



Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties

 
Golale Ghaffari^{a*}, Ali Salajegh^b

^a Assistant Professor of Soil Conservation and Watershed Management, Research and Education Center for Agriculture and Natural Resources of Kermanshah Province, Kermanshah, Iran

^b Professor of Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 03 January 2024

Received in revised form
20 June 2024

Accepted: 09 October 2024

Available online:
21 March 2025

KEYWORDS:

Climate Model
Ensembles,
Uncertainty
Quantification,
Rcp4.5 Scenario,
Downscaling
Uncertainty, Multi-
Model Ensembles
(MMES), Nash-
Sutcliffe
Efficiency (NSE)

ABSTRACT

As part of the discussion on climate change, one of the most significant sources of uncertainty is the use of different Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs), which produce varying outputs for climatic variables. The general consensus is that employing multiple AOGCM models or ensemble methods (Ensemble Projection, EP) for weather forecasting—to account for uncertainty—is a strategy to mitigate the uncertainties associated with AOGCMs. These uncertainties arise from structural differences between global climate models and variations in initial conditions.

For this study, synoptic station data from the Kermanshah Meteorological Organization (spanning January 1, 1993, to December 31, 2016) and downscaled data from 21 AOGCM models (obtained from NASA's NEX-GDDP dataset) were analyzed. The goal was to assess AOGCM model uncertainty for the past period (1976–2005) and the future period (2020–2049) under the RCP4.5 scenario, as well as to reduce uncertainty using ensemble methods.

The results of the model comparison revealed that the MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR models performed better in simulations. As expected, the models with the lowest errors received the highest weights, indicating that they were the most reliable for simulating precipitation, maximum temperature, and minimum temperature in the past period. These models can thus be considered the most suitable for future predictions, with the least uncertainty in temperature and precipitation simulations.

An examination of statistical coefficients from different ensemble methods showed that the Modified Ensemble Projection (MEP) method provided the best estimation, with a coefficient of determination (R^2) of 0.95 and an efficiency coefficient (ME) of 0.92, compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, this method was identified as the optimal ensemble approach for AOGCM models.

*.Corresponding author : Dr. Golale Ghaffari

E-mail address: g.ghaffari@areeo.ac.ir

How to cite this article: Ghaffari, G., & Salajegh, A. (2025). Forecasting Precipitation and Temperature in the Qareh-Sou Watershed: Emphasizing Model Uncertainties. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(1), pp1-18. <https://doi.org/10.22067/geoeoh.2024.86195.1450>



Extended Abstract

Introduction

Climate change, driven by global warming, poses an existential threat to both natural and human systems, necessitating accurate and reliable projections of future climate variations. While extensive research has examined the impacts of climate change on various subsystems and proposed adaptation and mitigation strategies, many studies have overlooked the inherent uncertainties in climate modeling. Limiting analyses to selected scenarios from Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) and neglecting uncertainty analysis reduces the credibility and certainty of the final results. Indeed, uncertainties arising from structural and parametric diversity in models, downscaling processes, and impact assessment models require rigorous investigation and quantification.

A comprehensive assessment of climate change impacts requires the identification and analysis of three primary categories of uncertainty:

1. Uncertainties associated with the structure and parameters of AOGCMs;
2. Uncertainties arising from statistical and dynamical downscaling methods at regional scales; and
3. Parametric and structural uncertainties in impact assessment models.

AOGCMs, due to their diversity in structure and parameters, produce varying outputs for climatic variables, representing a significant source of uncertainty in climate projections. Incorporating uncertainties into climate change impact assessments leads to various plausible future scenarios that can inform decision-making and adaptation planning. Given computational and data limitations, a comprehensive examination of all uncertainty sources in every study is infeasible. However, studies have shown that certain uncertainties, such as those related to downscaling methods, significantly impact the final results and must be considered in assessing climate change impacts on river flows. Employing multi-model ensemble approaches and ensemble prediction methods to quantify and reduce uncertainties arising from AOGCMs is an effective strategy adopted in this research.

Material and Method

The Qarasu watershed, located in western Iran within Kermanshah province, served as the focal point of this study. Observational data spanning 1976–2005 were obtained from the Kermanshah synoptic station, courtesy of the Iran Meteorological Organization. Complementing this, downscaled data from 21 Global Circulation Models (GCMs) were acquired from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections (NEX-GDDP) dataset. This dataset encompassed both the historical (1976–2005) and future (2020–2049) periods under the Representative Concentration Pathway 4.5 (RCP4.5) scenario, selected for its intermediate climate change trajectory.

Following meticulous data validation and preprocessing, the uncertainty inherent in the GCMs was rigorously assessed. To evaluate GCM performance, the coefficient of determination (R^2) and Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were computed, facilitating a comparative analysis between simulated temperature and precipitation under RCP4.5 and observed values from the Kermanshah synoptic station.

To address and mitigate uncertainties in climate projections, this research employed a suite of ensemble methods, including ensemble prediction (EP), multi-model ensembles (MEP), and weighted multi-model ensembles (MEPWi), rather than relying solely on individual model outputs. The fundamental premise underpinning these methods is that models demonstrating superior skill in replicating historical climate patterns are anticipated to maintain their relative accuracy in future projections, thereby identifying them as optimal candidates. Consequently, the weight assigned to each model within the ensemble is directly proportional to its historical

performance. Finally, the accuracy of the model simulations relative to observational data was evaluated using R^2 and NSE.

Results and Discussion

The findings indicated that MRI-CGCM3, MPI-ESM-LR, BNU-ESM, ACCESS1-0, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, and MPI-ESM-MR exhibited robust performance in simulating monthly precipitation patterns. Concurrently, ACCESS1-0, CNRM-CM5, MIROC-ESM, MIROC-ESM-CHEM, MPI-ESM-LR, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3, and BNU-ESM demonstrated heightened accuracy in replicating temperature regimes. Notably, MRI-CGCM3, MPI-ESM-MR, and MIROC-ESM-CHEM were assigned the highest weights and exhibited the lowest uncertainty in their simulations of monthly precipitation, maximum temperature, and minimum temperature, signifying their superior fidelity and minimal deviation.

Analysis of statistical metrics from the ensemble methods revealed that the multi-model ensemble prediction (MEP) approach, characterized by an R^2 of 0.95 and NSE of 0.92, provided the most congruent estimates compared to baseline data from the Kermanshah synoptic station. Consequently, the MEP method was adjudicated as the optimal ensemble prediction paradigm for GCMs in this study.

Scrutiny of mean monthly and annual fluctuations under the MEP framework projected that:

- Monthly and annual precipitation are anticipated to change by 1.9% and 22.7%, respectively, in the future period.
- Mean monthly and annual temperature increments are projected to be 1.89°C and 1.88°C, respectively.

Conclusions

This study examined and compared various climate modeling methodologies to mitigate uncertainty in climate projections. Our findings reveal that no single climate model accurately predicts all climatic parameters within a given region. Optimal projections for temperature and precipitation necessitate the utilization of multiple models, underscoring the importance of multi-model ensemble techniques. We evaluated three ensemble methods: Model Ensemble with Weighting (MEPWi), Model Ensemble Projection (MEP), and Ensemble Prediction (EP).

The results indicated that projected values from these methods were relatively consistent, with minimal discernible differences. However, the MEP method yielded the most precise estimates for temperature and precipitation, establishing it as the superior technique for reducing uncertainty in climate projections. This research emphasizes that leveraging diverse climate models significantly enhances projection accuracy and reduces uncertainties. Relying solely on a single GCM is insufficient for formulating robust strategies to mitigate climate change impacts. Our results align with prior research demonstrating the efficacy of multi-model ensembles in improving predictive accuracy.

In summary, this study demonstrates that applying climate model ensemble techniques, particularly the MEP method, substantially improves the reliability of climate projections. This enhanced precision is crucial for enabling policymakers and planners to make informed decisions aimed at mitigating climate change impacts. Future studies could explore the performance of these ensemble methods under different climate scenarios and in other regions.



پیش‌نمایی بارش و دمای حوزه آبخیز قره‌سو با تأکید بر عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی

گلاله غفاری*  علی سلاجقه 

استادیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، ایران
 استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در مباحث تغییر اقلیم به‌کارگیری مدل‌های مختلف گردش عمومی است که خروجی‌های متفاوتی را برای متغیرهای اقلیمی تولید می‌کند. در کل استفاده از چندین مدل گردش عمومی و یا روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) برای تأکید بر عدم قطعیت در پیش‌نمایی اقلیم، به‌علت تفاوت‌های ساختاری در مدل‌های جهانی اقلیم و همچنین عدم اطمینان در تغییرات شرایط اولیه مدل‌ها یکی از راهکارهای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی است. برای این منظور داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ از سازمان هواشناسی و داده‌های ریزگردانی شده حاصل از ۲۱ مدل گردش عمومی از سایت NASA (NEX-GDDP) برای دوره گذشته (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) تحت سناریو RCP4.5 دریافت و پس از اطمینان از صحت داده‌ها و پیش‌پردازش‌های لازم، عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بررسی و جهت کاهش عدم قطعیت آن‌ها از روش‌های مختلف اجرای ترکیبی استفاده شد. نتایج مقایسه مدل‌ها نشان داد که مدل‌های MRI-CGCM3، MPI-ESM-، MIROC-ESM، ACCESS1-0، BNU-ESM، LR، و MIROC-ESM-CHEM، در مقایسه با مدل‌های MPI-ESM- و MIROC-ESM-CHEM، عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی دما و بارش برخوردار بوده‌اند. همچنین چنانچه انتظار می‌رفت بیشترین وزن به مدل‌هایی که کمترین خطا را داشته‌اند تعلق گرفته است، به‌گونه‌ای که این مدل‌ها بیشترین وزن را در مدل‌سازی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل دوره گذشته داشته‌اند و می‌توانند به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌های پیش‌نمایی در آینده معرفی شوند که دارای کمترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما و بارش می‌باشند. بررسی نتایج ضرایب آماری روش‌های مختلف اجرای ترکیبی نشان داد که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۵ و ضریب کارایی (ME) ۰/۹۲ تخمین بهتری را در مقایسه با داده‌های دوره پایه در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ارائه داده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در نظر گرفته شد.	تاریخچه مقاله تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۳/۳۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۱۸ کلمات کلیدی: مجموعه‌های مدل‌های اقلیمی، کمی‌سازی عدم قطعیت، سناریوی RCP4.5 عدم قطعیت ریزمقیاس‌سازی، مجموعه‌های چندمدلی (MMES) کارایی نش-ساتکلیف (NSE)

مقدمه

با توجه به اینکه گرمایش زمین عامل تهدید کننده‌ای برای زندگی بشر در کره زمین است، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آینده امری ضروری به حساب می‌آید. اگرچه تاکنون تحقیقات مختلفی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر سامانه‌های مختلف انجام پذیرفته و رویکردهای مختلف و نحوه کاهش خسارت مورد بررسی قرار گرفته، ولی در بعضی از این تحقیقات عدم قطعیت‌های موجود نادیده گرفته شده و در بررسی‌ها به تحلیل حساسیت و یا آسیب‌پذیری سامانه‌ها نسبت به یک یا چند سناریو از مدل‌های^۱ AOGCM بسنده شده است. این در حالی است که نادیده گرفتن عدم قطعیت‌ها در مراحل مختلف ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم از طریق به کارگیری مدل‌های مختلف گردش عمومی، باعث می‌شود تا از میزان قطعیت خروجی نهایی سامانه کاسته شود زیرا همواره ممکن است در شبیه‌سازی‌ها همه عوامل رخ دادن یک متغیر در مدل وارد نشود، بنابراین تحلیل با خطا یا عدم قطعیت همراه است. شناخت مقدار خطا و یا عدم قطعیت هر مدل، در قضاوت و اطمینان به نتایج ضروری است (Wilby, Tomlinson & Dawson, 2003).

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم شامل شناسایی سه جنبه کلیدی از عدم قطعیت است: نخست، عدم قطعیت در زمینه مدل‌های گردش کلی. دوم: عدم قطعیت در اقلیم‌شناسی در مقیاس منطقه‌ای شامل عدم قطعیت در روش‌های ریز گردانی نمایی آماری یا دینامیکی و سوم، عدم قطعیت‌های پارامتری و ساختاری در مدل‌های مختلفی که برای ارزیابی اثرات استفاده می‌شود (Effron & Tibshirani, 1993). همان‌گونه که ذکر گردید از مهم‌ترین منابع عدم قطعیت در مباحث تغییر اقلیم به کارگیری مدل‌های مختلف گردش کلی است که خروجی‌های متفاوتی را برای متغیرهای اقلیمی تولید می‌کند (Lane, Kirshen & Vogel, 1999; Mitchell, 2003; Wilby & Harris, 2006).

با منظور نمودن عدم قطعیت‌ها، نتایج دامن‌های از حالات محتمل آینده را در بر می‌گیرد. این حالات محتمل گاهی بسیار متفاوت هستند. لذا لازم است در تصمیم‌گیری‌ها و اتخاذ تدابیر آمادگی با شرایط تغییر یافته آینده در نظر گرفته شوند (Pinto et al., 2023). به دلیل محدودیت‌ها از جمله محدودیت دسترسی به داده‌ها و هزینه‌های محاسباتی مدل‌ها، کارشناس و ... در نظر گرفتن همه عدم قطعیت‌ها در همه مطالعات ممکن نیست. نتایج مطالعاتی که عدم قطعیت‌ها را در ارزیابی آثار تغییر اقلیم بررسی کرده‌اند، نشان داده است که تعدادی از عدم قطعیت‌ها مانند عدم قطعیت روش‌های ریزگردانی یا پارامترهای مدل را می‌توان نادیده گرفت، اما بعضی از عدم قطعیت‌ها اثر مهمی بر نتایج دارند و لازم است که در ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر جریان رودخانه مورد توجه قرار گیرند. در کل استفاده از چندین مدل گردش عمومی و یا روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها^۲ (EP) برای تأکید بر عدم قطعیت در پیش‌نمایی آب و هوا، به علت تفاوت‌های ساختاری در مدل‌های جهانی آب و هوا و همچنین عدم اطمینان در تغییرات شرایط اولیه مدل‌ها یکی از راهکارهای کاهش

1 Atmosphere-Ocean General Circulation Model

2 Ensemble Performance

عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی می‌باشد که در این تحقیق مدنظر قرار گرفته است (Semenov & Stratonovitch, 2010).

پینتو و همکاران (Pinto et al., 2023) در مطالعه‌ای با کمک روش‌های ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در آنگولا نشان دادند که آنگولا با افزایش دما و تغییرات در الگوهای بارندگی به دلیل تغییرات آب و هوایی روبرو است. همراه با پیش‌بینی‌هایی که نشان دهنده شب‌های گرم‌تر، روزهای گرم‌تر و رویدادهای بارش سنگین‌تر در آینده است. گائو و همکاران (Gao, Sokolov & Schlosser, 2023) در مطالعه‌ای در چین با استفاده از روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی اقدام به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی نمودند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که استفاده از روش‌های اجرای ترکیبی در مقایسه با اجرای مدل‌ها به صورت انفرادی نتایج دقیق‌تری را برای پیش‌بینی‌ها ارائه می‌کند. سرکوئرا و تورگو (Cerqueira & Torgo, 2023) در مطالعه‌ای از مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی برای پیش‌بینی دما و بارش استفاده نمودند. این مطالعه شامل ۳۵۶۸ سری داده و ۳۰ مدل اقلیمی بود. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که در آینده با افزایش دما مواجه شده و استفاده از مدل‌های مختلف می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد.

در مطالعه چن و همکاران (Chen et al., 2023) رویکرد ترکیبی مدل‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی REA برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی آینده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج پژوهش یاد شده نشان داد مجموعه‌ای از چندین مدل با بهره‌گیری از قوت‌ها و کاهش ضعف‌های هر شبیه ساز آب و هوا، قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها را افزایش می‌دهد. نتایج نشان داد روش میانگین‌گیری چند مدل پیشنهادی در کاهش خطای میانگین مربعات (RMSE) به ترتیب ۵ و ۵۴ درصد در شرایط بارندگی مرطوب و خشک از روش‌های موجود بهتر عمل کرد.

ژو و همکاران (Xu et al., 2019) اقدام به بررسی عدم قطعیت ۱۸ مدل گردش عمومی و سناریوهای انتشار در پیش‌بینی بارش‌های حداکثر در کشور چین نمودند و بدین‌منظور از روش‌های اجرای ترکیبی جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها استفاده نمودند. تحقیقات آنها نشان داد که عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بسیار بزرگ‌تر از سناریوهای انتشار می‌باشد و در دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰ بارش‌ها دارای شدت بیش‌تر و مدت کمتر خواهند شد که این امر در RCP8.5 بسیار شدیدتر خواهد بود. در مطالعه‌ای دیگر چیلکوتی و همکاران (Chilkoti, Bolisetti & Balachandar, 2017) از روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها^۱ (MEP) برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی در ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر جریان رودخانه استفاده نمودند و به این نتیجه رسیدند که روش اجرای ترکیبی در مطالعات تغییر اقلیم باعث کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت پیش‌بینی‌ها می‌شود. همچنین در تحقیقات فو و همکاران (Fu et al., 2005) کاهش معنی‌دار خطای اریبی در شبیه‌سازی بارش و دما توسط اجرای ترکیبی ۸ مدل RCM به روش وزنی در مقایسه با اجرای منفرد هر مدل مشاهده شد.

سمنوف و استراتونویچ (Semenov & Stratonovitch, 2010) با اجرای ترکیبی ۱۵ مدل گردش عمومی به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم در انگلستان پرداخته و بر کاهش معنی‌دار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد تأکید نمودند. فولر و اکستروم (Fowler & Ekström, 2009) نیز توسط اجرای ترکیبی ۱۳ مدل RCM بر اساس روش وزنی به مطالعه اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی انگلستان در دوره ۲۰۷۰-۲۱۰۰ پرداخته و به کاهش قابل توجه خطای مدل‌ها و در نتیجه کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش اشاره نمودند. اشرف و همکاران (Ashraf, Alizadeh, Mousavi Baygi & Bannayan Awal, 2014) در تحقیقی اقدام به صحت‌سنجی داده‌های دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط اجرای منفرد و گروهی پنج مدل گردش عمومی برای منطقه شمال شرق ایران نمودند و برای این منظور از ۵ مدل BCM2, CGCM3, CNRMCM3, MIROC3.2 و MRICGCM2.3 و اجرای ترکیبی آن‌ها (EP) استفاده نمودند. نتایج نشان داد که بر اساس اجرای منفرد مدل‌ها، مدل‌های MIROC3.2، MRICGCM2.3 و CNRMCM3 به ترتیب در تربت حیدریه، سبزوار و مشهد دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای بارش ارائه کردند. به‌طور کلی بررسی آماره‌های محاسبه شده توسط اجرای گروهی ۵ مدل منتخب نشان از کاهش چشم‌گیر خطای شبیه‌سازی و در نتیجه افزایش دقت پیش‌بینی‌های صورت گرفته داشته است.

بررسی‌ها نشان داد که عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی اثر زیادی بر پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد، زیرا این مدل‌ها خروجی‌های گوناگونی را تولید می‌کنند. اگر چه تحقیقات قبلی در این زمینه انجام شده است، اما تحقیقات در مورد عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی و روش‌های کاهش آنها به میزان کافی انجام نشده است. بنابراین، این تحقیق می‌تواند به ما در درک بهتر از تغییرات اقلیمی و مدیریت منابع آب کمک کند (Khazaei & Khazaei, 2018; Mitchell, 2003; Wilby & Harris, 2006). در این مقاله، تلاش شده است تا اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش بررسی شود و علاوه بر آن، عدم قطعیت در مدل‌های گردش عمومی و روش‌های کاهش آنها مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این مطالعه داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در بازه زمانی ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ از سازمان هواشناسی و داده‌های ریز گردانی شده حاصل از ۲۱ مدل گردش عمومی از سایت NASA¹ (NEX-GDDP) برای دوره گذشته (۱۹۷۶-۲۰۰۵) و دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) تحت سناریو RCP4.5 (به دلیل در نظر گرفتن شرایط اقلیمی متوسط) دریافت و پس از اطمینان از صحت داده‌ها و پیش پردازش‌های لازم، عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی بررسی شد. با توجه به اهمیت مدل‌های اقلیمی به عنوان ابزار اصلی در تحقیقات تغییر اقلیم و نیز تعدد این مدل‌ها، انتخاب بهترین و مناسب‌ترین مدل از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. لذا لازم است تحقیقاتی در خصوص صحت‌سنجی این مدل‌ها انجام شده و مدل بهینه هر منطقه در جهت به حداقل رساندن

1 NASA Earth Exchange (NEX) Global Daily Downscaled Projections (GDDP)

عدم قطعیت‌های موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی انتخاب گردد (Andarzian et al., 2011). جهت صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی ابتدا مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME) برای مقایسه دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌ها بر اساس سناریوی انتشار RCP4.5 و مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه محاسبه شد. در **جدول ۱** مدل‌های گردش عمومی استفاده شده در این تحقیق ارائه شده است.

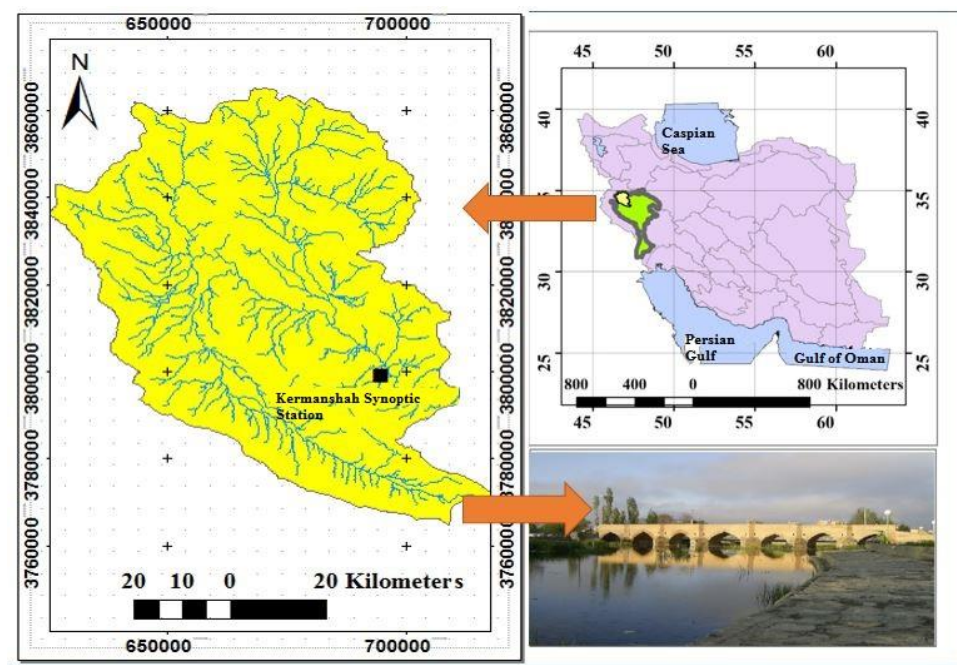
جدول ۱- مدل‌های گردش عمومی استفاده شده

Table-1 The general circulation models used

نام مدل Model	کشور Country
ACCESS1-0	CSIRO-BOM (Australia)
BCC-CSM1.1	BCC (China)
BNU-ESM	BNU (China)
CanESM2	CCCMA (Canada)
CCSM4	NCAR (USA)
CNRM-CM5	CNRM-CERFACS (France)
CESM1-BGC	NCAR (USA)
CSIRO-Mk3-6-0	CSIRO-QCCCE (Australia)
GFDL-CM3	GFDL (USA)
GFDL-ESM2G	GFDL (USA)
GFDL-ESM2M	GFDL (USA)
INM-CM4	INM (Russia)
IPSL-CM5-LR	IPSL (France)
IPSL-CM5-MR	IPSL (France)
MIROC5	AORI-NIES (Japan)
MIROC-ESM	AORI-NIES (Japan)
MIROC-ESM-CHEM	AORI-NIES (Japan)
MPI-ESM-LR	MPI-M (Germany)
MPI-ESM-MR	MPI-M (Germany)
MRI-CGCM3	MRI (Japan)
NorESM1-M	NCC (Norway)

حوزه آبخیز قره‌سو در نیمه غربی کشور و در استان کرمانشاه، در ارتفاعات زاگرس و در حد فاصل عرض‌های جغرافیایی $34^{\circ} 00'$ و $34^{\circ} 45'$ و طول‌های جغرافیایی $46^{\circ} 22'$ و $47^{\circ} 22'$ واقع شده و بیشینه ارتفاع آن ۳۳۵۶ متر و کمینه ارتفاع ۱۲۷۵ متر از سطح دریاست. مساحت حوزه ۵۳۰۱ کیلومتر مربع و شیب متوسط حوزه حدود ۱۶ درصد می‌باشد. متوسط بارش سالیانه در کل حوزه بین ۳۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر متغیر می‌باشد که ماه‌های دی و بهمن از بیشترین و ماه‌های خرداد، تیر و مرداد از کمترین بارش برخوردار هستند. با توجه به دوره پایه مدل‌های اقلیمی (۱۹۷۶-۲۰۰۵)، ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در این حوزه به‌علت دارا بودن بازه زمانی بلند مدت داده‌های هواشناسی، از حوزه‌های بسیار مناسب برای انجام مطالعات تغییر اقلیم

می‌باشد. **شکل ۱** موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی داخل و خارج حوضه را نشان می‌دهد (Heidari & Khazaei, 2018).



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری حوزه آبخیز قره‌سو

Fig.1. The location of synoptic and hydrometric stations in the Qarasu watershed of Iran

کاهش عدم قطعیت مدل‌ها با روش‌های مختلف اجرای ترکیبی

چشم‌پوشی از عدم قطعیت‌های مرتبط با تغییر اقلیم در تحقیقات، از اعتبار نتایج کاسته و منجر به اعمال نتایج غیر واقعی و غیر کاربردی به کاربران خواهد شد. اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها با روش وزن‌دهی^۱ (MEPWi) یا به عبارت دیگر استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها، جهت کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی‌های اقلیمی توصیه شده است (Whetton, Hennessy, Bates & Kent, 2010). اجرای ترکیبی چندین مدل از جمله روش‌های کاهش عدم قطعیت‌های پیش‌بینی است که به روش‌های مختلف از جمله روش وزنی قابل محاسبه است (Fu et al., 2005; Fowler & Ekström, 2009). بر طبق این روش مدل‌های منتخب بر اساس میزان انحراف پارامتر هواشناسی شبیه‌سازی شده در دوره پایه از میانگین داده‌های مشاهداتی این دوره، طبق [رابطه \(۱\)](#) وزن‌دهی می‌شوند (Fu et al., 2005; Wilby & Harris, 2006). در حقیقت بر اساس این روش، هر مدل که وزن بیشتری در مدل‌سازی گذشته منطقه داشته باشد، طبیعتاً انتظار می‌رود در مدل‌سازی آینده

1 Multi Ensemble Performance Wi

هم کم و بیش همان وزن را داشته باشد و بنابراین به‌عنوان مدل بهینه انتخاب خواهد شد (Fowler & Ekström, 2009; Wilby & Harris, 2006).

$$W_i = \frac{\left(\frac{1}{\Delta F_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\Delta F_i}\right)^2} \quad (۱)$$

در این رابطه W_i وزن هر مدل در ماه مورد نظر، ΔF_i انحراف میانگین بلند مدت متغیر شبیه‌سازی شده توسط هر یک از مدل‌ها در دوره پایه (دما و بارش) از میانگین داده‌های واقعی یا مشاهده شده و n تعداد مدل‌ها می‌باشد. سپس وزن محاسبه شده مدل‌ها (W_i) در مقادیر میانگین آن‌ها در ماه مورد نظر (M_i) ضرب شده و سپس مقادیر حاصل، مطابق رابطه (۲) با هم جمع می‌شوند (Fu et al., 2005).

$$E = \sum_{i=1}^n W_i M_i \quad (۲)$$

در نهایت جهت ارزیابی میزان دقت مدل در شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای از روش‌های ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) استفاده به عمل آمد.

نتایج و بحث

جهت بررسی میزان دقت و صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی ابتدا مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME) جهت مقایسه دما و بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های گردش عمومی و مقادیر واقعی ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در طول دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- نتایج صحت‌سنجی مدل‌های گردش عمومی و مقدار ضریب تعیین (R^2) و میزان ضریب کارایی (ME)

Table-2 Validation results of General Circulation Models and the coefficient of determination (R^2) and model efficiency (ME)

determination (R ²) and model efficiency (ME)						مدل‌های گردش عمومی General Circulation Models(GCMs)
دمای حداقل MINIMUM TEMPERATURE		دمای حداکثر MAXIMUM TEMPERATURE		بارش PRECIPITATION		
ضریب کارایی (ME)	ضریب تعیین (R ²)	ضریب کارایی (ME)	ضریب تعیین (R ²)	ضریب کارایی (ME)	ضریب تعیین (R ²)	
Model Efficiency	Coefficient of Determination	Model Efficiency	Coefficient of Determination	Model Efficiency	Coefficient of Determination	
1	0.94	1	0.94	0.88	0.93	ACCESS1-0
0.61	0.54	0.67	0.54	0.72	0.75	BCC-CSM-1-1
0.94	0.69	0.96	0.69	0.90	0.83	BNU-ESM

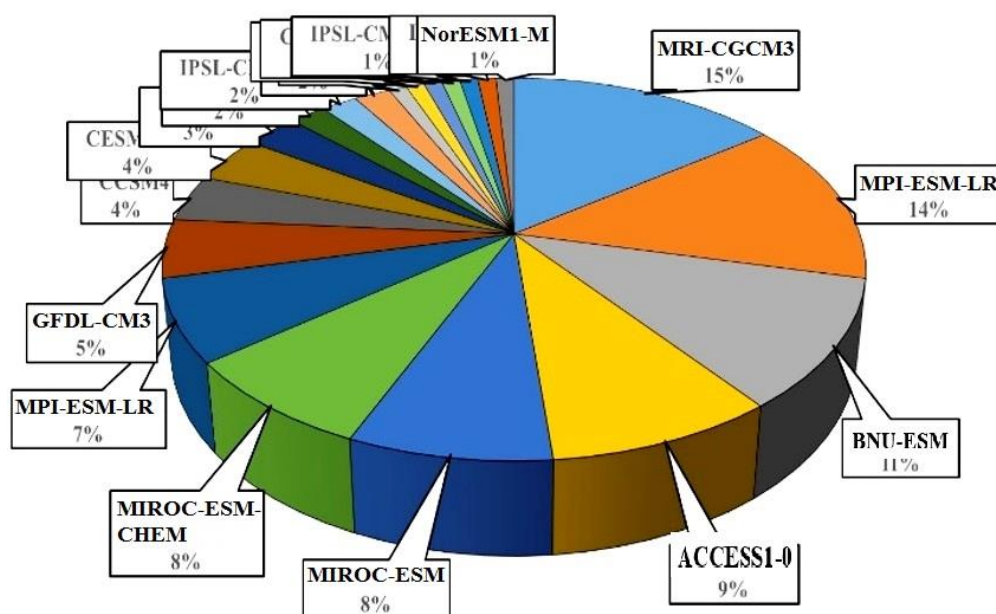
0.61	0.89	0.67	0.89	0.77	0.91	CanESM2
0.61	0.94	0.67	0.94	0.73	0.71	CCSM4
0.60	0.60	0.67	0.60	0.61	0.65	CESM1-BGC
1	0.65	1	0.65	0.64	0.68	CNRM-CM5
0.60	0.68	0.67	0.68	0.63	0.61	CSIRO-Mk3-6-0
0.63	0.67	0.69	0.67	0.70	0.72	GFDL-CM3
0.64	0.59	0.71	0.59	0.73	0.73	GFDL-ESM2G
0.64	0.60	0.71	0.60	0.60	0.61	GFDL-ESM2M
0.60	0.60	0.66	0.60	0.71	0.71	INM-CM4
0.61	0.60	0.67	0.60	0.68	0.65	IPSL-CM5A-LR
0.61	0.95	0.67	0.95	0.72	0.70	IPSL-CM5A-MR
0.60	0.95	0.67	0.95	0.77	0.76	MIROC5
1	0.95	1	0.95	0.84	0.91	MIROC-ESM
1	0.95	1	0.95	0.84	0.84	MIROC-ESM-CHEM
1	0.94	1	0.94	0.91	0.87	MPI-ESM-LR
1	0.94	1	0.94	0.82	0.82	MPI-ESM-MR
1	0.58	1	0.58	0.93	0.73	MRI-CGCM3
0.61	0.60	0.66	0.60	0.71	0.71	NorESM1-M

جدول ۲ عملکرد مدل‌های گردش عمومی را در شبیه‌سازی مقادیر دما و بارش ماهانه برای منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد. در خصوص بارش مدل‌های BNU-ESM، MPI-ESM-LR، MRI-CGCM3، ACCESS1-0، MIROC-ESM، MIROC-ESM-CHEM و MPI-ESM-MR از عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی بارش ماهانه برخوردار بوده‌اند و مدل‌های IPSL-CM5A-LR، CNRM-CM5، GFDL-ESM2M، CESM1-BGC، Mk3-6-0 از کم‌ترین میزان همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده میانگین بارش ماهانه برخوردار می‌باشند. در خصوص دما نیز مدل‌های ACCESS1-0، CNRM-CM5، MIROC-ESM، MIROC-ESM-CHEM، MPI-ESM-LR، MPI-ESM-MR و MRI-CGCM3 از عملکرد مناسب‌تری در شبیه‌سازی برخوردار بوده‌اند و مدل‌های IPSL-CM5A-LR، IPSL-CM5A-MR، MIROC5، INM-CM4 و NorESM1-M دارای کمترین همبستگی با داده‌های مشاهداتی هستند. مدل‌های پیش‌بینی دما و بارش معمولاً پیچیده هستند و از ترکیب عوامل مختلفی مانند فیزیک جو، اقلیم، اقیانوس‌ها، و تراز توزیع بارش استفاده می‌کنند. ممکن است مدل‌هایی که بیشترین پیچیدگی را دارند، عملکرد بهتری داشته باشند.

بررسی عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی

نتایج وزن‌دهی هر مدل در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) در **شکل ۲** ارائه شده است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵)، بیشترین وزن به مدل‌هایی که کمترین خطا را داشته‌اند تعلق گرفته است. به عبارت دیگر، مدل‌هایی که نتایج دقیق‌تری در شبیه‌سازی بارش و دما ارائه داده‌اند، وزن بیشتری در تحلیل‌ها و پیش‌بینی‌ها دارند. این انتخاب بر اساس انتظار است که مدل‌های با عملکرد بهتر و دقیق‌تر در شبیه‌سازی مقادیر بارش و دما در دوره گذشته، در پیش‌بینی‌های آینده نیز دقیق‌تر باشند و کمترین عدم قطعیت را داشته باشند.

مدل‌های MIROC-ESM، ACCESS1-0، BNU-ESM، MPI-ESM-LR، MRI-CGCM3، MPI-ESM-MR و MIROC-ESM-CHEM بیشترین وزن را در مدل‌سازی بارش، دمای حداکثر و دمای حداقل دوره گذشته داشته‌اند. این مدل‌ها به عنوان مدل‌های پیش‌بینی در آینده معرفی می‌شوند که دارای کمترین عدم قطعیت در شبیه‌سازی دما و بارش هستند. همچنین، مدل MRI-CGCM3 در شبیه‌سازی بارش، مدل MPI-ESM-MR در شبیه‌سازی دمای حداکثر و مدل MIROC-ESM-CHEM در شبیه‌سازی دمای حداقل، بیشترین وزن و کمترین میزان عدم قطعیت را دارند، که نشان از دقت بالا و کمترین میزان خطا در شبیه‌سازی این متغیرها توسط این مدل‌ها دارد. این نتایج می‌تواند به اطمینان در استفاده از این مدل‌ها در پیش‌بینی‌های آینده اقلیمی منجر شوند.

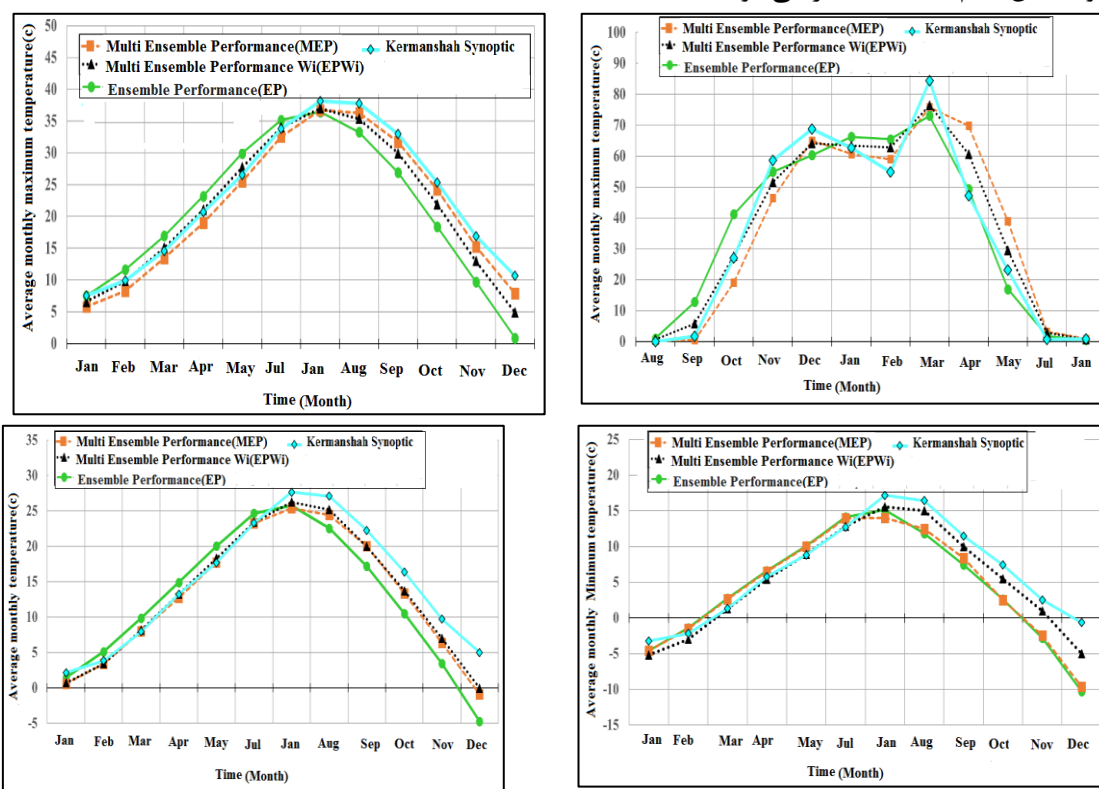


شکل ۲- نتایج وزن‌دهی هر مدل در مدل‌سازی بارش و دما در دوره پایه ۱۹۷۶-۲۰۰۵

Fig.2. Results of weighting each model in modeling precipitation and temperature in the baseline period (1976-2005)

کاهش عدم قطعیت مدل‌ها با روش‌های اجرای ترکیبی

در این مطالعه، برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی از سه روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی با وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) استفاده شده است. نتایج این روش‌ها در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵) در **شکل ۳** ارائه شده است و مقادیر ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) آنها در **جدول ۲** قابل مشاهده است. بررسی نمودارهای این روش‌ها در دوره پایه نشان داد که روش ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نسبت به داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه، نزدیک‌ترین شبیه‌سازی را ارائه داده است. به همین دلیل، این روش به‌عنوان مناسب‌ترین روش برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی انتخاب شده است. وجود تنوع در مدل‌های مختلف که در روش MEP استفاده می‌شوند، می‌تواند بهبود شبیه‌سازی و پیش‌بینی را ایجاد کند. این تنوع می‌تواند شامل استفاده از مدل‌های مختلف با روش‌های مختلف مدل‌سازی یا پارامترهای مختلف مدل‌سازی باشد که در ترکیب با یکدیگر به دقت بالا و کاهش عدم قطعیت منجر می‌شود.



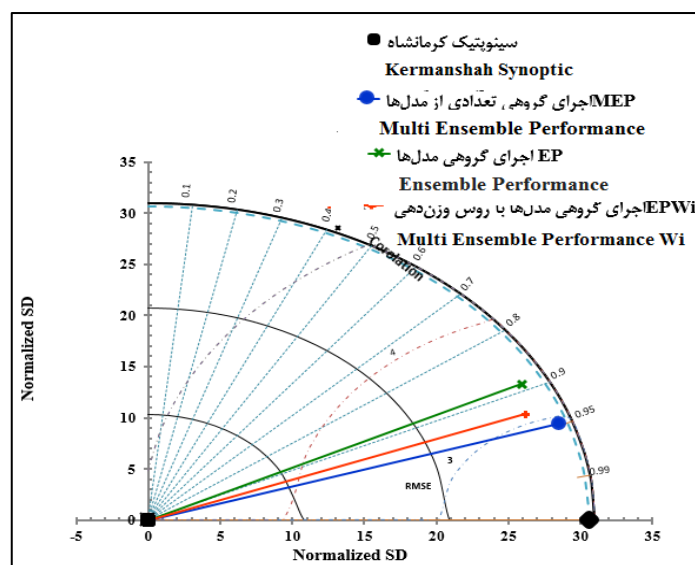
شکل ۳- نتایج روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi)، اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در برآورد بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و دمای متوسط ماهانه در دوره پایه (۱۹۷۶-۲۰۰۵)

Fig.3. Results of different ensemble methods: the Equal-Weight Ensemble (EP), the Weighted Ensemble (MEPWi), and the Partial Model Ensemble (MEP) for estimating precipitation, maximum temperature, minimum temperature, and average monthly temperature in the baseline period (1976-2005)

جدول ۳- نتایج ضریب تعیین (R^2) و ضریب کارایی (ME) با روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها
 Table-3 Results for the coefficient of determination (R^2) and model efficiency (ME) using various ensemble methods

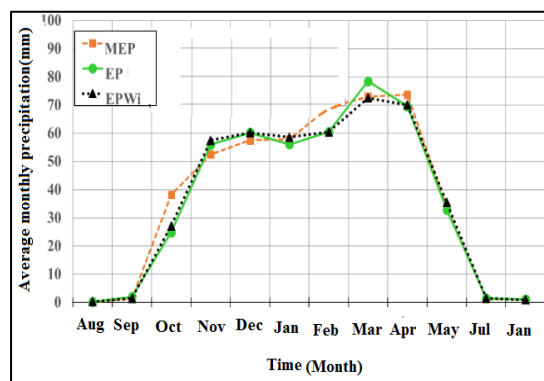
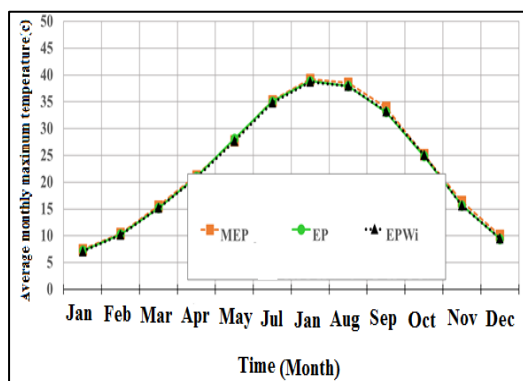
ضریب کارایی (ME) MODEL EFFICIENCY			ضریب تعیین (R^2) COEFFICIENT OF DETERMINATION			روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها ENSEMBLE METHOD OF MODELS
دمای حداقل Min. Temp.	دمای حداکثر Max. Temp.	بارش precipitation	دمای حداقل Min. Temp.	دمای حداکثر Max. Temp.	بارش precipitation	
0.84	0.84	0.88	0.84	0.84	0.89	اجرای ترکیبی مدل‌ها EP ENSEMBLE PERFORMANCE
0.94	0.94	0.90	0.96	0.96	0.93	وزندهی EPWi MULTI ENSEMBLE PERFORMANCE WI
0.98	0.98	0.92	0.99	0.99	0.95	اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها MEP MULTI ENSEMBLE PERFORMANCE

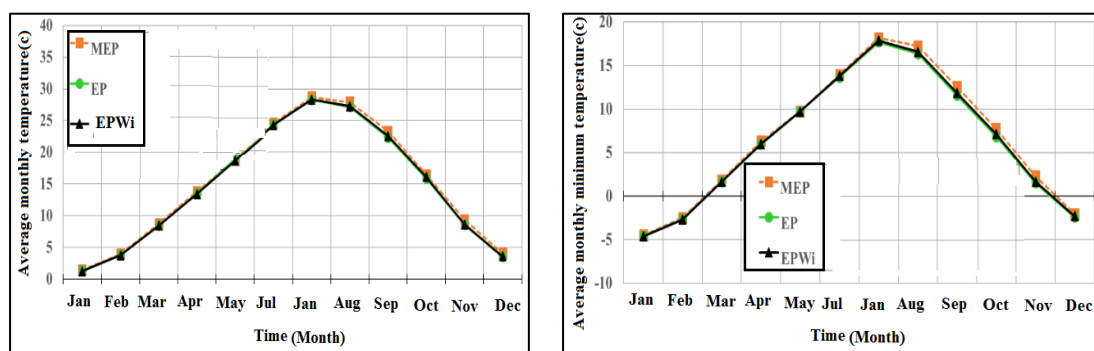
بررسی نتایج ضرایب آماری روش‌های مختلف اجرای ترکیبی نشان داد که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) با ضریب تعیین (R^2) ۰/۹۵ و ضریب کارایی (ME) ۰/۹۲ تخمین بهتری را در مقایسه با داده‌های دوره پایه در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه ارائه داده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش اجرای ترکیبی مدل‌های گردش عمومی در نظر گرفته شد. در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) از چندین مدل گردش عمومی مختلف استفاده می‌شود که این تنوع می‌تواند منجر به بهبود شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر در مقایسه با تک‌مدل‌ها شود. مدل‌های مختلف می‌توانند نقاط قوت و ضعف متفاوتی داشته باشند که با ترکیب آن‌ها، عملکرد بهتری به‌دست می‌آید. همچنین در **شکل ۴** نمودار تیلور جهت انتخاب بهترین روش اجرای ترکیبی ارائه شده است. نمودار تیلور ابزاری مفید برای ارزیابی و مقایسه مدل‌های مختلف است. این نمودار با در نظر گرفتن همبستگی و انحراف معیار، اقدام به رتبه‌بندی مدل‌ها در یک فضای پیوسته آماری می‌کند. در این دیاگرام، محور X بیانگر مقادیر مشاهده شده و محور Y بیانگر مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل است. نقاطی که در نزدیک محور X و Y قرار دارند، نشان دهنده تطابق بالا بین پیش‌بینی و واقعیت است. با افزایش نقاط در نزدیکی خط تطابق (که معمولاً یک خط میانگین است)، دقت مدل و تطابق آن با داده‌های مشاهده شده افزایش می‌یابد. این نمودار مقایسه دیداری عملکرد مدل‌ها را فراهم می‌کند و می‌تواند در انتخاب بهترین مدل به ما کمک کند (Jahangir & Azimi, 2022).



شکل ۴- نمودار تیلور در روش‌های مختلف اجرای ترکیبی در دوره پایه در مقایسه با ایستگاه سینوپتیک
Fig.4. Taylor diagram comparing different ensemble methods in the baseline period with synoptic station data

در شکل ۵ نمودارهای روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) ارائه شده است.



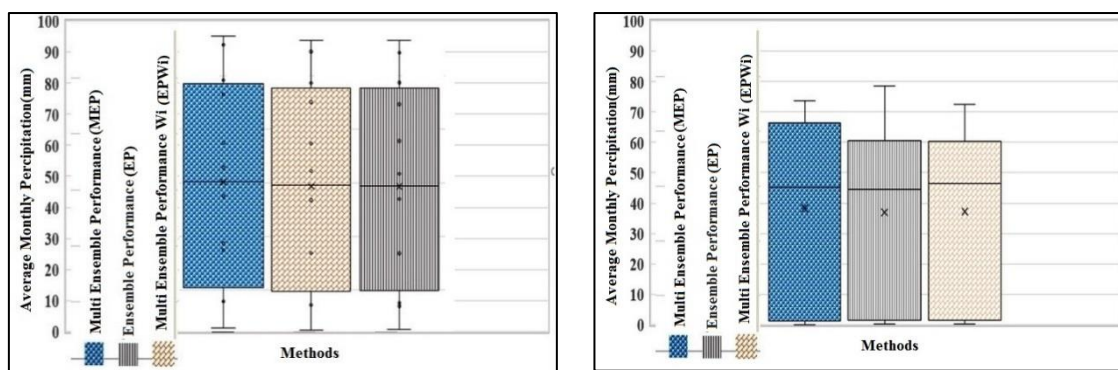


شکل ۵- نتایج روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در برآورد بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل و دمای متوسط ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹)

Fig.5. Results of ensemble methods (EP), weighted ensemble (MEPWi), and partial model ensemble (MEP) for estimating precipitation, maximum temperature, minimum temperature, and average monthly temperature in the future period (2020-2049)

بررسی نمودارهای ترسیم شده روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها در برآورد متوسط بارش ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نشان داد که نتایج هر سه روش تقریباً مشابه هم بوده و هر سه روش بارش ماه‌های اردیبهشت تا شهریور را تقریباً یکسان پیش‌بینی نموده‌اند ولی در سایر ماه‌ها دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) به همدیگر نزدیک‌تر بوده ولی روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) بارش ماه اسفند را معادل ۷۹ میلی‌متر تخمین زده است که ۶ میلی‌متر بیش‌تر از دو روش دیگر است. روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان بارش را در ماه‌های مهر، بهمن، فروردین بیش‌تر و در ماه‌های آبان، آذر کمتر از دو روش دیگر برآورد نموده است.

بررسی نمودارهای ترسیم شده روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها در برآورد پارامترهای دمای ماهانه در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نیز نشان داد که نتایج هر سه روش مشابه هم بوده اما دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) برآوردهای نزدیک به هم انجام داده‌اند ولی روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان دما را در ماه‌های مرداد تا آذر را حدود ۱ درجه بیش‌تر برآورد نموده است. در شکل ۶ نمودار جعبه‌ای دما و بارش برآورد شده توسط هر کدام از روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP)، اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEP) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEPWi) در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) ارائه شده است.



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای متوسط بارش و دمای متوسط ماهانه در روش‌های مختلف اجرای ترکیبی
Fig.6. Box plot of average monthly precipitation and temperature using different ensemble methods

بررسی نمودار جعبه‌ای فوق نشان داد که روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها درباره متغیر دما نتایج مشابهی دارد. البته متغیر دما متغیر پیوسته و منظمی است و پیش‌نمایی آن آسان‌تر است، برخلاف دما نتایج در خصوص بارش کمی متفاوت‌تر است. در رابطه با پارامتر بارش دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها (EP) و اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) تقریباً نتایج یکسانی را ایجاد نموده‌اند به گونه‌ای که در هر دو روش میزان متوسط بارش ماهانه ۳۷ میلی‌متر، کمترین میزان بارش صفر، چارک اول بارش ۲ میلی‌متر، چارک سوم ۴۴ و ۴۶ و حداکثر میزان بارش ۷۳ و ۷۹ میلی‌متر در ماه اسفند برآورد شده است. اما در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) میزان متوسط بارش ماهانه ۳۸ میلی‌متر، کمترین میزان بارش صفر، چارک اول بارش ۱ میلی‌متر، چارک سوم ۴۵ میلی‌متر و حداکثر میزان بارش ۷۴ میلی‌متر در ماه اسفند برآورد شده است. بررسی نمودار جعبه‌ای دمای متوسط ماهانه نیز نشان داد که روش‌های مختلف اجرای ترکیبی مدل‌ها نتایج نزدیکی باهم دارند. به گونه‌ای که هر سه روش متوسط دمای ماهانه را ۱۵ درجه سانتی‌گراد و متوسط حداکثر دمای ماهانه را ۲۸ و ۲۹ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهند. در **جدول ۴** میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) در طی دو دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) و گذشته (۱۹۷۶-۲۰۰۵) ارائه شده است.

جدول ۴- میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP)

Table-4 Average monthly and annual changes in temperature and precipitation parameters in the partial model ensemble (MEP)

دماي متوسط Average (c) Temp.	دماي حداقل Min.Temp. (c)	دماي حداکثر Max.Temp. (c)	بارش Precipitation (mm)	زمان Time	دوره Period
13.19	4.91	21.47	36.4	دوره گذشته Past Period	بارش و دمای ماهانه MONTHLY PRECIPITATION AND TEMPERATURE
15.07	6.72	23.43	38.3	دوره آینده Future Period	
+1.89	+1.81	+1.96	+1.9	میزان تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره گذشته (درصد) The Amount of Changes in the Future Period Compared to the Past Period	
13.24	4.95	21.53	436.7	دوره گذشته Past Period	بارش و دمای سالانه ANNUAL PRECIPITATION AND TEMPERATURE
15.12	6.76	23.48	459.5	دوره آینده Future Period	
+1.88	+2.17	+1.95	+22.7	میزان تغییرات در دوره آینده نسبت به دوره گذشته (درصد) The Amount of Changes in the Future Period Compared to the Past Period	

بررسی میزان متوسط تغییرات ماهانه و سالانه پارامترهای دما و بارش در روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نشان داد که بارش ماهانه و سالانه به‌ترتیب در دوره آینده ۱/۹ و ۲۲/۷ درصد و دمای متوسط ماهانه و سالانه به‌ترتیب ۱/۸۹ و ۱/۸۸ درصد تغییر خواهد کرد.

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج حاصل از شاخص‌های آماری محاسبه شده در ابتدا هفت مدل به‌عنوان توانمندترین مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش به‌طور جداگانه برای منطقه مشخص شد. نتایج این تحقیق نشان داد

که در یک منطقه لزوماً یک مدل یکسان، دقیق‌ترین پیش‌بینی را برای همه پارامترهای اقلیمی ارائه نمی‌دهد و ممکن است بهترین پیش‌بینی برای پارامترهای دما و بارش آن منطقه توسط چند مدل مختلف ایجاد شود. نتایج حاصل از اجرای ترکیبی مدل‌ها نشان داد که مقادیر برآورد شده توسط هر کدام از سه روش اجرای ترکیبی تقریباً نزدیک به هم بوده و تفاوت بسیاری بین آن‌ها دیده نمی‌شود هر چند نتایج دو روش اجرای ترکیبی مدل‌ها با روش وزن‌دهی (MEPWi) و اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) بسیار به هم نزدیک‌تر بودند ولی می‌توان از هر سه روش جهت کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی استفاده نمود اما روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) تخمین بسیار دقیق‌تری از دما و بارش ارائه نموده است و در نهایت این روش به‌عنوان بهترین روش کاهش عدم قطعیت مدل‌ها برگزیده و جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های دما و بارش در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) استفاده شد. این نتایج نشان داد که استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و یا به عبارت دیگر کاهش عدم قطعیت‌های مربوطه در مقایسه با استفاده از تنها یک مدل، شود.

نتایج این تحقیق با نتایج تحقیقات پینتو و همکاران (Pinto et al., 2023) مبنی بر کاهش معنی‌دار عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها در مقایسه با استفاده از یک مدل منفرد، سرکوئرا و تورگو (Cerqueira & Torgo, 2023) در خصوص افزایش دقت پیش‌بینی‌ها با استفاده از مدل‌های مختلف، چن و همکاران (Chen et al., 2023) در خصوص بالا بردن دقت نتایج با رویکرد ترکیبی مدل‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی، ژو و همکاران (Xu et al., 2019) جهت استفاده از روش‌های اجرای ترکیبی جهت کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها، تحقیقات فو و همکاران (Fu et al., 2005) در رابطه با کاهش معنی‌دار خطای اریبی در شبیه‌سازی بارش و دما توسط اجرای ترکیبی به‌روشنی در مقایسه با اجرای منفرد هر مدل فولر و اکستروم (Fowler & Ekström, 2009) مبنی بر کاهش قابل توجه خطای مدل‌ها و در نتیجه کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش مطابقت دارد. همچنین مطابق با نتایج تحقیقات چیلکوتی و همکاران (Chilkoti et al., 2017) در خصوص کاهش عدم قطعیت مدل‌های گردش عمومی با روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نسبت به سایر روش‌های اجرای ترکیبی مدل‌ها می‌باشد و تأکید می‌نماید که روش اجرای ترکیبی تعدادی از مدل‌ها (MEP) نتایج بهتری را پیش‌بینی نموده و به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. به‌گونه‌ای که صرف استفاده از خروجی یک مدل گردش عمومی جو نمی‌تواند نتایج منطقی برای برنامه‌ریزی‌های مربوط به کاهش اثرات مخرب پدیده تغییر اقلیم در پی داشته باشد و استفاده از مجموعه‌ای از مدل‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش قابل توجه دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و یا به عبارت دیگر کاهش عدم قطعیت‌های مربوطه در مقایسه با استفاده از تنها یک مدل شود.

References

- Andarzian, B., Bannayan, M., Steduto, P., Mazraeh, H., Barati, M. E., Barati, M. A., & Rahnama, A. (2011). Validation and testing of the AquaCrop model under full and deficit irrigated wheat production in Iran. *Agricultural Water Management*, 100(1), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.08.023>
- Ashraf, B., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., & Bannayan Awal, M. (2014). Verification of Temperature and Precipitation Simulated Data by Individual and Ensemble Performance of Five AOGCM Models for North East of Iran. *Water and Soil*, 28(2), 253-266. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.38011>
- Cerqueira, V., & Torgo, L. (2023). Multi-output Ensembles for Multi-step Forecasting. *ArXiv Preprint ArXiv:2306.14563*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.14563>
- Chen, H., Zhang, R., Liu, F., Shao, C., Liu, F., Li, W., ... & Lou, B. (2023). The chromosome-level genome of *Cherax quadricarinatus*. *Scientific Data*, 10(1), 215. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02124-z>
- Chilkoti, V., Bolisetti, T., & Balachandar, R. (2017). Climate change impact assessment on hydropower generation using multi-model climate ensemble. *Renewable Energy*, 109, 510-517. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.041>
- Effron, B., & Tibshirani, R.J. (1993). *An introduction to the bootstrap*. New York: Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- Fowler, H. J., & Ekström, M. (2009). Multi-model ensemble estimates of climate change impacts on UK seasonal precipitation extremes. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 29(3), 385-416. <https://doi.org/10.1002/joc.1827>
- Fu, C., Wang, S., Xiong, Z., Gutowski, W. J., Lee, D. K., McGregor, J. L., ... & Suh, M. S. (2005). Regional climate model intercomparison project for Asia. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 257-266. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-257>
- Gao, X., Sokolov, A., & Schlosser, C.A. (2023). A large ensemble global dataset for climate impact assessments. *Scientific Data*, 10, 801. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02708-9>
- Heidari, M. & Khazaei, M. R. (2018). Climate change impact assessment on extreme daily rainfalls in Kermanshah. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, (7)2,27-39. [In Persian] https://journals.srbiau.ac.ir/article_11544.html?lang=en
- Jahangir, M. H., & Azimi, S. M. E. (2022). Evaluating the performance of artificial intelligence models for temperature downscaling (Study area: Ardabil province). *Environmental Sciences*, 20(4), 243-258. [In Persian] <https://doi.org/10.48308/envs.2022.35101>

- Khazaei, M.R. & Khazaei, H. (2018). Scenarios in climate change impact assessment on monthly stream-flow of Karun basin. *Journal of Environmental Sciences and Technology*, 20(1), 29-40. [In Persian]
- Lane, M. E., Kirshen, P. H., & Vogel, R. M. (1999). Indicators of impacts of global climate change on US water resources. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 194-204. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1999\)125:4\(194\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1999)125:4(194))
- Mitchell, T.D. (2003). Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. *Climatic Change*, 60(3), 217-242. <https://doi.org/10.1023/A:1026035305597>
- Pinto, I., de Perez, E. C., Jaime, C., Wolski, P., van Aardenne, L., Jjemba, E., ... & Tall, A. (2023). Climate change projections from a multi-model ensemble of CORDEX and CMIPs over Angola. *Environmental Research: Climate*, 2(3), 035007. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ace210>
- Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41(1), 1-14. <https://doi.org/10.3354/cr00836>
- Whetton, P., Hennessy, K., Bates, B., & Kent, D. (2010). Regional Projections and Model Evaluation: Potential Benefits of 'Representative Future Regional Climates'. In Stocker, T., Dahe, Q., Plattner, G. K., Tignor, M., & Midgley, P., *IPCC expert meeting on assessing and combining multi model climate projections*. Paper presented at Proceedings of the National Center for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA (pp105-107). Switzerland: IPCC Working Group. <https://www.ipcc.ch/publication/ipcc-expert-meeting-on-assessing-and-combining-multi-model-climate-projections/>
- Wilby, R. L., & Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2), 1-10. <https://doi.org/10.1029/2005WR004065>
- Wilby, R. L., Tomlinson, O. J., & Dawson, C. W. (2003). Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Climate Research*, 23(3), 183-194. <http://www.jstor.org/stable/24868347>
- Xu, K., Xu, B., Ju, J., Wu, C., Dai, H., & Hu, B. X. (2019). Projection and uncertainty of precipitation extremes in the CMIP5 multimodel ensembles over nine major basins in China. *Atmospheric Research*, 226, 122-137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.04.018>