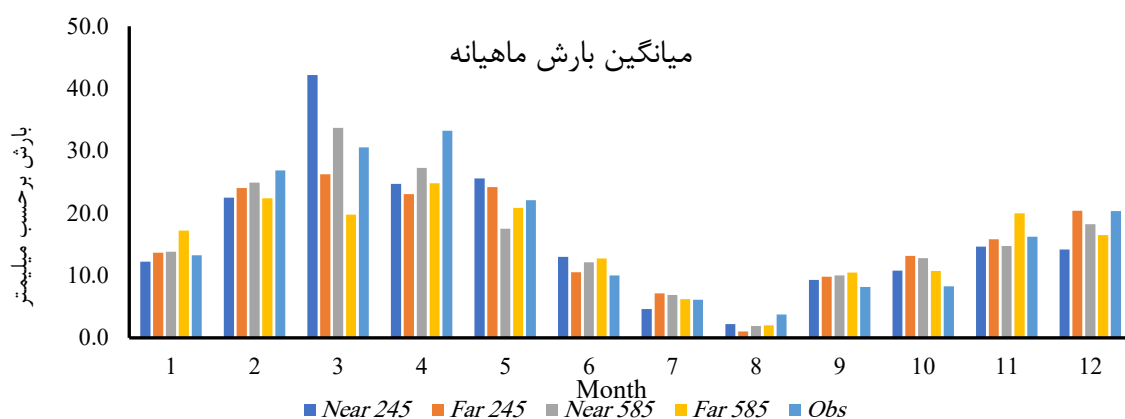
بنابراین، باتوجه به نتایج حاصل از روش OPLO-POCOD و عملکرد برتر مدل اقلیمی CMCC-EMS2 از نظر شاخص فرصت ازدست‌رفته، از این مدل برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. این پیش‌بینی‌ها برای دو بازه زمانی آینده شامل دوره آینده نزدیک (۲۰۱۵ تا ۲۰۳۴) و دوره آینده دور (۲۰۳۵ تا ۲۰۵۶) و تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام شد.

۲. بارش

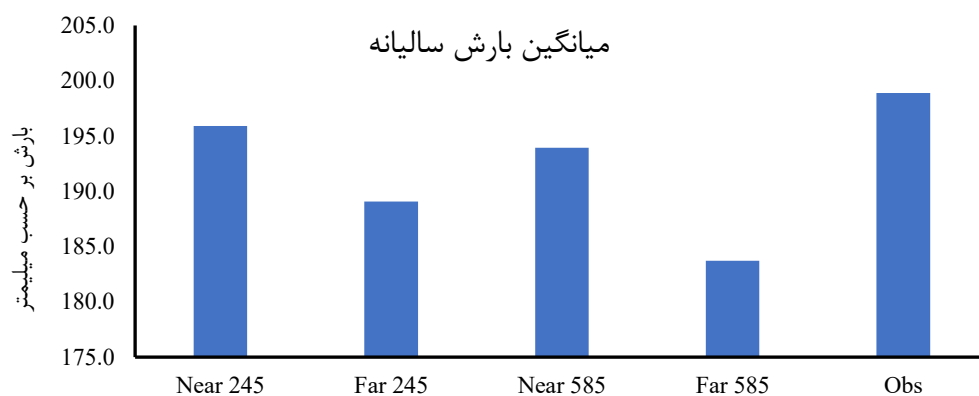
بر اساس داده‌های حاصل از مدل‌های اقلیمی CMIP6 و نمودارهای ارائه‌شده (شکل‌های (۴ تا ۷) و جدول (۱۰)، تغییرات بارش منطقه مورد مطالعه در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) تحت دو سناریوی انتشاراتی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در تمامی سناریوها و در هر دو بازه زمانی، میانگین بارش سالانه نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) کاهش یافته است. این کاهش، هرچند لازم به ذکر است که الگوی بارش و پراکنش بارش در فصول مختلف سال دچار تغییر گردیده است خود بیانگر اثرات فراگیر تغییر اقلیم بر الگوی بارش منطقه است. روند کلی نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه در تمامی سناریوهای آینده نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) کاهش یافته است. مقدار بارش سالانه در دوره پایه برابر با ۱۹۸/۹ میلی‌متر بوده است. در دوره آینده نزدیک، این مقدار به حدود ۱۹۴ تا ۱۹۵ میلی‌متر و در دوره آینده دور به ۱۸۴ تا ۱۸۹ میلی‌متر کاهش می‌یابد. شدیدترین افت بارش مربوط به سناریوی SSP5-8.5 در

افق دور است که از نظر اقلیمی نشان دهنده افزایش ریسک خشکسالی در بلندمدت است. این کاهش کلی، گرچه مهم است، اما آنچه اهمیت بیشتری دارد، نحوه توزیع نابرابر آن در ماه ها و فصول مختلف سال است. در بررسی تغییرات فصلی بارش می توان دریافت که مجموع میزان بارش کاهشی است، اما این کاهش در طول سال به صورت یکنواخت توزیع نشده و رفتار بارش در هر فصل ویژگی های خاص خود را دارد. فصل زمستان که هم اکنون پربارش ترین دوره سال است و نقشی حیاتی در تأمین منابع آبی سطحی و تغذیه آبخوان ها ایفا می کند، در سناریوهای آینده رفتار پیچیده ای نشان می دهد. در آینده نزدیک، دو سناریو مورد بررسی حتی افزایش اندکی در بارش زمستانه را پیش بینی می کنند که می تواند حاصل نوسانات طبیعی اقلیم باشد. اما در دوره آینده دور، هر دو سناریو کاهش قابل توجهی را نشان می دهند و به ویژه در سناریوی پر انتشار SSP5-8.5، کاهش ۱۶ درصدی در بارش زمستانی هشداردهنده است. این کاهش در مهم ترین فصل سال می تواند تهدیدی جدی برای امنیت آبی و برنامه ریزی منابع باشد. در فصل بهار که معمولاً دومین دوره بارش خیز منطقه محسوب می شود و روند تغییرات بسیار یکپارچه تر و مشخص تر است، تمامی سناریوهای آینده کاهش بارش را در این فصل نشان می دهند. میزان این کاهش بین ۳ تا ۱۳ درصد متغیر است که بسته به سناریو و بازه زمانی تغییر می کند. در بررسی فصل پاییز که به عنوان دوره گذار به فصل های مرطوب شناخته می شود، نتایج نشان می دهند که در اغلب سناریوهای آینده، به ویژه در بازه بلندمدت، بارش این فصل اندکی افزایش می یابد. تنها در سناریوی آینده نزدیک با انتشار پایین، کاهش بارش دیده می شود. این رفتار می تواند بیانگر نوعی جابه جایی در رژیم بارندگی باشد. در فصل تابستان، همان طور که انتظار می رود، بارش ها در سطح بسیار پایین باقی می ماند. این فصل همواره خشک ترین دوره سال بوده و نتایج مدل ها نیز نشان می دهد که در آینده تغییری چشمگیر در این وضعیت رخ نخواهد داد. در برخی سناریوها حتی افزایش های بسیار جزئی مشاهده شده، اما این تغییرات آن قدر کوچک هستند که نمی توانند تغییری اساسی در وضعیت اقلیمی تابستان ایجاد کنند؛ بنابراین تابستان خشک خواهد ماند. در نهایت با تحلیل شکل (۴) مشخص می شود، تحلیل داده ها فراتر از یک نتیجه گیری ساده مبنی بر خشک تر شدن برخی از فصول سال است. ما شاهد دگرگونی در رژیم و زمان بندی بارش هستیم؛ زمستان ها و بهارهای خشک تر همراه با بارش کمتر و افزایش جزئی بار در فصول پاییز و تابستان. این تغییر در تقویم هیدرولوژیکی منطقه، چالشی عمیق برای تمامی بخش های وابسته به آب، از کشاورزی و صنعت گرفته تا اکوسیستم های طبیعی که طی هزاران سال با ریتم گذشته سازگار شده اند، ایجاد می کند؛ بنابراین، برنامه ریزی برای استراتژی های سازگاران، بازنگری در الگوهای کشت و مدیریت انعطاف پذیر منابع آب، دیگر یک انتخاب نیست، بلکه یک ضرورت فوری برای تضمین آینده پایدار منطقه است. یافته های این پژوهش با نتایج برخی از مطالعات صورت پذیرفته اخیر در ایران هم راستا است، برای مثال نادری^۱ (۲۰۲۵) در پژوهشی که با استفاده از مجموعه ۲۹ مدل CMIP6 در کل کشور صورت گرفت، نتایج نشان داد که بارش سالانه ایران در سناریو SSP2-4.5 حدود ۱۲-۲۴ درصد و در SSP5-8.5 حدود ۸-۲۴ درصد کاهش می یابد. وحدتifer و همکاران^۲ (۲۰۲۵) در پژوهشی به منظور بررسی تغییرات بارش در دو ناحیه غربی و شرقی استان مازندران با استفاده از پنج مدل CMIP6 تحت سناریوهای SSP2-2.6 و SSP5-8.5 نشان دادند که در آینده بلندمدت (دوره ۲۰۵۱-۲۰۸۰) میانگین بارش کاهش می یابد. به طور نمونه، در غرب مازندران تا حدود ۵۵/۷ میلی متر کاهش بارش و در شرق حدود ۳۱/۳ میلی متر کاهش بارش نسبت به دوره پایه پیش بینی شده است.

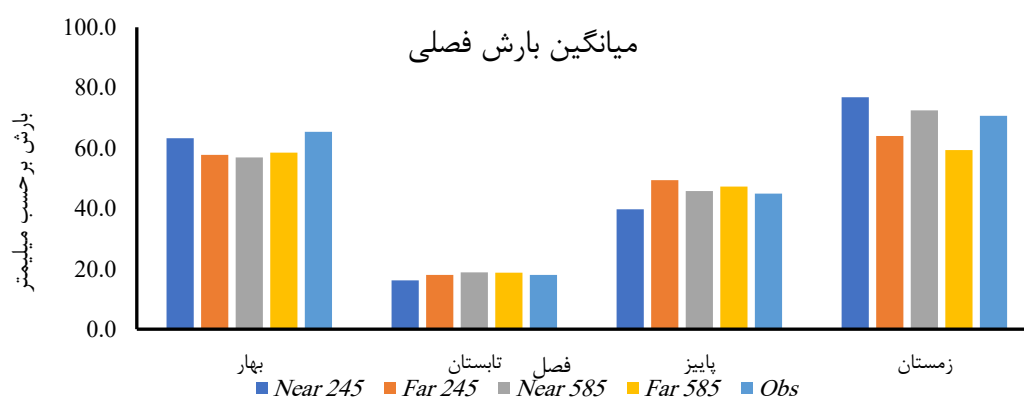
¹ Naderi² Vahdatifar et al



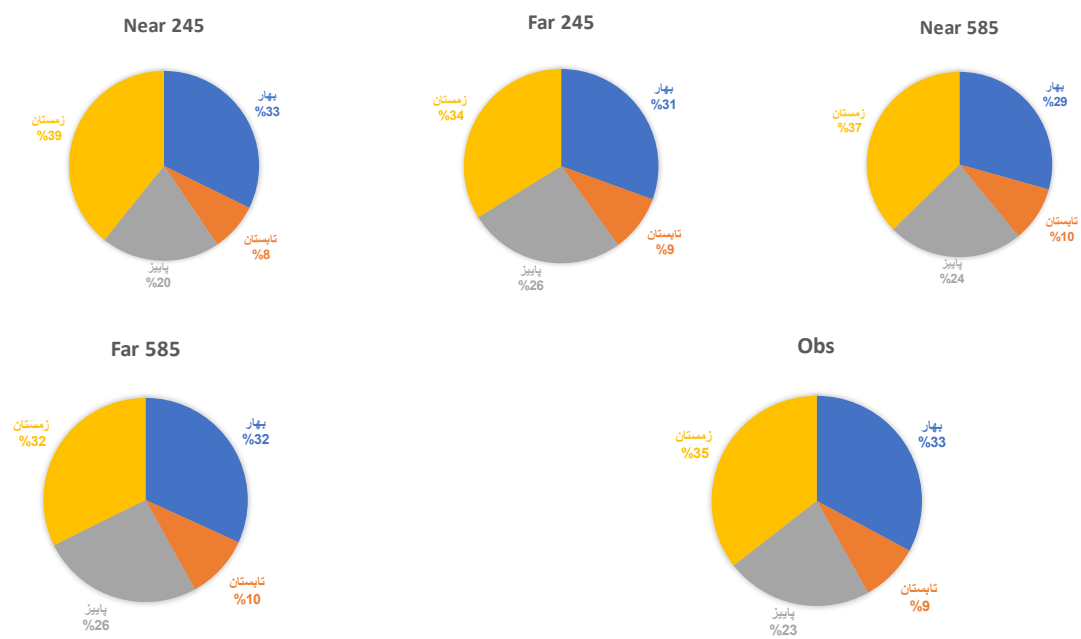
شکل ۴. میانگین بارش ماهیانه منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۵. میانگین بارش سالیانه منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۶. میانگین بارش فصلی منطقه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۷. میانگین سهم بارش هر فصل تحت سناریوهای مختلف در دوره های آبی در مقایسه با دوره پایه

جدول ۱۰. خلاصه‌ای از تغییر اقلیم بارش دوره آتی همراه با پیامدهای راهبردی در مقایسه با دوره پایه

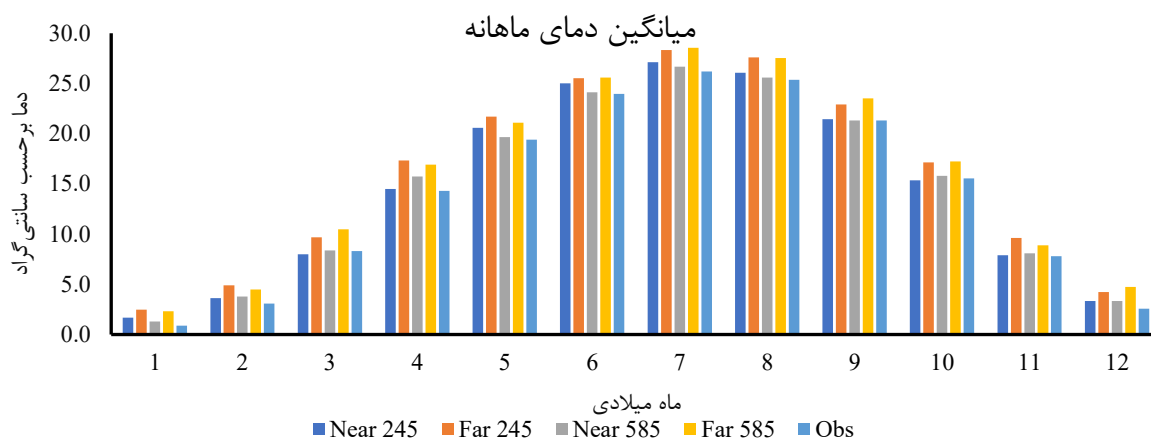
شاخص	دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴)	دوره آینده (بهترین/بدترین حالت)	تغییرات کلیدی	پیامدهای راهبردی
مجموع بارش سالانه	۱۹۸/۹ میلی‌متر	۱۸۴/۴ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ کاهش ۱۴.۵ میلی‌متر (حدود ۷/۳٪)	کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، تشدید نیاز به بازنگری مدیریت منابع آبی
بارش زمستان	۷۰/۷ میلی‌متر	۵۹/۴ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ کاهش ۱۶٪ در بحرانی‌ترین سناریو	تهدید مستقیم برای تغذیه آبخوان‌ها، کاهش رواناب زمستانه
بارش بهار	۶۵/۳ میلی‌متر	۵۶/۹ میلی‌متر (Near 5-8.5)	▼ کاهش ۱۲/۹٪ در بحرانی‌ترین سناریو	تأثیر منفی بر کشاورزی بهار و رشد پوشش گیاهی طبیعی
بارش پاییز	۴۴/۹ میلی‌متر	۴۹/۳ میلی‌متر (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱۰٪ در بحرانی‌ترین سناریو	جبران جزئی بارش ازدست‌رفته زمستان، بهبود شروع دوره مرطوب
بارش تابستان	۱۸/۱ میلی‌متر	۱۸/۸ میلی‌متر (Near 5-8.5)	▲ افزایش جزئی (۳/۹ درصد)، تغییر ناچیز	تابستان خشک باقی می‌ماند، با تغییرات اقلیمی ناچیز در این فصل
ماه با بیشترین کاهش بارش	اسفند (۳۰/۶ میلی‌متر)	۱۹/۸ میلی‌متر (Far 5-8.5)	▼ افت ۳۵٪ در پایان زمستان	تشدید خشکی در اسفند می‌تواند تأثیر منفی بر ذوب برف و رواناب بهاری داشته باشد
ماه با بیشترین افزایش بارش	اسفند (۳۰/۶ میلی‌متر)	۴۲/۲ میلی‌متر (Near 2-4.5)	▲ افزایش ۳۷/۹٪ در پایان زمستان	افزایش میزان بارش در ماه پایانی فصول زمستان و جبران کاهش باران زمستانی
توزیع فصلی بارش در آینده	۳۵٪ زمستان، ۳۳٪ بهار، ۲۳٪ پاییز، ۹٪ تابستان	۳۲٪ زمستان، ۳۲٪ بهار، ۲۶٪ پاییز، ۱۰٪ تابستان	▼ کاهش سهم زمستان و بهار، ▲ افزایش سهم پاییز	بازتوزیع رژیم بارش نیازمند تطابق در الگوهای کشاورزی و آبیاری است
تغییر بارش در سناریوی خوش‌بینانه (Near 2-4.5)	۱۹۵.۹ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۱/۵٪	علی‌رغم انتشار کمتر، روند خشکی ادامه دارد؛ اما شدید نیست	احتمال فرصت برای مدیریت پایدارتر در سناریوهای کم‌انتشار
تغییر بارش در سناریوی خوش‌بینانه (Far 2-4.5)	۱۸۹.۱ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۵٪	علی‌رغم انتشار کمتر، روند خشکی ادامه دارد؛ اما شدید نیست	احتمال فرصت برای مدیریت پایدارتر در سناریوهای کم‌انتشار
تغییر بارش در سناریوی بدبینانه (Near 5-8.5)	۱۹۳.۹ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۲/۴۹٪	اثر گرمایش جهانی شدیدتر در کاهش بارندگی در درازمدت نمایان می‌شود	نیاز به سازگاری بیشتر در سناریوهای پر انتشار و شدید
تغییر بارش در سناریوی بدبینانه (Far 5-8.5)	۱۸۴.۴ → ۱۹۸.۹ میلی‌متر	▼ کاهش ۷/۳٪	اثر گرمایش جهانی شدیدتر در کاهش بارندگی در درازمدت نمایان می‌شود	نیاز به سازگاری بیشتر در سناریوهای پر انتشار و شدید

۳. دما

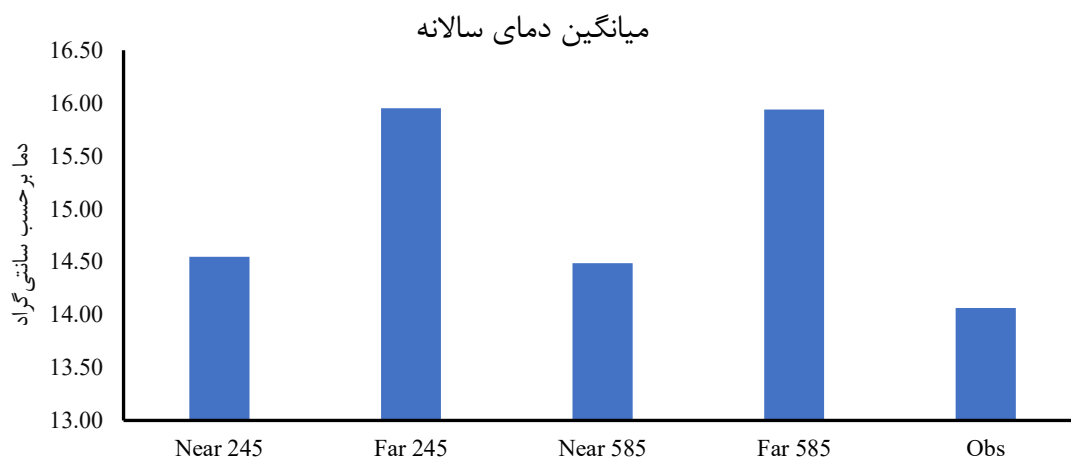
بر اساس داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6 شکل‌های (۸ تا ۱۰) و جدول (۱۱)، تغییرات دما در دوره آینده نزدیک برای دو سناریوی انتشاراتی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در منطقه مورد مطالعه (شهرستان شاهرود)، میانگین دمای ماهانه در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴) افزایش یافته است. این افزایش در تمامی

دوره‌ها مشاهده می‌شود، اما الگوی فصلی آن متفاوت است. در سناریوی SSP2-4.5، بیشترین افزایش دما در ماه‌های سرد سال (دی، بهمن، اسفند) مشاهده شده و در برخی موارد حتی از سناریوی SSP5-8.5 نیز بیشتر بوده است. در سناریوی SSP5-8.5، افزایش دما در ماه‌های گرم (تیر، مرداد) بیشتر از سایر ماه‌ها بوده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در دوره آینده نزدیک، دو سناریو تفاوت قابل توجهی در برآورد افزایش دما ندارند و در برخی ماه‌ها حتی SSP2-4.5 دمای بالاتری نسبت به SSP5-8.5 نشان داده است. این پدیده می‌تواند به دلیل پاسخ خطی‌تر مدل‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، تأخیر در بروز اثرات کامل سناریوی انتشار، یا شرایط خاص منطقه‌ای باشد. در دوره آینده دور، هر دو سناریو همچنان روند افزایشی دما را نشان می‌دهند. با این حال میانگین افزایش دما در SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه، در بیشتر ماه‌ها بیشتر از SSP2-4.5 است، هرچند تفاوت‌ها همچنان محدود است. الگوی فصلی تغییر کرده؛ در SSP2-4.5 همچنان افزایش دمای زمستانه غالب است، در حالی که در SSP5-8.5 تابستان‌ها بیشترین گرمایش را نشان می‌دهند. این تفاوت نشانگر این است که الگوهای دما در فصول تحت سناریوهای اقلیمی متفاوت تغییر کرده است. به منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات دما در سطح فصلی، میانگین دمای چهار فصل سال برای دوره مشاهداتی و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۳۴) و آینده دور (۲۰۳۵-۲۰۵۶) تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شد (شکل ۷). نتایج نشان می‌دهد که در تمامی فصول، دمای هوا نسبت به دوره مشاهداتی افزایش یافته است، اما میزان این افزایش در بین سناریوها و فصول متفاوت است. در فصل تابستان، هر دو سناریو افزایش دمای قابل توجهی را نشان می‌دهند. سناریوی SSP5-8.5 به‌ویژه در دوره آینده دور افزایش دمای بیشتری نسبت به سایر حالات دارد که قابل انتظار است. این در حالی است که در زمستان، برخلاف انتظار، در هر دو دوره آینده، سناریوی SSP2-4.5 دمای بالاتری نسبت به SSP5-8.5 نشان داده است. در دو فصل بهار و پاییز نیز تغییرات نسبت به دوره مبنا مشاهده می‌شود، اما تفاوت بین سناریوها چندان چشم‌گیر نیست. در مجموع، تحلیل فصلی نیز همان الگوهایی را نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه مشاهده شد: یعنی افزایش دما در همه سناریوها نسبت به گذشته، با تفاوت‌های جزئی بین سناریوها در بازه آینده نزدیک، و پاسخ غیرمنتظره در برخی فصول مانند زمستان. با بررسی شکل ۶ همچنین می‌توان دریافت که در آینده نزدیک در هر دو سناریو میزان افزایش دما در حدود ۱/۴ درجه سانتی‌گراد است ولی این افزایش دما برای آینده دور برای سناریو SSP2-4.5 به میزان ۱/۹ درجه و SSP5-8.5 به میزان ۱/۸ درجه سانتی‌گراد است که نشانگر تفاوت جزئی تحت سناریو SSP2-4.5 به میزان ۰.۱ نسبت به سناریو بدبینانه است که در مجموعه نشان‌دهنده افزایش دمای حدوداً یکسان در مانگین دمای سالانه در دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه است. یافته‌های این پژوهش با نتایج برخی از مطالعات صورت پذیرفته اخیر در ایران هم‌راستا است. برای نمونه در مطالعه‌ای که توسط گودرزی و همکاران در سال ۲۰۲۴ بر حوضه دز صورت گرفت، نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه تحت SSP2-4.5 حدود ۲/۷ C° و تحت SSP5-8.5 حدود ۲/۳۶ C° افزایش داشته است؛ یعنی در دوره آینده نزدیک، SSP2-4.5 گرم‌تر از SSP5-8.5 بوده است (گودرزی و همکاران^۱، ۲۰۲۴). همچنین در مطالعات دیگر مانند اسفنده و همکاران^۲ (۲۰۲۴) که اثر تغییر اقلیم را بر سواحل جنوبی ایران بررسی کردند، نتایج نشان داد که میانگین دمای سالانه در تمامی مناطق در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت. جالب اینکه بین SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تفاوت اندکی مشاهده شد. برای مثال در ایستگاه بندر لنگه، افزایش دما در ۲۰۲۱-۲۰۴۵ به ترتیب در سناریو SSP2-4.5 به میزان ۱/۴۰ درجه سانتی‌گراد افزایش گزارش شد و تحت سناریو SSP5-8.5 این افزایش به مقدار ۱/۴۱ درجه سانتی‌گراد است. در دوره بعدی نیز تفاوت بسیار ناچیز به‌عنوان مثال ۱/۴۱ در برابر ۱/۴۲ گزارش کردید. به عبارت دیگر سناریو SSP2-5.4 تقریباً همان میزان افزایش دمایی را نشان می‌دهد که سناریو SSP5-8.5 دارد.

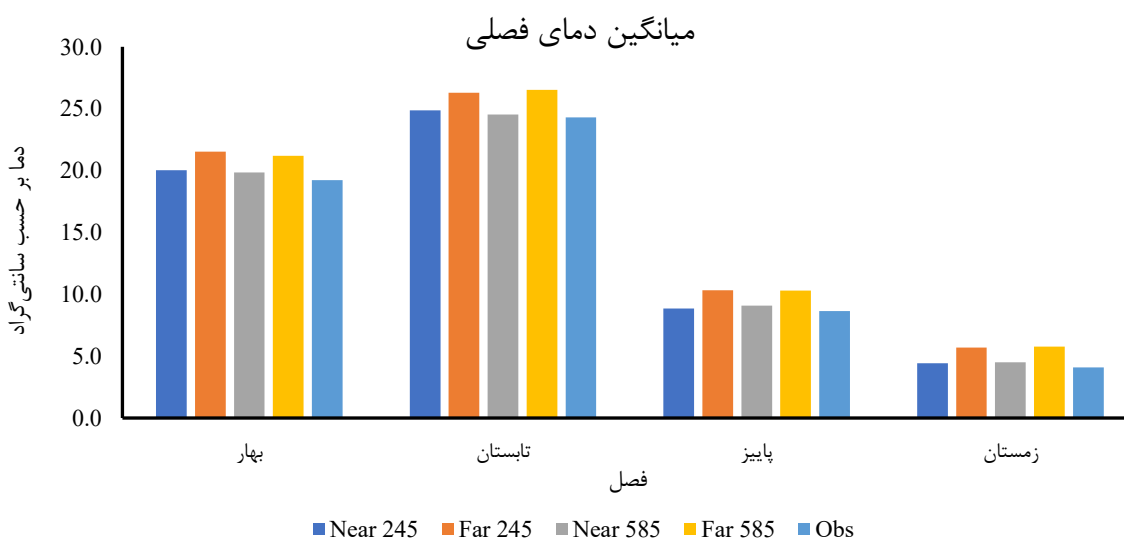
¹ Goodarzi et al² (Esfandeh et al



شکل ۸. میانگین دمای ماهانه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۹. میانگین دمای سالانه شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه



شکل ۱۰. میانگین دمای فصلی شهرستان شاهرود تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره پایه

جدول ۱۱. خلاصه ای از تغییر اقلیم دما دوره آتی همراه با پیامدهای راهبردی در مقایسه با دوره پایه

شاخص	دوره پایه (۱۹۹۵-۲۰۱۴)	دوره آینده (بهترین/بدترین حالت)	تغییرات کلیدی	پیامدهای راهبردی
میانگین دمای سالانه	درجه ۱۴/۰۶	درجه ۱۵/۹۵ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱/۹ درجه (حدود ۱۳/۵٪)	افزایش میانگین دمای سالانه منجر به افزایش تبخیر و تعرق، نیاز بیشتر به آبیاری
میانگین دمای زمستان	درجه ۴/۱	درجه ۵/۷ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۱/۶ درجه	تشدید گرمایش زمستانی با اثر بر نوع و مقدار بارش (برف به باران)
میانگین دمای بهار	درجه ۱۹/۲	درجه ۲۱/۵ (Far 2-4.5)	▲ افزایش ۲/۳ درجه	افزایش دمای بهار می تواند بر رشد زودرس گیاهان و تبخیر اثر بگذارد
میانگین دمای تابستان	درجه ۲۴/۳	درجه ۲۶/۵ (Far 5-8.5)	▲ افزایش ۲/۲ درجه	افزایش دمای تابستان تشدید تنش گرمایی برای محصولات کشاورزی و منابع آبی
میانگین دمای پاییز	درجه ۸/۶	درجه ۱۰/۳ (Far 2-4.5 / 5-8.5)	▲ افزایش ۱/۷ درجه	افزایش دمای پاییز می تواند آغاز دوره تبخیر بالا را جلو بیندازد
ماه با بیشترین افزایش دما	درجه ۱۴/۳	درجه ۱۷/۳	▲ بیشترین افزایش دما ۳/۰ درجه در فروردین (آینده دور، SSP2-4.5)	افزایش زودهنگام دما در بهار می تواند بر تقویم زراعی و نیاز آبی اثرگذار باشد
ماه با کمترین افزایش دما	درجه ۲۱/۳	درجه ۲۱/۳	بدون افزایش دما در شهریور (آینده نزدیک، SSP5-8.5)	پایداری نسبی دمای تابستان می تواند فرصت هایی برای سازگاری فراهم کند
بدترین سناریو (Far 5-8.5)	درجه ۱۴/۰۷	درجه ۱۵/۹۳ (Far 5-8.5)	▲ افزایش کلی ۱/۸۷ درجه	سناریوی شدید اقلیمی (Far 5-8.5) با گرم ترین وضعیت در کل فصول همراه است
بهترین سناریو (Near 2-4.5)	درجه ۱۴/۰۷	درجه ۱۴/۵۵ (Near 2-4.5)	▲ افزایش ۰/۴۸ درجه	حتی در سناریوی کم انتشار (Near 2-4.5) روند گرم شدن ادامه دارد

۳. اثرات تغییر اقلیم و فرصت های نوآرانه سازگاری

تأثیر تغییر اقلیم بر کشاورزی

تغییرات اقلیمی در منطقه شاهرود با افزایش دما و کاهش و بازتوزیع بارش در فصول مختلف همراه است. این تغییرات به ویژه کاهش بارش زمستانه و بهار و افزایش دمای هوا، تنش آبی بر محصولات کشاورزی وارد کرده و عملکرد محصولات حساس به خشکی را کاهش می دهد. بازتوزیع بارش فصلی و تغییر تقویم هیدرولوژیکی نیازمند بازنگری در الگوهای کشت، انتخاب گونه های مقاوم به کم آبی و بهبود سیستم های آبیاری است تا کشاورزی منطقه بتواند با شرایط آینده سازگار شود.

تأثیر تغییر اقلیم بر آب زیرزمینی

کاهش بارش زمستانه و بهار در منطقه شاهرود، همراه با افزایش دما و تبخیر، فشار زیادی بر منابع آب زیرزمینی وارد می کند. کاهش تأمین آب سطحی و رواناب زمستانه موجب کاهش نفوذ به آبخوان ها می شود و در نتیجه سطح ایستابی آب های زیرزمینی کاهش می یابد. با کاهش بارش و آب در دسترس، فشار برداشت و اتکا به آب زیرزمینی نیز افزایش می یابد که می تواند تنش آبی برای کشاورزی و صنایع وابسته ایجاد کند و تأثیر منفی بر اکوسیستم ها داشته باشد. بازتوزیع فصلی بارش، با افزایش جزئی بارش در پاییز و کاهش در زمستان و بهار، نشان دهنده تغییر در الگوی تغذیه آبخوان ها است و نیازمند مدیریت انعطاف پذیر و برنامه ریزی بلندمدت برای استفاده پایدار از منابع زیرزمینی است. استفاده از فناوری های بهینه سازی برداشت آب، افزایش ذخیره سازی مصنوعی و اصلاح تقویم آبیاری می تواند به کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم بر منابع زیرزمینی کمک کند.

مدیریت پایدار آب با اتکا بر بازچرخانی و تصفیه

به‌منظور مقابله با محدودیت منابع آب و افزایش بهره‌وری در بخش کشاورزی و سایر مصرف‌کنندگان، لازم است الگوهای مصرف بازطراحی شده و هدررفت آب به حداقل برسد. بهره‌گیری از بازچرخانی و تصفیه آب در بخش‌های مختلف مصرف، ضمن افزایش توازن میان عرضه و تقاضا، امکان ذخیره‌سازی مؤثر و توزیع بهینه منابع آب را فراهم می‌کند. این رویکرد، علاوه بر کاهش فشار بر آبخوان‌ها و منابع سطحی، امکان تطبیق کشاورزی و سایر فعالیت‌ها با شرایط آبی متغیر را ایجاد کرده و راهبردی کلیدی برای مدیریت پایدار و انعطاف‌پذیر منابع آب منطقه محسوب می‌شود.

فناوری‌های نوین به‌عنوان فرصت تطابق با تغییر اقلیم

فناوری‌های نوین، راهکاری کلیدی برای ارتقای انعطاف‌پذیری بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب در مواجهه با تغییر اقلیم فراهم می‌کنند. بهره‌گیری از آبیاری هوشمند، حسگرهای محیطی، پایش آنالین منابع آب و ذخیره‌سازی مصنوعی، امکان تطبیق دقیق مصرف آب با نیاز واقعی محصولات و کاهش هدررفت منابع را فراهم می‌آورد. علاوه بر این، ابزارهای پیش‌بینی اقلیمی و سیستم‌های دیجیتال مدیریت آب، برنامه‌ریزی بلندمدت و تصمیم‌گیری هوشمند را تسهیل می‌کنند و فشار بر منابع زیرزمینی و سطحی را کاهش می‌دهند. ادغام نوآوری‌های فناوری در مدیریت منابع آب، فرصتی استراتژیک برای تحقق کشاورزی پایدار و مقاوم در برابر اثرات تغییر اقلیم ایجاد می‌کند.

بحث

نتایج ارزیابی مدل‌های اقلیمی نشان داد که عملکرد مدل‌های CMIP6 در بازنمایی متغیرهای دما و بارش منطقه شاهرود یکسان نیست و انتخاب مدل مناسب نقش مهمی در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد. در این پژوهش، مدل CMCC-EMS2 بر اساس ترکیب شاخص‌های آماری R^2 ، MAE و KGE و با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به مدل‌های MPI-ESM1-2-LR و CNRM-CM6-1-HR نشان داد. مقادیر فرست از دست‌رفته ۰/۲۹۵ برای بارش و ۰/۲۲۴ برای دما، همراه با عملکرد آماری بهتر، نشان می‌دهد که این مدل می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای بررسی تغییرات اقلیمی آینده در منطقه شاهرود باشد. استفاده هم‌زمان از چند شاخص عملکردی و یک روش تصمیم‌گیری چندمعیاره، امکان ارزیابی جامع‌تر مدل‌ها را فراهم کرده و از اتکا به یک معیار آماری منفرد جلوگیری می‌کند. بر اساس نتایج مدل منتخب، تغییرات آینده اقلیم منطقه با کاهش نسبی بارش و افزایش دما همراه خواهد بود. میانگین سالانه بارش از مقدار پایه ۱۹۸/۹ میلی‌متر به حدود ۱۹۵/۹ میلی‌متر در سناریوی SSP2-4.5 در آینده نزدیک و ۱۸۴/۴ میلی‌متر در سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور کاهش می‌یابد. این کاهش که حدود ۱/۵ تا ۷/۳ درصد برآورد شده است، صرفاً به تغییر مقدار کل بارش محدود نمی‌شود، بلکه با تغییر در توزیع زمانی و فصلی بارندگی نیز همراه است. کاهش بارش زمستانه که در برخی سناریوها به حدود ۱۶ درصد می‌رسد، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ زیرا بارش زمستانی در تأمین منابع آب منطقه و تغذیه منابع سطحی و زیرزمینی نقش مهمی دارد. در مقابل، احتمال افزایش جزئی بارش پاییزی در برخی سناریوها می‌تواند نشان‌دهنده تغییر در رژیم فصلی بارندگی و جابه‌جایی زمانی بخشی از بارش باشد. چنین تغییری می‌تواند پیامدهای قابل توجهی برای زمان‌بندی فعالیت‌های کشاورزی، مدیریت رواناب و برنامه‌ریزی منابع آب داشته باشد.

در مقابل کاهش بارش، افزایش دما در تمام فصول مشاهده شد و میانگین سالانه دما از مقدار پایه ۱۴/۰۶ درجه سانتی‌گراد به حدود ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. شدت بیشتر افزایش دما در بهار و تابستان و ثبت افزایش ماهانه تا ۳ درجه سانتی‌گراد در فروردین، بیانگر احتمال افزایش نیاز آبی و تبخیر و تعرق در دوره‌های گرم سال است. از این منظر، ترکیب کاهش بارش و افزایش دما می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آب منطقه وارد کند و آسیب‌پذیری بخش کشاورزی را افزایش دهد؛ بنابراین، آثار تغییر اقلیم در منطقه شاهرود باید نه تنها بر اساس تغییر مقدار بارش و دما، بلکه بر مبنای اثر متقابل این دو متغیر بر تقاضای آب، تقویم زراعی و وضعیت منابع آب بررسی شود.

یکی از یافته‌های قابل توجه، نزدیک بودن افزایش دمای شبیه‌سازی شده تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در افق‌های زمانی مورد بررسی است. برای نمونه، در آینده دور میانگین دمای سالانه در سناریوی SSP2-4.5 برابر ۱۵/۹۵ درجه و در سناریوی SSP5-8.5 برابر ۱۵/۹۳ درجه گزارش شده است. این همگرایی را می‌توان با توجه به افق زمانی مورد بررسی، رفتار مدل و ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی منطقه تفسیر کرد؛ با این حال، نباید نزدیکی نتایج دو سناریو به معنای نبود تفاوت میان مسیرهای انتشار یا بی‌اهمیت بودن سناریوی پر انتشار تلقی شود. در واقع، بخشی از تفاوت میان سناریوها ممکن است در افق‌های زمانی طولانی‌تر و تحت اثر انباشت تغییرات اقلیمی آشکارتر شود.

با وجود عملکرد مناسب مدل CMCC-EMS2، استفاده از تنها یک مدل اقلیمی می‌تواند بخشی از عدم قطعیت موجود در برآوردهای آینده را پنهان کند. از این رو، استفاده از مدل‌های همادی (Ensemble) در مطالعات آتی می‌تواند با ترکیب اطلاعات چند مدل، دامنه عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها را بهتر مشخص کند. همچنین، بررسی سناریوهای متنوع‌تر انتشار گازهای گلخانه‌ای و مقایسه نظام‌مند مدل‌های CMIP6 با نسل قبلی CMIP5 می‌تواند درک دقیق‌تری از تغییرات احتمالی اقلیم منطقه و میزان بهبود عملکرد مدل‌های جدید فراهم سازد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل‌های اقلیمی CMIP6 عملکرد متفاوتی در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه شاهرود دارند و بر اساس ارزیابی هم‌زمان شاخص‌های R^2 ، MAE و KGE و روش تصمیم‌گیری چندمعیاره OPLO-POCOD، مدل CMCC-EMS2 به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب شد. این مدل با کمترین فرست از دست‌رفته، به ترتیب ۰/۲۹۵ برای بارش و ۰/۲۲۴ برای دما، قابلیت بالاتری برای بازنمایی شرایط اقلیمی منطقه نشان داد.

پیش‌بینی‌های مدل منتخب بیانگر آن است که اقلیم آینده شاهرود با کاهش بارش، افزایش دما و تغییر در توزیع فصلی بارندگی همراه خواهد بود. کاهش بارش سالانه تا حدود ۷/۳ درصد و کاهش بارش زمستانه تا حدود ۱۶ درصد، در کنار افزایش میانگین دمای سالانه از ۱۴/۰۶ به حدود ۱۵/۹ درجه سانتی‌گراد، می‌تواند فشار بر منابع آب و بخش کشاورزی منطقه را افزایش دهد. بنابراین، توجه به نتایج پیش‌بینی‌های اقلیمی در برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت کشاورزی و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش بر ضرورت مدیریت پیش‌نگر منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در منطقه شاهرود تأکید دارد. با این حال، به منظور کاهش عدم قطعیت و افزایش قابلیت اطمینان نتایج، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده از رویکردهای همادی، تعداد بیشتری از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای متنوع انتشار استفاده شود و نتایج مدل‌های جدید با CMIP5 نیز مقایسه گردد. این اقدامات می‌تواند مبنای علمی مناسب‌تری برای ارزیابی ریسک‌های اقلیمی و طراحی سیاست‌های سازگاری بلندمدت در منطقه فراهم کند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

جمع‌آوری داده‌ها: سینا خوشنویسان، صمد امامقلی؛ تهیه گزارش پژوهش: سینا خوشنویسان؛ تحلیل داده‌ها: سینا خوشنویسان، صمد امامقلی؛ زاده

مشارکت نویسندگان در مقاله مستخرج از پایان‌نامه تقریباً به شکل زیر باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنهاد مقاله

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- الماسی، آرینا، فاطمی، سیداحسان، و اقبالزاده، افشین. (۱۴۰۳). پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم. نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۱)، ۴۰-۶۴.
<https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097>
- ایمانی، تکتّم، دلقندی، مهدی، امامقلی‌زاده، صمد، و گنجی‌نوروزی، زهرا. (۱۴۰۱). تأثیر تغییر اقلیم بر حجم و دبی پیک سیلاب (مطالعه موردی: زیرحوضه قران تالار). مجله اکوهیدرولوژی، ۹(۱)، ۲۷۲-۲۵۹. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576>
- پولادگر، سعید، عزیزی مبصر، جوانشیر، رضانی مقدم، جواد، و اصغری، علی. (۱۴۰۱). ارزیابی کارایی مدل آکواکراپ برای گیاه ذرت تحت مدیریت آب و کود (مطالعه موردی: شهرستان شوش). نشریه فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۲(۱)، ۸۴-۶۷. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097>
- حقیقی، پارسا، سلیمان‌پور، سیدمسعود، و مرادی، ابوالفتح. (۱۴۰۴). اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش و دما با استفاده از سناریوهای SSP (مطالعه موردی: استان فارس). مجله مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، ۵(۲)، ۲۱۸-۱۹۹. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14691.14>
- خوشنویسان، سینا، قره‌چلو، سعید، مرتضوی، رضا، و خاکزاد، فاطمه. (۱۴۰۳). استخراج پهنه‌های آبی از داده‌های سنجش از دور با مقایسه مدل‌های یادگیری عمیق. مجله اکوهیدرولوژی، ۱۱(۳)، ۳۳۶-۳۲۱. <https://doi.org/10.22059/ije.2024.378101.1829>
- درزی، س. (۱۴۰۴). ارزیابی و آینده‌نگری مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش ایران. دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.
- کریمی احمدآباد، مصطفی، و قاسمی، الهه. (۱۳۹۶). بررسی پدیده تغییر اقلیم با رویکرد تصمیم‌گیری چندمعیاره. مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۲۱(۶۱)، ۳۶۱-۳۴۱. https://geoplanning.abrizu.ac.ir/article_7030_en.html
- نیرومندفرد، فریبا، خاشعی سیوکی، عباس، هاشمی، سیدرضا، و قربانی، خلیل. (۱۴۰۱). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). مجله تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹)، ۲۰۲۶-۲۰۰۹. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284>

References

- Almasi, A., Fatemi, S. E., & Eghbalzadeh, A. (2024). The prediction of monthly rainfall in Kermanshah Synoptic Station under the social-economic scenarios of the sixth climate change report. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 40-64. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097> [In Persian]
- Ayers, J., & Dodman, D. (2010). Climate change adaptation and development I: the state of the debate. *Progress in Development studies*, 10(2), 161-168. <https://doi.org/10.1177/146499340901000205>
- Ayugi, B., Ngoma, H., Babaousmail, H., Karim, R., Iyakaremye, V., Sian, K. T. L. K., & Ongoma, V. (2021). Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 181, 104226. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104226>
- Bhanage, V., Lee, H. S., Cabrera, J. S., Kubota, T., Pradana, R. P., Fajary, F. R., & Nimiya, H. (2024). Identification of optimal CMIP6 GCMs for future typical meteorological year in major cities of Indonesia using multi-criteria decision analysis. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1341807. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1341807>
- Darzi, S. (2025). *Evaluation and foresight of CMIP6 models in simulating Iran's temperature and precipitation* Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. [In Persian]
- Dehban, H., Zareian, M. J., & Gohari, A. (2025). Evaluating regional climate change during 2021–2080 for Iran and neighboring countries (a comparative analysis of projections and reanalysis data). *Theoretical and Applied Climatology*, 156(2), 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05381-7>
- Delghandi, M., Joorabloo, S., & Emamgholizadeh, S. (2017). Climate change impacts on spatial-temporal variations of reference evapotranspiration in Iran. *Water Harvesting Research*, 2(1), 1-23. <https://doi.org/10.22077/jwhr.2017.592> [In Persian]
- Dietz, T., Shwom, R. L., & Whitley, C. T. (2020). Climate change and society. *Annual Review of Sociology*, 46(1), 135-158. <https://doi.org/10.1146/annurev-soc-121919-054614>
- Esfandeh, S., Danehkar, A., Salmanmahiny, A., Alipour, H., Kazemzadeh, M., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Climate change projection using statistical downscaling model over southern coastal Iran. *Heliyon*, 10(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29416>
- Ghazi, B., & Jeihouni, E. (2022). Projection of temperature and precipitation under climate change in Tabriz, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(7), 21. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09848-z>
- Goodarzi, M. R., Abedi, M. J., & Niazkar, M. (2024). Effects of climate change on streamflow in the Dez Basin of Iran using the IHACRES model based on the CMIP6 model. *Journal of Water and Climate Change*, 15(6), 2595-2611. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.571>
- Gupta, R., Prakash, P., & Chembolu, V. (2025). Multi criteria evaluation of downscaled CMIP6 models in predicting precipitation extremes. *Atmospheric Research*, 315, 107921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.107921>
- Haghighi, P., Soleimanpour, S. M., & Moradi, A. (2024). The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modelling*. <https://doi.org/10.22098/mmws.2024.14691.1425> [In Persian]
- Hajkowicz, S., & Collins, K. (2007). A review of multiple criteria analysis for water resource planning and management. *Water resources management*, 21, 1553-1556. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9112-5>
- Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change—A review. *Energy policy*, 52, 797-809. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.046>
- Houngué, N. R., Almoradie, A. D. S., & Evers, M. (2022). A multi criteria decision analysis approach for regional climate model selection and future climate assessment in the Mono River Basin, Benin and Togo. *Atmosphere*, 13(9), 1471. <https://doi.org/10.3390/atmos13091471>

- Imani, T., Dalghandi, M., Emamgholizadeh, S., & Ganji-noroozi, Z. (2022). Effects of climate change on floods volume and peak discharge (Case Study: Qaran Talar sub-catchment). *Journal of Ecohydrology*, 9(1), 259-272. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576> [In Persian]
- Imani, T., Delghandi, M., Emamgholizadeh, S., & Ganji-Noroozi, Z. (2023). Evaluating uncertainty in climate change impacts on peak discharge and flood volume in the Qaran Talar watershed, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 14(4), 1300-1313. <https://doi.org/10.22059/ije.2022.333410.1576>
- Karimi, M., & Ghasemi, E. (2017). Assessing Climate Change by Multi-Criteria Decision-Making Approach. *Journal of Geography and Planning*, 21(61), 341-361. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_7030_en.html [In Persian]
- Khoshnevisan, S., Gharechelou, S., Mortazavi, R., & Khakzad, F. (2024). Water Bodies Extraction from Remote Sensing Data by Comparison of Deep Learning Models. *Iranian journal of Ecohydrology*, 11(3), 321-336. <https://doi.org/10.22059/ije.2024.378101.1829> [In Persian]
- Klutse, N. A. B., Quagraine, K. A., Nkrumah, F., Quagraine, K. T., Berkoh-Oforiwaa, R., Dzrobi, J. F., & Sylla, M. B. (2021). The climatic analysis of summer monsoon extreme precipitation events over West Africa in CMIP6 simulations. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 25-41. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00203-y>
- Levinson, D. H., & Fettig, C. J. (2013). Climate change: Overview of data sources, observed and predicted temperature changes, and impacts on public and environmental health. *Global Climate Change and Public Health*, 31-49. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-8417-2_3
- Li, S.-Y., Miao, L.-J., Jiang, Z.-H., Wang, G.-J., Gnyawali, K. R., Zhang, J., Zhang, H., Fang, K., He, Y., & Li, C. (2020). Projected drought conditions in Northwest China with CMIP6 models under combined SSPs and RCPs for 2015–2099. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.09.003>
- Maryam, H. Impact of CMIP5 climate change model in Jamishan dam reservoir simulation under cropping pattern change scenario. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2021.6603.1000>
- Pooladgar, S., Azizi Mobaser, J., Ramazani Moghadam, J., & Asghari, A. (2022). Evaluating the Efficiency of AquaCrop Model for Corn Plant Underwater and Fertilizer Management (Case study: Shush city). *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 2(1), 67-84. <https://doi.org/10.22126/ATWE.2022.7483.1014> [In Persian]
- Monahan, W. B., & Theobald, D. M. (2018). Assessing the potential impacts of climate change on species distributions in the United States. *PLOS ONE*, 13(2), e0191468. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191468>
- Naderi, M. (2025). Projections of major climate change indicators over Iran from 2021 to 2080. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36186-w>
- Niroumandfard, F., Khashei, A., Hashemi, R., & Ghorbani, K. (2022). Investigation of Climate Change Projection on Temperature and Precipitation Parameters Using CMIP6 Models (Case Study: Birjand Station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2009-2026. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.343936.669284> [In Persian]
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., & Dasgupta, P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Ipcc. <https://epic.awi.de/id/eprint/37530/>
- Rahman, A., & Pekkat, S. (2024). Identifying and ranking of CMIP6-global climate models for projected changes in temperature over Indian subcontinent. *Scientific Reports*, 14(1), 3076. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52275-1>

- Rajbhandari, R., Shrestha, A. B., Nepal, S., & Wahid, S. (2016). Projection of future climate over the Koshi River basin based on CMIP5 GCMs. *Atmospheric and Climate Sciences*, 6(2), 190-204. <http://dx.doi.org/10.4236/acs.2016.62017>
- Raju, K. S., & Kumar, D. N. (2020). Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 577-599. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>
- Sheikh, R., & Senfi, S. (2024). A Novel Opportunity Losses-Based Polar Coordinate Distance (OPLO-POCOD) Approach to Multiple Criteria Decision-Making. *Journal of Mathematics*, 2024(1), 8845886. <https://doi.org/10.1155/2024/8845886>
- Tahroudi, M. N., Mirabbasi, R., & Nasrolahi, A. (2024). Investigating the possibilities of temperature concentration distribution in Zayanderood based on climate change. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 106, 101454. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2024.101454>
- Vahdatifar, M., Mousavi, S.-F., Farzin, S., & Hadiani, M. O. (2025). Comprehensive Study of Climate Change Impacts on Temperature and Precipitation in East and West of Mazandaran Province in North of Iran. *Water*, 17(8), 1181. <https://doi.org/10.3390/w17081181>
- Zeydalinejad, N., Pour-Beyranvand, A., Nassery, H. R., & Ghazi, B. (2024). Evaluating climate change impacts on snow cover and karst spring discharge in a data-scarce region: a case study of Iran. *Acta Geophysica*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01400-9>