



پژوهش های خشکسالی و تغییر اقلیم



دوره سوم، ویژه نامه، زمستان ۱۴۰۴

- ۱ بررسی اثرات تغییرات اقلیمی و ریزگردها بر سلامت و پایداری بومسازگان جنگلی زاگرس
مجید پاتو، سهراب مرادی، جلال هناره
- ۱۷ ارزیابی شبیه سازی مدل های اقلیمی با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره و معیارهای عملکرد
نگین نبات قدس، پریساسادات آشفته
- ۳۷ استفاده از یادگیری ماشین برای بهبود تخمین بارش توسط داده های ERA5 در ایستگاه های
هواشناسی استان آذربایجان غربی
مسلم محمدی
- ۵۷ پاسخ ابرناکی ایران به نوسانات دور پیوندی: مطالعه ای بر ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک
علیرضا سعادت مقدسی، زهرا آقاشریعتمداری
- ۷۹ مدل سازی اثر افزایش دما بر اجزاء عملکرد ذرت
فاطمه صفری، هادی رضانی اعتدالی، عباس کاویانی، لیلا خسروی
- ۹۵ کاربرد شاخص یکپارچه خشکسالی در تحلیل چندمتغیره ریسک براساس واین کاپولا
فاطمه تیموری، ام البنین بذرافشان، حمید غلامی، مرضیه شکاری، حسین زمانی
- ۱۱۹ بررسی عوامل خاص اجتماعی معنوی خشکسالی از منظر قرآن و روایات
محمد اکبری
- ۱۲۱ مروری بر دیدگاه های مختلف درباره تغییر اقلیم: تحلیل و مقایسه
غزل دهقانی سانج، سیدناصر باشی ازغدی



نشریه علمی و پژوهشی پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم

سال سوم، ویژه‌نامه، زمستان ۱۴۰۴

شاپای الکترونیکی: ۹۸۱۹-۲۹۸۰

شاپای چاپی: ۶۰۷۶-۳۰۹۲

شماره ثبت و مجوز از وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی: ۹۲۰۴۱



سر دبیر: دکتر ابوالفضل اکبرپور

مدیر مسئول: دکتر مصطفی یعقوب‌زاده

ویراستار فارسی: دکتر سپیده زراعتی نیشابوری

صاحب امتیاز: دانشگاه بیرجند (با مشارکت گروه پژوهشی خشکسالی و تغییر اقلیم دانشگاه بیرجند و انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران)

ویراستار انگلیسی: دکتر علی محتشمی

مدیر داخلی: دکتر فرهاد آذر می آتاجان

کارشناس نشریه: مهندس سعیده حسین آبادی

دستیار سردبیر: دکتر فاطمه پور صالحی

صفحه‌آرا: دکتر سپیده زراعتی نیشابوری



❖ هیئت تحریریه:

- دکتر سانگام شرستا،** استاد، مهندسی و مدیریت آب، مؤسسه فناوری آسیا.
- دکتر کریم عباس پور،** شرکت مشاوره زیست‌محیطی W2e2، دوبندورف، سوئیس.
- دکتر کیومرث ابراهیمی،** استاد دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، ایران.
- دکتر سید سعید اسلامیان،** استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.
- دکتر ابوالفضل اکبرپور،** استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه بیرجند، ایران.
- دکتر مرتضی اسمعیل نژاد،** دانشیار گروه جغرافیا دانشگاه بیرجند، ایران.
- دکتر امید بزرگ حداد،** استاد، گروه مهندسی آب دانشگاه تهران، ایران.
- دکتر بهرام ثقفیان،** استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران.
- دکتر علی شاهنظری،** استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران.
- دکتر علی شهیدی،** استاد گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، ایران.
- دکتر محمدحسین صیادی،** استاد گروه محیط زیست دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.
- دکتر رضا کراچیان،** استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تهران، ایران.
- دکتر سعید مرید،** استاد گروه مهندسی آب دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.

دکتر علیرضا مساح بوانی، دانشیار گروه مهندسی منابع آب، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، ایران.

دکتر سید ابوالفضل مسعودیان استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان، ایران.

دکتر سید محمد جعفر ناظم السادات استاد گروه مهندسی آب. رئیس مرکز تحقیقات اقیانوسی و جوی، دانشگاه شیراز، ایران.

دکتر مصطفی یعقوبزاده، دانشیار گروه مهندسی آب دانشگاه بیرجند، ایران.

❖ اعضای مشورتی هیئت تحریریه:

دکتر مجتبی صادق، گروه مهندسی عمران، دانشگاه ایالتی بویز، عضو ارشد مؤسسه دانشگاه ملل متحد برای آب، محیط زیست

و بهداشت.



نشانی دفتر مجله: استان خراسان جنوبی، شهرستان بیرجند، کیلومتر ۵ جاده کرمان، پردیس

کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی دانشگاه بیرجند. دفتر نشریات دانشکده کشاورزی.

تلفن: ۰۵۶۳۱۰۲۷۶۰۹

پست الکترونیک: jdcr@birjand.ac.ir

نشانی وبگاه نشریه: jdcr.birjand.ac.ir



Investigating The Effects of Climate Change and Dust Storms on The Health and Sustainability of The Zagros Forest Ecosystem

Majid Pato^{1,*}, Sohrab Moradi², Jalal Henareh¹

1. Assistant Professor, Department of Forestry and Rangeland Research, Center for Research and Education of Agriculture and Natural Resources of West Azarbaijan Province, Organization of Research, Education and Extension of Agriculture, Urmia, Iran.
2. Assistant Professor, Department of Agricultural Development and Natural Resources, Faculty of Technology and Engineering, Payam Noor University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: m.pato@areeo.ac.ir

Keywords:

Dust storm, Drought, Biodiversity, Photosynthesis, Soil erosion.

Received:

06 March 2025

Revised:

25 March 2025

Accepted:

09 April 2025

Introduction

The Zagros forests, with an area of about 6 million hectares in the western and southwestern regions of Iran, are one of the most important natural filters or lungs of Iran against the phenomenon of dust storms. These forests, as the largest and most important forest ecosystem in Iran, have recently been affected by two major threats: climate change and dust storms. Research conducted so far has mainly focused on identifying the overall impacts of climate change on Zagros forest ecosystems, but there is no comprehensive analysis of how these threats persist and their chain consequences on ecosystem structure, vital services, and new vulnerabilities in this regard on the vegetation cover of this region. Thus, this study aims to examine the simultaneous impacts of climate change and dust storm phenomena on the stability and health of these forests.

Through this comparative evaluation, the study seeks to highlight the strengths and limitations of each algorithm and deliver actionable insights for water-resource managers tasked with mitigating long-term aquifer depletion

How to cite this article:

Pato, M., Moradi, S., & Henareh, J. (2025). Investigating the effects of climate change and dust storms on the health and sustainability of the Zagros forest ecosystem. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Special Issue), 1-16. [10.22077/jdcr.2025.9043.1126](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9043.1126).



Materials and Methods

A 15-year monthly dataset (2000–2014) was assembled using observations from six precipitation stations, three temperature stations, groundwater abstraction records from 591 operational wells and qanats, and water-table measurements from 33 piezometric wells across the plain. Spatial averages of climatic variables were computed using the Thiessen polygon method, ensuring representation of spatial heterogeneity. The input matrix combines climatic, hydrological, and anthropogenic variables known to influence groundwater fluctuations in the semiarid Shahrood aquifer. The five machine learning models were calibrated under a systematic grid-search procedure to determine optimal hyperparameters. Model performance was evaluated using MAE, RMSE, and r to capture both magnitude-based and pattern-based predictive capability. This design enables fair assessment of contrasting modeling philosophies: tree-based boosting (XGBoost, CatBoost), instance-based learning (KNN), margin-based regression (SVR), and recursive partitioning (DT) under identical data and validation conditions.

Results and Discussion

Groundwater levels showed a continuous declining trend over the study period, dropping from 1326.48 m in 2000 to 1315.68 m in 2014, an overall decline of 10.8 m, averaging 0.77 m per year. This pattern reflects the combined influence of insufficient recharge, reduced precipitation, rising temperatures, and intensifying extraction for agriculture, domestic use, and industry.

The model comparison demonstrated the clear superiority of gradient boosting methods. CatBoost achieved the lowest prediction error (MAE = 1.4029 m; RMSE = 1.9484 m), while XGBoost produced the strongest linear agreement with observed water-table fluctuations ($r = 0.8185$). Both algorithms outperformed classical models by a substantial margin, reducing RMSE by approximately 25–35% relative to DT, SVR, and KNN. The Decision Tree model exhibited limited accuracy (RMSE = 2.779 m; $r = 0.6701$), reflecting its inability to generalize under nonlinear, multivariate interactions. SVR provided slightly better pattern reproduction ($r = 0.6903$) but higher errors (RMSE = 2.6995), suggesting difficulty in capturing nonlinearities and noise-driven variability. KNN performed the weakest (RMSE = 2.8617 m; $r = 0.5799$), likely due to high sensitivity to noisy, heterogeneous hydro-climatic data. Overall, boosting algorithms' ensemble structure and capacity to model complex nonlinearities allowed them to reproduce both long-term declining trends and short-term fluctuations more accurately than traditional learners. The performance gap confirms that aquifer systems characterized by strong climatic–anthropogenic coupling benefit from high-capacity, ensemble-based predictors.

Conclusion

The extended comparative analysis demonstrates that machine learning, particularly gradient boosting algorithms, provides a reliable, scalable framework for modeling groundwater level changes in arid and semi-arid regions. XGBoost and CatBoost consistently outperformed classical models, achieving lower errors and higher correlation with observed groundwater levels. Their predictive strength arises from their ability to capture nonlinear interactions among climatic variables, extraction rates, and return flows interactions that simpler methods fail to fully represent.

The findings emphasize that boosting models can be integrated into groundwater monitoring systems to inform extraction control, evaluate climate-change impacts, and support sustainable aquifer management. These models offer practical value for policymakers by enabling early detection of critical declines and providing operational decision support for regulating pumping and designing recharge interventions. Limitations include the absence of land-use, soil, and hydraulic-property data, and the inability to incorporate deep multi-temporal dependencies that recurrent networks (e.g., LSTM) could capture. Future research should explore hybrid and deep-learning architectures, incorporate uncertainty quantification, and expand datasets using remote-sensing inputs. Nevertheless, the main implication is clear: ensemble-based machine learning is a powerful, cost-effective tool for predicting groundwater dynamics and guiding sustainable water-resource planning in data-limited, climatically stressed aquifers.



بررسی اثرات تغییرات اقلیمی و ریزگردها بر سلامت و پایداری بوم‌سازگان جنگلی زاگرس

مجید پاتو^{۱*}، سهراب مرادی^۲، جلال هناره^۱

۱- استادیار، بخش تحقیقات جنگل و مرتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران.
 ۲- استادیار گروه توسعه کشاورزی و منابع طبیعی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: m.pato@areeo.ac.ir

چکیده

جنگل‌های زاگرس، به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین بوم‌سازگان جنگلی ایران، در سال‌های اخیر تحت تأثیر دو پدیده خطرناک، یعنی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد، قرار گرفته‌اند. این پژوهش باهدف بررسی تأثیرات هم‌زمان این دو پدیده بر پایداری و سلامت این جنگل‌ها انجام‌شده است. برای این منظور منابع علمی معتبر از پایگاه‌هایی مانند Scopus، Web of Science و Google Scholar به‌صورت سامان‌مند بررسی و تحلیل شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که افزایش ۱/۵ درجه‌ای دمای هوا و کاهش ۲۰ درصدی بارش‌ها، خشکسالی‌ها را تشدید کرده و رطوبت خاک را تا ۲۵ درصد کاهش داده است. این تغییرات، سلامت گونه‌های اصلی جنگل‌های زاگرس، به‌ویژه بلوط‌ها و دیگر درختان و درختچه‌ها را به‌شدت تهدید می‌کند. از سوی دیگر، طوفان‌های ریزگرد با کاهش ۳۰ درصدی نور خورشید، فرایند فتوسنتز را مختل کرده و فرسایش خاک را تا ۱۸ درصد افزایش داده‌اند. این عوامل، در کنار هم تأثیرات مخربی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس داشته‌اند، به‌طوری که تنوع زیستی تا ۲۵ درصد و ظرفیت ذخیره‌سازی کربن تا ۱۸ درصد کاهش یافته است. همچنین، عملکردهای حیاتی بوم‌سازگان، مانند تنظیم چرخه آب و تثبیت خاک، به‌شدت تضعیف شده‌اند. ادامه این روند می‌تواند ساختار بوم‌سازگان جنگلی زاگرس را تغییر داده و آن را در برابر آفات و بیماری‌ها آسیب‌پذیرتر کند. برای مقابله با این چالش‌ها، راهکارهایی مانند مدیریت بهینه منابع آب، کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی و احیای پوشش گیاهی بومی پیشنهاد شده است. این پژوهش بر ضرورت اقدامات فوری و مؤثر برای حفاظت و احیای جنگل‌های زاگرس تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی:

طوفان ریزگرد، خشکسالی، تنوع زیستی، فتوسنتز، فرسایش خاک.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۱/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۱/۱۹

مقدمه

افزایش فرسایش خاک، کارکردهای بوم‌سازگان را تضعیف کرده‌اند (Azizi et al., 2015).

سراب و همکاران (Sarab et al., 2022) کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و اختلال در ریشه‌زایی درختان را به خشکسالی‌ها نسبت داده‌اند. خشکسالی یکی از مضرترین و از لحاظ اقتصادی، اجتماعی، کالبدی و محیط زیستی زیان‌بارترین بلای طبیعی به شمار می‌رود که در هر نوع آب‌وهوایی امکان وقوع آن وجود دارد و آثار زیان‌بار آن به مراتب گسترده‌تر و عمیق‌تر از دیگر بلای طبیعی است (Hajarian, 2025). فخار و نظری (۲۰۲۳) نیز در بررسی خود با عنوان پایش و ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از سنجش از دور دریافتند که خشکسالی در کشور در سال‌های اخیر در حال افزایش است و مناطقی در جنوب شرقی و مرکزی کشور بیشتر در معرض خطر قرار دارند و اقدامات فوری در زمینه مدیریت منابع آبی، کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز را ضروری دانستند (Fakhar & Nazari, 2024). عزیزی و همکاران (Azizi et al., 2015) منشأ بیشتر ریزگردهای غرب کشور را خارج از مرزهای ایران دانسته، و افزایش شوری خاک و افت کیفیت آن را به ذرات موجود در ریزگردها بیان نموده‌اند. باوقار (Bavaghar., 2012) نشان داد که افزایش تبخیر، تعادل آبی جنگل‌ها را بر هم زده است. نوروزی و میری (Noroozi & Miri., 2015) دمای سطح زمین را از مؤلفه‌های مهم اقلیم در هر منطقه و کنترل‌کننده فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و محیط‌زیستی بر روی زمین دانسته و اندکی تحت‌تأثیر عواملی همچون بازتاب سطحی و انواع مختلف کاربری، پوشش اراضی، وضعیت توپوگرافی، موقعیت جغرافیایی بیان نموده‌اند که همین عوامل در بروز و ایجاد طوفان‌های ریزگرد نقش به‌سزایی دارند. ادب و همکاران (Adab et al., 2014) افت ۲۰ درصدی زیست‌توده را به اختلال فتوسنتز ناشی از ریزگردها نسبت داده‌اند. کوه سلطانی و همکاران (Kooch et al., 2018) نیز کاهش خدمات بوم‌سازگانی مانند تولید اکسیژن را تأیید کرده‌اند. شاهسونی و همکاران (Shahsavani et al., 2012) کاهش ۲۵ درصدی تنوع زیستی را به اثر هم‌زمان این عوامل (تغییر اقلیم و ریزگردها) مرتبط دانسته‌اند که پیچیدگی این تعامل را

جنگل‌ها و فضای سبز به‌عنوان یک صافی^۱ در مقابل ریزگردها عمل می‌کنند و بخش زیادی از آن را از هوا جذب می‌کنند؛ بنابراین بوم‌سازگان‌های جنگلی به‌نوعی سبب تصفیه هوا می‌شوند. جنگل‌های زاگرس با مساحتی حدود ۶ میلیون هکتار در مناطق غرب و جنوب غرب ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین صافی‌های طبیعی یا همان ریه‌های ایران در مقابل این پدیده هستند. اما متأسفانه بخش‌های قابل‌توجهی از آن‌ها طی سال‌های گذشته تخریب شده‌اند. علی‌رغم هجوم ریزگردها به جنگل‌های زاگرس و نقش بسیار مهم این بوم‌سازگان‌های ارزشمند در تصفیه هوا و جذب ریزگرد تاکنون پژوهش‌های اندکی در زمینه ارزیابی مقدار جذب ریزگردها توسط گونه‌های مختلف جنگلی و اثرات مضر آنها در این مناطق انجام شده‌اند. با این حال بررسی ترکیبات شیمیایی و فیزیکی ریزگردها به‌منظور منشأیابی و تعیین عناصر مضر، مقدار جذب ریزگردها توسط گونه‌های مختلف جنگلی، نحوه و مقدار تأثیر آنها بر درختان و نیز اثر وجود جنگل بر ریزگردها بسیار ضروری است (Moradi et al., 2021). این جنگل‌ها که عمدتاً از بلوط ایرانی (*Quercus persica*) و گونه‌های مقاوم به خشکی تشکیل شده‌اند، در مناطق کوهستانی غرب کشور نقشی کلیدی در حفظ منابع آبی، تثبیت خاک و تعادل اقلیمی دارند. این زیست‌بوم‌ها سالانه حدود ۴۰ درصد از آب کشور را تأمین می‌کند و به‌عنوان سپری طبیعی در برابر فرسایش و بیابان‌زایی عمل می‌نمایند (Qorbani Salkhord et al., 2012). با این حال، در دهه‌های اخیر، این جنگل‌ها با تهدیدات جدی مواجه شده‌اند. تغییرات اقلیمی، با افزایش میانگین دمای سالانه به میزان ۱/۵ درجه سلسیوس و کاهش ۲۰ درصدی بارش‌ها طی ۳۰ سال گذشته، خشکسالی‌ها را تشدید کرده و رطوبت خاک را کاهش داده است (Soltani et al., 2020). در کنار آن، طوفان‌های ریزگرد که اغلب از بیابان‌های عراق و سوریه منشأ می‌گیرند و در برخی سال‌ها بیش از ۱۵ رویداد شدید دارند، با کاهش نور و

¹ Filter

Google و Springer Link، Science Direct، Science Scholar انجام شد. واژه‌های کلیدی جست‌وجو شامل «تغییرات اقلیمی»، «طوفان‌های ریزگرد»، «جنگل‌های زاگرس»، «خشکسالی»، «فرسایش خاک»، «تنوع زیستی» و «پایداری بوم‌سازگان» بودند که به صورت ترکیبی و با عملگرهای منطقی AND و OR استفاده شد. با استفاده از عملگر AND، می‌توانید چندین کلیدواژه را به هم متصل کرد. عملگر OR نیز این امکان را می‌دهد تا بین چندین گزینه جستجو نمود. این عملگرها کمک می‌کنند تا جستجوها دقیق‌تر و مؤثرتر انجام شود و کاربران نتیجه بهتری از جستجوی اطلاعات داشته باشند.

منابع بر اساس معیارهای انتشار در مجلات علمی معتبر یا اجلاس‌های بین‌المللی طی بازه زمانی ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۴ برای تضمین به‌روز بودن، ارائه داده‌های تجربی، تحلیلی یا مدل‌سازی مرتبط با موضوع و استفاده از روش‌های علمی مانند تحلیل‌های آماری، مدل‌های اقلیمی یا مطالعات میدانی انتخاب شدند. پس از جستجوی اولیه، ۱۱۲ منبع شناسایی شد که با غربالگری بر اساس معیارهای فوق، ۴۵ مقاله و گزارش نهایی انتخاب شدند. فرایند تحلیل‌ها در چهار مرحله شامل: الف) اطلاعات کمی (مانند تغییرات دما، تغییرات و شاخص‌های تنوع زیستی) و کیفی (مانند زیست‌محیطی و راهکارها) از منابع؛ ب) دسته‌بندی تغییرات اقلیمی (افزایش دما، کاهش بارش) و ریزگردها (فرسایش خاک، کاهش فتوسنتز) به صورت مجزا؛ ج) بررسی هم‌افزای این عوامل بر کارکردهای بوم‌سازگان و د) ارزیابی راهبردهای مدیریتی پیشنهادی در مطالعات انجام شد.

برای انجام تحلیل تطبیقی، از روش‌های آماری توصیفی و بررسی مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی، شامل سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده^۱ (RCP)، استفاده شد (Petritan et al., 2021). همچنین، مقیاس ریزگردها با استفاده از مدل‌های کاهش تابش نور و تحلیل‌های محیط زیستی ارزیابی گردید (Liang et al., 2014). جزئیات این روش‌ها در منابع اصلی به طور کامل ارائه شده‌اند و از تکرار آن‌ها در اینجا خودداری شده است. برای

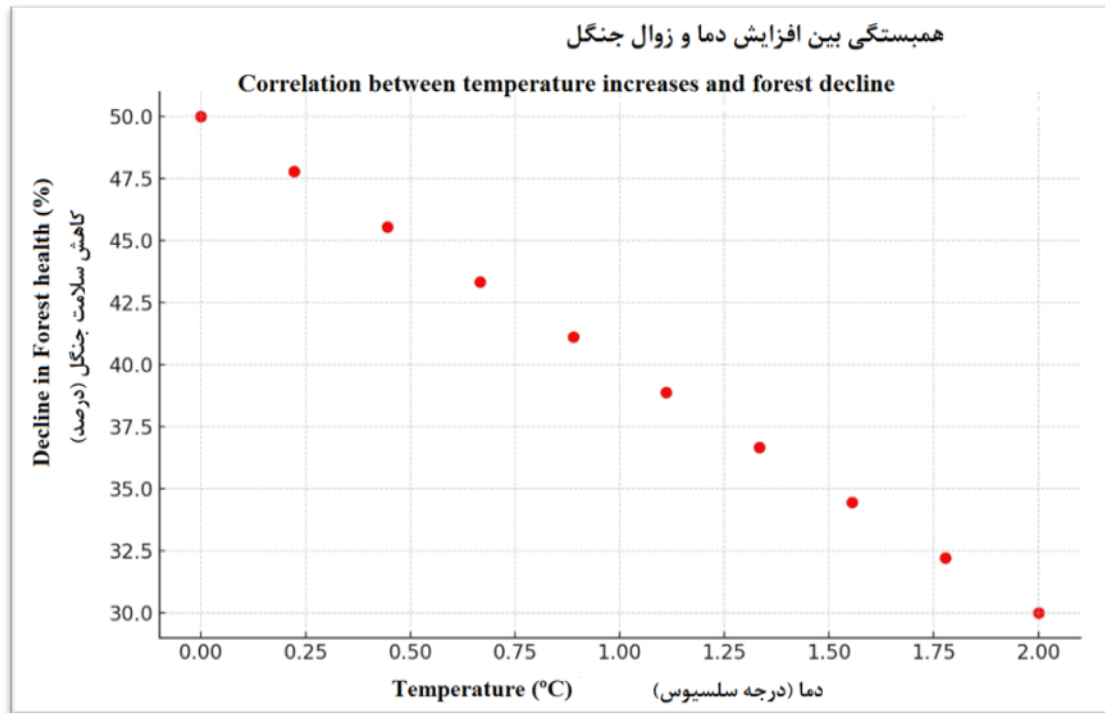
نشان می‌دهد و همچنین کاهش ۳۰ درصدی سلامت درختان جنگلی را مربوط به افزایش درجه‌حرارت گزارش کرده‌اند. تأثیرات گوناگون تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف تولیدی، محیط‌زیستی و جوامع انسانی سبب شده از آن به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم یاد شود (Arvandi, 2024). پژوهش‌های انجام شده تاکنون عمدتاً بر شناسایی کلی تأثیرات تغییر اقلیم بر بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس متمرکز شده‌اند، اما تحلیل جامعی از چگونگی تداوم این تهدیدات و پیامدهای زنجیره‌ای آن‌ها بر ساختار بوم‌سازگان، خدمات حیاتی و آسیب‌پذیری‌های جدید در این زمینه بر روی پوشش گیاهی این منطقه وجود ندارد. مطالعات چند سال اخیر تأثیر تغییر اقلیم بر جنگل‌ها را به صورت کلی بررسی کرده‌اند، اما سازوکار دقیق تغییرات ساختاری (مانند تغییر در ترکیب گونه‌ها، تراکم پوشش گیاهی یا تعادل اکولوژیک) به‌ویژه در بوم‌سازگان‌های حساسی مانند زاگرس کمتر تحلیل شده است.

هدف این مطالعه، بررسی علمی اثرات مشترک تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر پایداری بوم‌سازگان جنگلی زاگرس، تحلیل پیامدهای آن‌ها بر سلامت گونه‌ها، تنوع زیستی و کارکردهای اکولوژیکی و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش این تهدیدات و حفاظت از این میراث طبیعی است.

مواد و روش‌ها

این پژوهش به صورت مروری و باهدف بررسی هم‌زمان تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس انجام شد. منطقه مورد مطالعه، جنگل‌های زاگرس، با مساحتی حدود ۶ میلیون هکتار در غرب ایران واقع شده و یکی از بزرگ‌ترین بوم‌سازگان‌های کوهستانی نیمه‌خشک به شمار می‌رود (شکل ۱). این جنگل‌ها که عمدتاً از گونه‌های بلوط ایرانی (*Quercus persica*) تشکیل شده‌اند، به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خود، در معرض تنش‌های محیطی متعدد قرار دارند (Qorbani et al., 2012). داده‌ها از طریق مرور نظام‌مند منابع علمی گردآوری شدند. جستجوی جامع در پایگاه‌های اطلاعاتی معتبر شامل Scopus، Web of

¹ Representative Concentration Pathway



شکل ۲. همبستگی بین افزایش دما و کاهش سلامت جنگل‌ها (Sarab et al., 2022).

Fig 2. Correlation Between Temperature Increase and Forest Health Decline (Sarab et al., 2022).

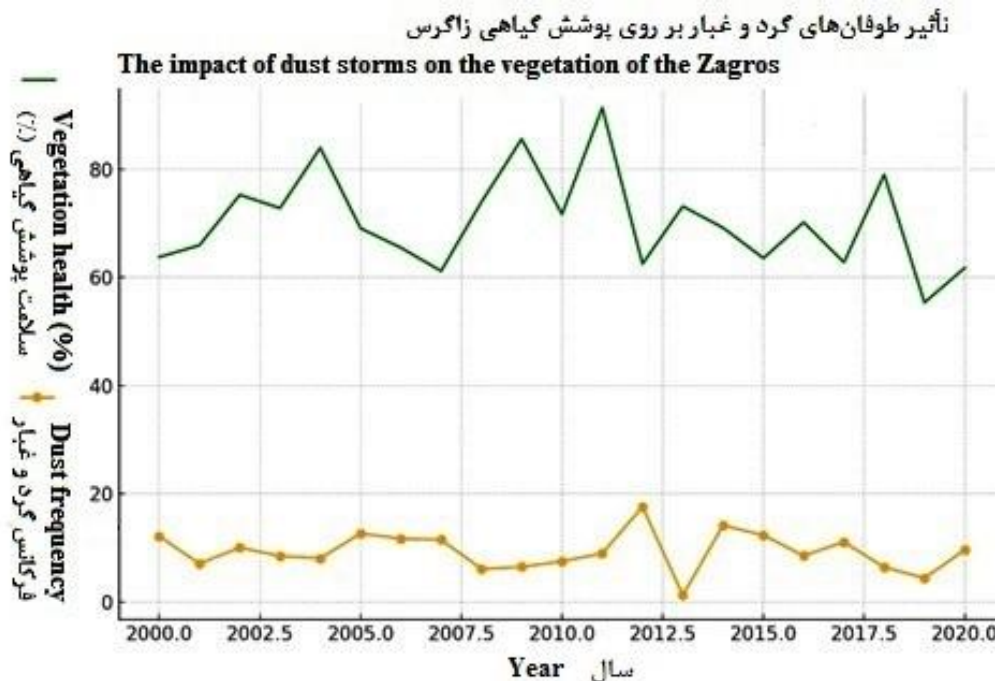
شکل ۳ رابطه میان فراوانی سالانه طوفان‌های ریزگرد (از ۵ تا ۱۵ رویداد در سال) و شاخص سلامت پوشش گیاهی (NDVI) را نشان می‌دهد (Rashki et al., 2017).

مطالعات نشان داده‌اند که ریزگردها می‌توانند به طور مستقیم بر سیستم ریشه‌ای درختان تأثیر بگذارند و باعث کاهش توان جذب آب و مواد مغذی توسط گیاهان شوند. همچنین، پدیده ریزگردها می‌تواند موجب بروز اختلالات در فرایندهای زیستی؛ مانند تولید اکسیژن، جذب کربن و تنظیم آب‌وهوا در سطح منطقه شود. از این رو، تهدید ریزگردها به‌عنوان یک عامل مهم در آسیب به بوم‌سازگان جنگلی است (Matinfar, 2014).

در شکل ۲، میزان سلامت جنگل‌ها (درصد) در برابر افزایش دمای سالانه (درجه سلسیوس) طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۰ ترسیم شده و کاهش از ۳۰٪ به ۵۰٪ را نشان می‌دهد (Sarab et al., 2022).

روند نزولی سلامت جنگل‌ها با افزایش دما بیانگر حساسیت بالای گونه‌های درختی زاگرس به گرمایش جهانی و افت منابع رطوبتی است. بر پایه این رابطه، اتخاذ سیاست‌های کاهنده انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهره‌گیری از گونه‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی، بخشی از راهکارهای ضروری برای مهار آثار منفی گرمایش بر بوم‌سازگان زاگرس خواهد بود.

طوفان‌های ریزگرد نیز تأثیر مخرب خود را بر این بوم‌سازگان جنگلی داشته‌اند. این پدیده، با منشأ بیابان‌های عراق و سوریه (Azizi et al., 2015)، نفوذ نور خورشید را تا ۳۰ درصد کاهش داده و فرایند فتوسنتز را مختل کرده است که به کاهش ۲۰ درصدی تولید زیست‌توده منجر می‌شود (Kabrick et al., 2008). افزون بر این، رسوب ذرات ریز، فرسایش خاک را تا ۱۸ درصد افزایش داده و سطح شوری را تا ۱۵ درصد بالا برده است (Adams et



شکل ۳. رابطه طوفان‌های ریزگرد و سلامت پوشش گیاهی زاگرس (Rashki et al., 2017).

Fig 3. The relationship between dust storms and the health of Zagros vegetation (Rashki et al., 2017).

اثرات هم‌زمان تغییرات اقلیمی و ریزگردها

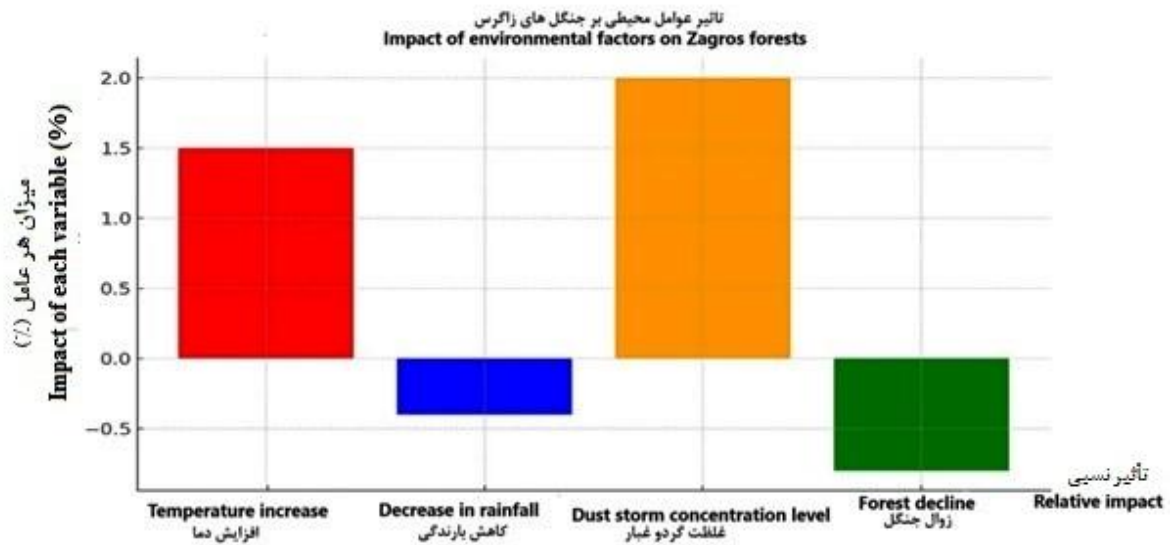
اثر هم‌زمان دو عامل تغییرات اقلیمی و ریزگردها، هم‌افزایی شدید را به دنبال دارد. تنوع زیستی در مناطق متأثر تا ۲۵ درصد کاهش یافته و تعداد گونه‌های گیاهی حساس از ۴۵ به ۳۴ گونه افت کرده است (Soleymani et al., 2021). ظرفیت ذخیره کربن نیز تا ۱۸ درصد کاهش یافته و میزان جذب سالانه CO₂ از ۱۲ تن به ۹ تن در رشد رسیده است (Ashena et al., 2019).

شکل ۴ سهم عوامل اصلی ناشی از تغییرات اقلیمی اصلی را مقایسه می‌کند؛ این شکل، با نمایش میزان شدت تأثیر هر عامل نشان می‌دهد. شکل ۴، تأثیر نسبی هر عامل را مقایسه می‌کند و نشان می‌دهد که کدام تغییرات محیطی بیشترین آسیب را به جنگل‌های زاگرس وارد می‌کنند که نیاز به توجه و مدیریت فوری دارد.

شکل (۳) به رابطه ریزگرد روی پوشش گیاهی منطقه زاگرس طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ پرداخته است. روند تغییر پوشش گیاهی نشان می‌دهد که در اوایل دوره، میزان پوشش گیاهی در سطح نسبتاً بالاتر قرار گرفته است و در سال‌های ابتدایی دهه ۲۰۰۰ سلامت نسبی را تجربه کرده است. باین‌حال، از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵، نوسانات محسوسی در پوشش گیاهی مشاهده می‌شود که دوره‌های افزایش و کاهش متوالی را نشان می‌دهد.

در سال ۲۰۱۵، پوشش گیاهی روند کاهشی را تجربه کرد. در بررسی فراوانی ریزگرد، مشاهده می‌شود که میزان این پدیده در اوایل دوره نسبتاً پایین بوده است، اما در برخی از سال‌ها افزایش چشمگیری داشته است. بیشترین میزان ریزگرد در حدود سال ۲۰۱۲ ثبت شده است که یک دوره با فراوانی بالای طوفان‌های ریزگردی را نشان می‌دهد.

پس از این سال، نوساناتی در مقدار ریزگرد وجود داشته است، اما روند مشخصی از افزایش یا کاهش در طول مدت مشاهده نمی‌شود.



شکل ۴. تأثیرات عوامل محیطی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس (Soleimani et al., 2020).

Fig 4. The Effects of Environmental Factors on Zagros Forest Ecosystems (Soleimani et al., 2020).

کاهش تراکم از ۶۵ درصد در سال ۲۰۱۴ به حدود ۴۷ درصد در سال ۲۰۲۲ را در برابر افزایش غلظت PM_{10} از ۵۰ به ۱۲۰ میکروگرم بر مترمکعب نشان می‌دهد. این رابطه منفی، با ضریب هم‌بستگی -0.78 ، بیانگر تأثیر مستقیم ذرات معلق بر کاهش پوشش گیاهی است (Koch et al., 2019).

داده‌ها حاکی از آن است که در سال‌هایی با فراوانی طوفان‌های ریزگرد بالاتر (بیش از ۱۲ رویداد در سال)، تراکم پوشش گیاهی تا ۱۰ درصد اضافی کاهش یافته و ضخامت لایه ریزگرد روی برگ‌ها افزایش یافته که فتوسنتز را مختل کرده است. این یافته‌ها، همراه با افت ۱۵ درصدی کیفیت خاک در این دوره، شکنندگی بوم‌سازگان زاگرس را در برابر ریزگردها تأیید می‌کند و بر ضرورت اقدامات حفاظتی تأکید دارد (Ashena et al., 2019).

این نمودار به‌وضوح نشان می‌دهد که افزایش میزان PM_{10} در هوا با کاهش تراکم پوشش گیاهی همراه است. این یافته اهمیت کاهش آلودگی هوا و واپایش منابع انتشار ریزگرد و آلاینده‌ها را برای حفظ اکوسیستم‌های گیاهی، به‌ویژه در مناطقی مانند زاگرس که دارای پوشش گیاهی حساس است، نشان می‌دهد. این روند کاهش که با خط‌چین قرمز نشان داده شده، بیانگر یک رابطه منفی بین افزایش PM_{10} و کاهش پوشش گیاهی است.

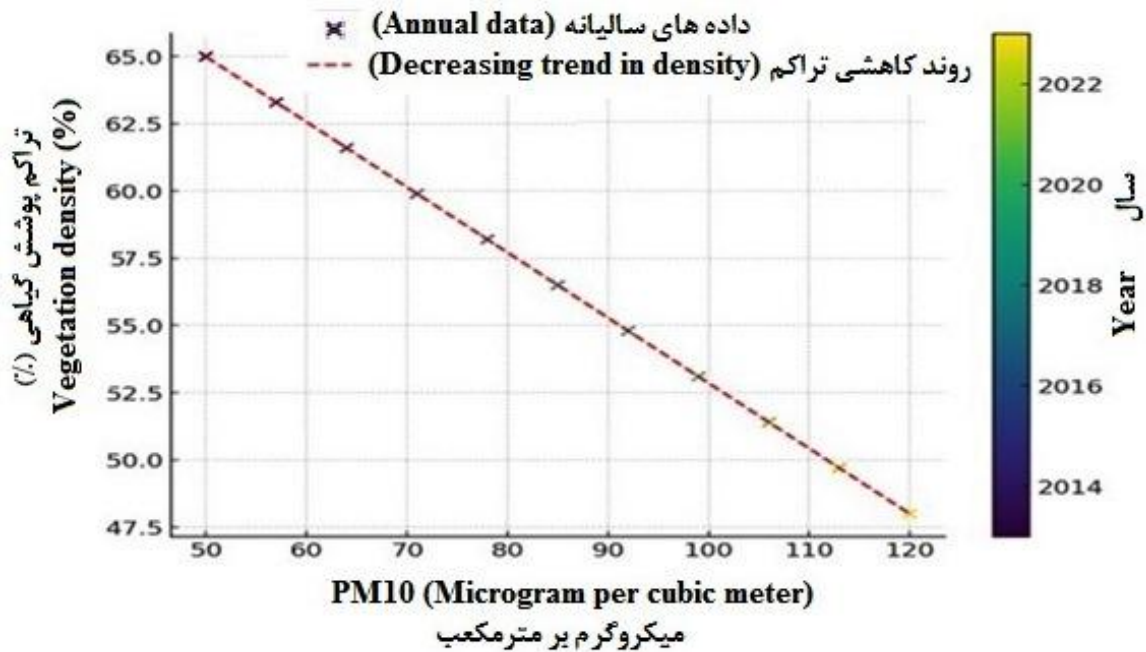
افزایش دما: نمودار یک هم‌بستگی مثبت بین افزایش دما و زوال جنگل را نشان می‌دهد که نشان می‌دهد دماهای بالاتر باعث تشدید استرس بر بوم‌سازگان جنگل می‌شوند.

کاهش بارندگی: کاهش بارش به‌عنوان عاملی که سلامت جنگل را تحت تأثیر منفی قرار می‌دهد، نشان داده شده است. این کاهش می‌تواند باعث کاهش تراکم پوشش گیاهی و افزایش آسیب‌پذیری جنگل در برابر سایر عوامل استرس‌زای محیطی شود.

غلظت طوفان‌های ریزگرد: سطوح بالای غلظت ریزگرد به‌عنوان عاملی که به تخریب جنگل کمک می‌کند، نشان داده شده است، این پدیده با تأثیر منفی بر فرایندهای حیاتی گیاهان مانند فتوسنتز و تنفس، سلامت جنگل را تهدید می‌کند.

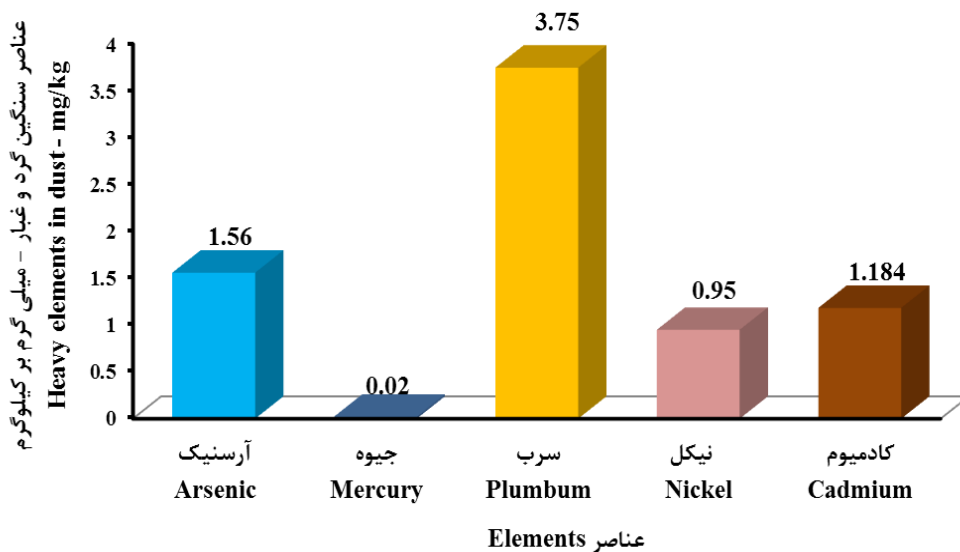
زوال جنگل: تأثیر تجمعی این عوامل منجر به کاهش قابل توجه سلامت جنگل می‌شود که با یک‌روند نزولی در داده‌ها نشان داده شده است.

شکل ۵، کاهش تراکم پوشش (۶۵٪ به ۴۷٪) در برابر افزایش PM_{10} (۵۰ به $120 \mu g/m^3$) طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۲ را نشان می‌دهد (Koch et al., 2019). در شکل ۵ محور افقی نشان‌دهنده غلظت PM_{10} (میکروگرم بر مترمکعب) و محور عمودی تراکم پوشش گیاهی (درصد)،



شکل ۵. تغییرات تراکم پوشش گیاهی در غلظت PM10 (Koch et al., 2019).

Fig 5. Vegetation Density Changes and Concentration PM10 (Koch et al., 2019).

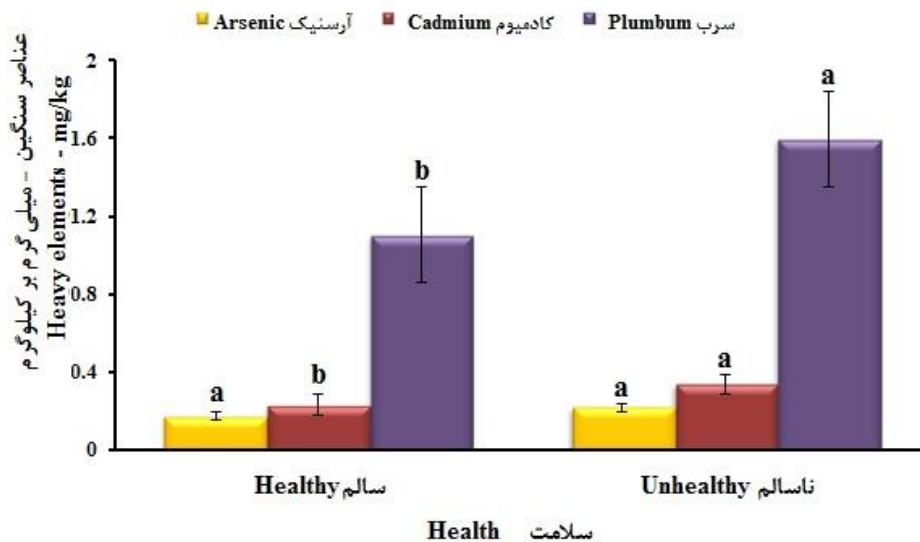


شکل ۶. میزان ریزگرد رسوب شده روی برگ درختان بلوط (Jahanbazy Goujani et al., 2020).

Fig. 6. Amount of Dust Deposited on Oak Tree Leaves (Jahanbazy Goujani et al., 2020).

مقابل جیوه با ۰/۰۲ میلی گرم بر کیلوگرم کمترین مقدار را به خود اختصاص داد.

نتایج حاصل از تجزیه ریزگرد رسوب شده در تله‌های رسوب‌گیر در جنگل‌های زاگرس نشان می‌دهد که مقدار سرب موجود در ریزگرد بیشتر از سایر عناصر است و مقدار آن تقریباً چهار برابر آرسنیک، جیوه و نیکل برآورد شد. در



شکل ۷. مقایسه تجمع عناصر سنگین در بافت درختان سالم و در حال خشکیدگی بلوط (Jahanbazy Goujani et al., 2020)
 Fig. 7. Comparison of Heavy Element Accumulation in The Tissue of Healthy and Dying Oak Trees (Jahanbazy Goujani et al., 2020)

درجه سلسیوس افزایش یافته و میزان بارشها ۲۰٪ کاهش یافته است (Moradi et al., 2021). این تغییرات منجر به کاهش ۲۵٪ رطوبت خاک (Sarab et al., 2022) و افزایش ۳۵٪ تبخیر (Bavaghar, 2012) شده است. در نتیجه، بوم‌سازگان‌های جنگلی زاگرس با تنش‌های حرارتی و آبی شدیدی مواجه شده‌اند. درختان بلوط ایرانی (*Quercus persica*) که گونه غالب در این منطقه محسوب می‌شوند، به طور مستقیم تحت‌تأثیر این تغییرات قرار گرفته‌اند. تحقیقات نشان می‌دهند که نرخ رشد سالانه این درختان ۴۰٪ و سلامت کلی آن‌ها ۳۰٪ کاهش یافته است (Karmian & Mirzaei, 2020). کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، خشک‌شدن چشمه‌ها و رودخانه‌های فصلی در ارتفاعات زاگرس (Sarab et al., 2022) نیز فرآیند بازسازی طبیعی جنگل‌ها را مختل کرده و دوره‌های خشکسالی را طولانی‌تر کرده است. افزایش دما و کاهش بارندگی همچنین منجر به افزایش احتمال آتش‌سوزی در جنگل‌های زاگرس شده است. ترکیب دماهای بالاتر، کاهش رطوبت خاک، و افزایش سرعت باد، شرایط را برای گسترش آتش‌سوزی‌های وسیع فراهم کرده است. این آتش‌سوزی‌ها نه تنها موجب از بین رفتن پوشش گیاهی و

تجمع عناصر سنگین در بافت گیاهی منجر به سمیت و ایجاد اختلال در رویش و در نهایت مرگ گیاهان می‌شود. سمیت عناصر سنگین وقتی نمایان می‌گردد که این عناصر در مقادیر بالا در سلول‌های گیاهی تجمع یابند. زمانی که درختان و درختچه‌های زاگرس در معرض عناصر سنگین موجود در ذرات ریزگرد قرار می‌گیرند سطوح مختلف سمیت ناشی از عناصر سنگین موجب تحریک دامنه وسیع از تغییرات متابولیک و فیزیولوژیک می‌شود (Dubey, 2011). عناصر سنگین دارای فعالیت‌های مختلف بر روی گیاهان هستند، مهم‌ترین و وسیع‌ترین اثر سمیت این عناصر، کاهش رویش گیاهان (Sharma & Dubey, 2007) همچنین نکرور شدن برگ‌ها، کاهش جوانه‌زنی بذرها و مختل‌شدن دستگاه فتوسنتز از سایر علائمی است که اغلب این موارد با مرگ گیاه همراه است. (Dalcorsio et al., 2010).

تأثیرات تغییرات اقلیمی بر بوم‌سازگان زاگرس

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد تأثیرات عمیقی بر بوم‌سازگان جنگلی زاگرس داشته‌اند. تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای سالانه در منطقه زاگرس از سال ۱۹۹۰ تاکنون ۱/۵

کاهش تنوع زیستی شده، بلکه چرخه بازتولید طبیعی بوم‌سازگان را نیز دچار اختلال کرده است.

تأثیرات طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس

یکی دیگر از چالش‌های زیست‌محیطی عمده در زاگرس، افزایش طوفان‌های ریزگرد با منشأ فرامرزی از بیابان‌های عراق و سوریه است (Azizi et al., 2015). داده‌ها نشان می‌دهند که نفوذ نور خورشید به دلیل وجود این ذرات معلق تا ۳۰٪ کاهش یافته (Rashki et al., 2017) که این امر فرآیند فتوسنتز را مختل کرده و تولید زیست‌توده را تا ۲۰٪ کاهش داده است (Adab et al., 2014). علاوه بر کاهش فتوسنتز، طوفان‌های ریزگرد موجب افزایش ۱۸٪ در میزان فرسایش خاک و ۱۵٪ در شوری سطحی شده‌اند (Jahanbazy Goujani et al., 2020). افزایش شوری خاک مانع از جذب مناسب مواد مغذی توسط گیاهان شده و در نتیجه رشد و بقای پوشش گیاهی را تهدید می‌کند. مطالعات همچنین نشان داده‌اند که ذرات ریزگرد حاوی عناصر سنگین مانند سرب هستند که در بافت گیاهی تجمع یافته و موجب سمیت و اختلال در متابولیسم گیاهی می‌شوند (Jahanbazy Goujani et al., 2020). شاخص سلامت پوشش گیاهی NDVI یکی از معیارهای اصلی سلامت پوشش گیاهی است (Rashki et al., 2017)، که نشان‌دهنده افت تراکم و کیفیت جنگل‌های زاگرس است. علاوه بر این، فراوانی طوفان‌های ریزگرد از ۵ رویداد در سال به ۱۵ رویداد در سال افزایش یافته است (Rashki et al., 2017) که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ریزگرد یکی از عوامل مؤثر بر کاهش پوشش گیاهی زاگرس است. برای حفاظت از پوشش گیاهی این منطقه، لازم است این پدیده به‌دقت بررسی شود و راهکارهای مدیریتی برای کاهش اثرات منفی آن بر بوم‌سازگان منطقه اجرا شود و مطابق نتایج شکل (۳) که افزایش غلظت ذرات معلق موجود در ریزگرد تأثیر مستقیمی بر زوال بوم‌سازگان جنگلی زاگرس دارد (Kooch et al., 2019). رابطه‌ای بین دو متغیر پوشش گیاهی و میزان ریزگرد در طول سال نشان می‌دهد که در سال‌هایی که ریزگرد افزایش یافته، پوشش گیاهی کاهش یافته است. این هم‌بستگی بیانگر تأثیر منفی ریزگرد

بر روی پوشش گیاهی منطقه است که می‌تواند منجر به کاهش نور خورشید، انسداد روزنه‌های گیاهان، کاهش میزان فتوسنتز و افزایش فشار آبی شود. باین‌حال، نوسانات در میزان پوشش گیاهی نشان می‌دهد که می‌تواند بر عوامل مختلف محیطی، از جمله افزایش ریزگرد، کاهش بارندگی و تغییرات اقلیمی تأثیر بگذارد که علاوه بر ریزگرد، عوامل دیگری مانند میزان بارندگی، دما، چرای دام و فعالیت‌های انسانی نیز در این تغییرات نقش دارند. روند کلی داده‌ها در شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش میزان PM_{10} ، تراکم پوشش گیاهی کاهش می‌یابد. مقدار تراکم پوشش گیاهی در سال‌هایی که PM_{10} کمتر است (در محدوده‌ی ۵۰ تا ۶۰ میکروگرم بر مترمکعب) بالاتر است و در حدود ۶۵٪ قرار دارد. در مقابل، در سال‌هایی که میزان PM_{10} افزایش یافته و به حدود ۱۲۰ میکروگرم بر مترمکعب رسیده، تراکم پوشش گیاهی به کمتر از ۵۰٪ کاهش پیدا کرده است.

اثرات هم‌افزایی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس

بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که ترکیب اثرات تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد به‌عنوان دو عامل کلیدی در تخریب زیست‌بوم‌های طبیعی، منجر به کاهش ۲۵٪ در تنوع زیستی شده است (Soleimani et al., 2020). این کاهش عمدتاً به دلیل تغییر در الگوهای بارندگی، افزایش دما، و افزایش شدت و فراوانی پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و طوفان‌های ریزگرد رخ داده است. این شرایط زیست‌محیطی نه‌تنها منجر به از بین رفتن گونه‌های حساس و کاهش غنای گونه‌ای شده، بلکه موجب تغییرات اکولوژیکی در ترکیب و ساختار جوامع زیستی نیز گردیده است.

همچنین، تخریب بوم‌سازگان جنگلی و کاهش تراکم پوشش گیاهی به کاهش ۱۸٪ در ظرفیت ذخیره کربن منجر شده است (Ashena et al., 2019). جنگل‌های زاگرس که از مهم‌ترین مخازن کربن کشور محسوب می‌شوند، تحت تأثیر این تغییرات، توانایی خود را در جذب دی‌اکسیدکربن از ۱۲ تن به ۹ تن در هکتار کاهش داده‌اند. این افت عملکرد در جذب کربن، پیامدهای

بوم‌سازگان زاگرس، از جمله تنظیم چرخه کربن و ذخیره‌سازی آب، خواهد شد.

بنابراین، اتخاذ سیاست‌های مدیریت منابع طبیعی، احیای جنگل‌ها، و همکاری‌های بین‌المللی برای واپایش کانون‌های ریزگرد ضروری است. حفاظت از این بوم‌سازگان مستلزم یک رویکرد جامع و هماهنگ است که دانش بومی، فناوری‌های نوین، و سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی را در بر گیرد. بدون اقدامات فوری، تداوم این روند می‌تواند جنگل‌های زاگرس را به نقطه‌ای غیرقابل‌بازگشت برساند و پیامدهای جدی برای امنیت زیست‌محیطی منطقه ایجاد کند. پژوهش‌های آینده باید بر تحلیل روندهای بلندمدت، ارزیابی راهکارهای مدیریتی، و بررسی تأثیرات اقتصادی - اجتماعی تغییرات اقلیمی بر جوامع محلی تمرکز کنند تا راه‌حل‌های پایدار و عملی برای حفظ این میراث طبیعی ارائه شود.

راهکارهای پیشنهادی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و ریزگرد

با توجه به پیامدهای گسترده تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد بر بوم‌سازگان زاگرس، اجرای راهکارهای مدیریت پایدار ضروری است. برخی از این راهکارها شامل:

- **مدیریت منابع آب:** استفاده از روش‌های نوین آبیاری، احداث سدهای کوچک برای حفظ منابع آبی، و تقویت سفره‌های آب زیرزمینی.
- **احیای پوشش گیاهی:** اجرای برنامه‌های کاشت گونه‌های مقاوم به خشکی، جنگل‌کاری و ایجاد کمربندهای سبز برای مقابله با بیابان‌زایی.
- **مدیریت خاک:** بهبود روش‌های کشاورزی حفاظتی، استفاده از مالچ پاشی و افزایش مواد آلی در خاک برای کاهش فرسایش.
- **کاهش ریزگرد:** همکاری‌های منطقه‌ای با کشورهای همسایه برای مدیریت منابع ریزگرد، تثبیت شن‌های روان و کاهش رهاسازی ذرات معلق در هوا.

گسترده‌ای برای تعادل کربنی منطقه دارد و می‌تواند به افزایش بازخوردهای منفی در تغییرات اقلیمی از طریق افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر شود. در نتیجه، چرخه کربن و فرآیندهای تنظیم اقلیم که به واسطه بوم‌سازگان جنگلی انجام می‌شوند، دچار اختلال شده‌اند. از سوی دیگر، تخریب پوشش گیاهی و تشدید فرآیندهای فرسایش خاک منجر به افزایش ۳۵٪ در آسیب‌پذیری جنگل‌های زاگرس در برابر آفات مخرب، از جمله سوسک چوب‌خوار شده است (Sarab et al., 2022). این آفات که در شرایط ضعف فیزیولوژیکی درختان به سرعت گسترش می‌یابند، باعث زوال بیشتر اکوسیستم شده و یک چرخه تخریب خود تقویت‌شونده را ایجاد می‌کنند. چنین وضعیتی می‌تواند پایداری جنگل‌های زاگرس را در بلندمدت به خطر انداخته و ظرفیت آن‌ها در ارائه خدمات بوم‌سازگان، نظیر حفظ تعادل هیدرولوژیکی و تأمین منابع آبی، را کاهش دهد.

با توجه به اینکه جنگل‌های زاگرس تأمین‌کننده ۴۰٪ آب کشور هستند (Qorbani Salkhord et al., 2012)، این تغییرات پیامدهای گسترده‌ای برای امنیت آبی منطقه به همراه خواهد داشت. کاهش پوشش گیاهی موجب کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی شده که در نهایت منجر به کاهش تغذیه منابع آب زیرزمینی و افزایش خطر وقوع سیلاب‌های مخرب می‌شود. در مجموع، تداوم این روندها می‌تواند تهدیدی جدی برای پایداری منابع طبیعی و معیشت جوامع وابسته به این زیست‌بوم‌های ارزشمند باشد؛ بنابراین، اجرای راهکارهای مدیریتی و سیاست‌های حفاظتی مبتنی بر اصول اکولوژیکی جهت کاهش اثرات تغییرات اقلیمی و افزایش تاب‌آوری جنگل‌های زاگرس امری ضروری به نظر می‌رسد.

نتیجه‌گیری

تحلیل جامع این پژوهش نشان داد که جنگل‌های زاگرس به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد قرار گرفته‌اند. افزایش دما، کاهش بارش، و افزایش ریزگرد موجب افت رشد گونه‌های کلیدی، کاهش تنوع زیستی و تضعیف کارکردهای بوم‌سازگان شده‌اند. این روند در صورت ادامه، منجر به کاهش کارکردهای حیاتی

Journal of Forest and Poplar Research, 23(3), 502-515.

<https://doi.org/10.22092/ijfpr.2015.105655>, Bavaghar, M.P. (2012). Evaluation of the capability of IRS-P6 satellite data for predicting quantitative attributes of forests (case study: Northern Zagros forests). *Iranian Journal of Forest*, 3(4), 277-289. [In Persian]. https://www.ijf-isaforestry.ir/article_4663.html.

Dalcorso, G., Farinati, S. & Furini, A. (2010). Regulatory networks of cadmium stress in plants. *Plant Signaling & Behavior*, 5(6), 663-667. <https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11425>.

Dubey, R.S. (2011). *Metal toxicity, oxidative stress, and antioxidative defense system in plants*. In Gupta S.D. (Ed.), *Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants*. CRC Press, Boca Raton, pp. 177-203. <https://doi.org/10.1201/9781439854082>.

Fakhar, M.S. & Nazari, B. (2024). Multitemporal analysis of drought in Iran: Monitoring and evaluation of spatial and temporal characteristics using MODIS indices. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(1), 39 – 58. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7011.1050>.

Fakhri, M. (2024). Investigating the condition of Iran's temperature changes compared to the past long-term climatic standard period. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 17 – 32. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062>.

Hajarian, A. (2025). Meteorological drought risk monitoring and zoning using a random forest model. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, Articles in press, Accepted manuscript, available online from 20 January 2025. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>.

Jahanbazy Goujani, H., Iranmanesh, Y. & Talebi, M. (2020). *Factors affecting the decline of Zagros forests and management strategies*. Research Institute of Forests and Rangelands Press, Tehran. ISBN: 978-9644734236. https://agrilib.areeo.ac.ir/book_8578.html.

Kabrick, J.M., Dey, D.C., Jensen, R.G., & Wallendorf, M. (2008). The role of environmental factors in oak decline and mortality in the Ozark Highlands. *Forest Ecology and Management*, 255(5-6), 1409-1417. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.054>.

Karmian, M. & Mirzaei, J. (2020). The most important factors affecting the dieback of Iranian oak (*Quercus brantii*) in Ilam Province. *Iranian Forest Ecology*, 8(15), 93-103. <https://doi.org/10.52547/ifej.8.15.93>.

Koch, K., Samson, R., & Denys, S. (2019). Aerodynamic characterisation of green wall vegetation based on plant morphology: An experimental and computational fluid dynamics

• پیشگرمی و پژوهش: توسعه سامانه‌های پیش

تغییرات اقلیمی، مطالعه الگوهای باد و ریزگرد و اجرای پژوهش‌های کاربردی در زمینه تأثیرات اقلیمی بر بوم‌سازگان‌های حساس.

در نهایت، با اجرای سیاست‌های پایدار و هماهنگی بین‌المللی، می‌توان اثرات منفی تغییرات اقلیمی و طوفان‌های ریزگرد را کاهش داد و بقای بوم‌سازگان زاگرس را برای نسل‌های آینده تضمین کرد.

منابع

Adab, H., Amirahmadi, A. & Atabati, A. (2014). Relating vegetation cover with land surface temperature and surface Albedo in the warm period of the year using MODIS imagery in northern Iran. *Physical Geography Research*, 46(4), 419-434. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2014.52994>.

Adams, H.D., Zeppel, M.J., Anderegg, W.R., Hartmann, H., Landhäusser, S.M., Tissue, D.T.,... & McDowell, N.G. (2017). A multi-species synthesis of physiological mechanisms in drought-induced tree mortality. *Nature Ecology & Evolution*, 1(9), 1285-1291. <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0248-x>.

Ahmadi, R., Kiadaliri, H., Mataji, A. & Kafaky, S. (2014). Oak forest decline zonation using the AHP model and GIS technique in the Zagros forests of Ilam province. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, 4(3), 141-150. <https://innspub.net/oak-forest-decline-zonation-using-ahp-model-and-gis-technique-in-zagros-forests-of-ilam-province/>

Andersson, M., Milberg, P. & Bergman, K. O. (2011). Low pre-death growth rates of oak (*Quercus robur* L.): Is oak death a long-term process induced by dry years? *Annals of Forest Science*, 68(8), 159-168. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0015-0>.

Arvandi, S. (2024). The effect of climate change on the way of investing in modern irrigation systems. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 97 – 110. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7834.1071>.

Ashena, M. & Hossein, A.S. (2019). Evaluation of factors affecting changes in carbon dioxide emissions in Iran with emphasis on the role of urbanization: Decomposition analysis method. *Geography and Environmental Hazards*, 9(2), 145-163. <https://doi.org/10.22067/geo.v9i1.84249>.

Azizi, G., Miri, M., Mohammadi, H. & Pourhashemi, M. (2015). Analysis of the relationship between forest decline and precipitation changes in Ilam Province. *Iranian*

- region, Iran. *Catena*, 158, 305-312. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.011>.
- Sarab, S.A., Rashki, A., Moayeri, M.H. & Shataee Jouibari, Sh. (2022). Investigating the impact of drought and dust on oak trees in the west of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15, 1583. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10759-2>.
- Shahsavani, A., Yarahmadi, M., Mesdaghinia, A., Younesian, M., Jaafarzadeh, N., Naimabadi, M. (2012). Analysis of dust storms entering Iran with emphasis on Khuzestan Province. *Hakim Res J* 15(3), 192-202. [In Persian]. <http://hakim.tums.ac.ir/article-1-1040-en.html>.
- Sharma, P. & Dubey, R.S. (2007). Involvement of oxidative stress and role of antioxidative defense system in growing rice seedlings exposed to toxic concentrations of aluminum. *Plant Cell Reports*, 26(11), 2027-2038. <https://doi.org/10.1007/s00299-007-0416-6>.
- Soleimani, Z., Teymouri, P., Boloorani, A.D., Mesdaghinia, A., Middleton, N. & Griffin, D. W. (2020). An overview of bioaerosol load and health impacts associated with dust storms: A focus on the Middle East. *Atmospheric Environment*. 223, 117187. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117187>.
- Soltani, S., et al. (2020). Climate change and vegetation dynamics in the Zagros region. *Global Change Biology*, 26(4), 1574-1590. <https://doi.org/10.1111/gcb.14863>.
- approach. *Biosystems Engineering*, 178, 34 – 51. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.10.019>.
- Kooh Soltani, S., Alesheikh, A. A., Ghermezcheshmeh, B. & Mehri, S. (2018). An evaluation of potential Oak decline in the Forest of the Zagros using GIS, RS, and FAHP methods. *Journal of Ecohydrology*, 5(2), 713-725. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.225917.448>.
- Liang, L., Zhao, S. H., Qin, Z. H., He, K. X., Chen, C., Luo, Y. X., & Zhou, X. D. (2014). Drought change trend using MODIS TVDI and its relationship with climate factors in China from 2001 to 2010. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(7), 1501-1508. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60813-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60813-3).
- Matinfar, H. (2014). Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosols in the western part of Iran based on MODIS spectral data. *Journal of Water and Soil Conservation*, 21(4), 119-137. [In Persian]. [DOR: 20.1001.1.23222069.1393.21.4.6.7](https://doi.org/10.1001.1.23222069.1393.21.4.6.7)
- Mirakhorlou, Kh (2021). *The importance of digital and thematic land cover information in the Zagros habitat*, Research Institute of Forest and Rangeland, Forest news and updates, 20 December 2021. [In Persian].
- Moradi, A., Taheri Abkenar, K., Shabaniyan, N. & Afshar Mohammadian, M. (2021). The potential of oak (*Quercus spp.*) and wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) forest species to deposit microdust particles. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 29(3), 273-284. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2021.356258.2023>.
- Noroozi, A., Miri, M., Nikkami, D., Razi, T., Sarreshtehdari, A., and Shoaee, Z. (2022). Assessment of climatic hazards' impact on oak dieback in the west of Iran. *Watershed Engineering and Management*, 14(4), 424-437. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.353749.1885> [In Persian].
- Petrutan, A. M., Petrutan, I. C., Hevia, A., Walentowski, H., Bouriaud, O. & Sánchez-Salguero, R. (2021). Climate warming predisposes sessile oak forests to drought-induced tree mortality regardless of management legacies. *Forest Ecology and Management*, 491, 119097. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119097>.
- Qorbani Salkhord, R., Mobasheri, M.R. & Rahimzadehgan, M. (2012). A fast method for assessment of PM10 concentration using MODIS images, A case study in Tehran. *Hakim*, 15(2), 166-177. [In Persian]. <http://hakim.tums.ac.ir/article-1-1019-en.html>.
- Rashki, A., et al. (2017). Effects of dust storms on soil characteristics and vegetation in the Zagros



Evaluation of Climate Models for Simulation of Temperature and Precipitation: Selection of the Best AR6 Model Using Multi-Criteria Decision-Making and Performance Metrics

Negin Nabatghods¹, Parisa-Sadat Ashofteh^{2,*} 

1. M.Sc. Student, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.
2. Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran.

*Corresponding Author: ps.ashofteh@qom.ac.ir

Keywords:

CMIP6 climate models, Temperature and precipitation simulation, Climate change, Multi-Criteria decision-making (AHP), Performance evaluation metrics.

Received:

25 March 2025

Revised:

22 April 2025

Accepted:

06 May 2025

Introduction

Temperature and precipitation are fundamental climatic parameters that play a crucial role in climate change studies. Their accurate simulation is vital for effective water resource management and strategic planning in response to evolving climatic conditions. General Circulation Models (GCMs) serve as powerful tools for predicting future climate scenarios; however, significant variations among model outputs necessitate the selection of the most suitable model tailored to the specific climatic conditions of the study area (Qarnqu Watershed). Previous studies have integrated Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods with statistical performance metrics to identify the optimal climate model, thereby enhancing predictive accuracy and minimizing uncertainties in decision-making processes. In this study, the performance of 19 CMIP6 climate models in simulating temperature and precipitation was assessed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method combined with statistical indicators. The primary objective was to determine the most appropriate CMIP6 climate model for the study area.

Materials and Methods

In this study, the long-term monthly averages of temperature and precipitation simulated by 19 climate models from the CMIP6 report were computed for the baseline period of 1971–2000. These simulated values were then compared with the corresponding observed data obtained from the Miyaneh synoptic station during the same period.

How to cite this article:

Nabatghods, N., & Ashofteh, P. S. (2025). Evaluation of climate models for simulation of temperature and precipitation: selection of the best AR6 model using multi-criteria decision-making and performance metrics. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Special Issue), 17-36. [10.22077/jdcr.2025.9112.1130](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9112.1130).



To assess the accuracy of the models, seven statistical performance metrics—including Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Kling-Gupta Efficiency (KGE), Root Mean Square Error (RMSE), Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), Mean Absolute Error (MAE), Percent Bias (PBIAS), and Pearson correlation coefficient (r)—were calculated for all 19 models and subsequently compared. To enhance the analysis, each model was weighted using the weighted average method, which incorporates observed mean values of temperature and precipitation. This weighting approach aimed to provide a more comprehensive evaluation of model performance. Finally, the Expert Choice software was utilized to rank and select the best-performing model among the 19 CMIP6 models for simulating both temperature and precipitation variables. The selection process was based on an integration of statistical metrics and the AHP method.

Results and Discussion


This study evaluates 19 climate models from the CMIP6 report and investigates the selection of the optimal model for simulating temperature and precipitation. The results indicate that certain models, such as CMCC-ESM2 and FIO-ESM-2-0, performed well in simulating precipitation, with estimated values showing reasonable agreement with observed data. Similarly, models like MRI-ESM1-2-LR and AWI-CM-1-1-MR provided accurate temperature estimates, demonstrating strong consistency with observational data. Furthermore, the performance assessment of the climate models using statistical metrics revealed that the models generally performed better in simulating temperature than precipitation. To enhance the analysis, each of the 19 models was weighted using the Weighted Average Method (WAM), which incorporates observed mean values of temperature and precipitation. The results showed that models NORESM2-MM and INM-CM4-8 had the strongest influence on precipitation simulation, while models MPI-ESM1-2-LR and NESM3 carried the most weight for temperature simulation. The final selection of the best-performing model was conducted using Expert Choice software, which considered the seven key statistical criteria introduced earlier and performed pairwise comparisons among them. Based on a comprehensive evaluation of all requirements, the CMCC-ESM2 model was identified as the best model for generating future precipitation data, while the MPI-ESM1-2-LR model was selected as the optimal choice for simulating future temperature data.

Conclusion

In summary, the findings of this study indicate that climate models generally perform better in simulating temperature than precipitation. Additionally, the evaluation and comparison of 19 CMIP6 climate models using Expert Choice software, combined with the AHP and statistical criteria, revealed that the CMCC-ESM2 model exhibited the highest accuracy in precipitation simulation, while the MPI-ESM1-2-LR model excelled in temperature simulation. These results underscore the importance of selecting climate models tailored to specific climatic variables and regions. The outcomes of this research contribute to improving climate projections and supporting decision-making processes related to water resource management and climate change adaptation strategies. Future studies are recommended to further validate these findings by applying the selected models to other climatic regions or incorporating additional statistical metrics and advanced weighting methods.



ارزیابی شبیه‌سازی مدل‌های اقلیمی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و معیارهای عملکرد

نگین نبات‌فدس^۱ و پریساسادات آشفته^{۲*} 

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول: ps.ashofteh@qom.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی: مدل‌های اقلیمی CMIP6، شبیه‌سازی دما و بارش، تغییر اقلیم، تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP)، شاخص‌های ارزیابی عملکرد.

این پژوهش به بررسی عملکرد ۱۹ مدل اقلیمی از گزارش ششم (CMIP6) در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در حوضه آبریز قرنقو طی دوره ۱۹۷۱-۲۰۰۰ می‌پردازد. هدف اصلی، شناسایی دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در این منطقه است. برای ارزیابی عملکرد مدل‌ها، از معیارهای آماری شامل کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، کارایی کلینگ-گپتا (KGE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال‌شده (NRMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، درصد اریبی (PBIAS) و ضریب همبستگی (r) استفاده می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی دما به‌طور قابل توجهی بهتر از بارش است. مدل‌های MPI-ESM1-2-LR و CMCC-ESM2 به ترتیب به‌عنوان بهترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی دما و بارش شناسایی شدند. علاوه بر این، تحلیل حساسیت و وزن‌دهی مبتنی بر AHP نشان داد که مدل‌های INM-CM4-8 و NORESM2-MM بیش‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی بارش و مدل‌های NESM3 و MPI-ESM1-2-LR بیش‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی دما دارند. همچنین، تحلیل حساسیت انجام‌شده، پایداری نتایج را در شرایط مختلف تأیید می‌کند. یافته‌های این مطالعه می‌توانند به برنامه‌ریزی‌های آبی و مدیریت منابع طبیعی در منطقه کمک کند. در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های دقیق‌تر می‌تواند به کاهش عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌های اقلیمی منجر شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۱۷

مقدمه

تغییرات اقلیمی، به‌عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های قرن حاضر، تأثیرات عمیقی بر سامانه‌های طبیعی و انسانی از جمله منابع آبی و الگوهای بارش گذاشته است (Abdolzadeh et al., 2022). با توجه به نقش کلیدی دما و بارش در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی‌های آبی و تعیین تغییرات اقلیمی، شبیه‌سازی دقیق این متغیرها اهمیت ویژه‌ای دارد (Mirzaei et al., 2023; Helmi et al., 2025). اما تنوع و عدم دقت مدل‌های اقلیمی موجود، کارآمدی و قابلیت اعتماد پیش‌بینی‌های اقلیمی را محدود می‌کند.

در این زمینه، ارزیابی جامع و مقایسه‌ای مدل‌های اقلیمی جهت شناسایی دقیق‌ترین مدل برای شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعاتی امری ضروری است. از سوی دیگر، استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و بهره‌گیری از معیارهای آماری دقیق می‌تواند در انتخاب بهینه مدل‌های اقلیمی مؤثر باشد تا علاوه بر ارتقای دقت پیش‌بینی‌ها، به کاهش عدم قطعیت در تصمیم‌گیری‌های مرتبط کمک کند.

در این راستا، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به‌عنوان یک رویکرد سازماندهی‌شده، امکان ارزیابی و مقایسه مدل‌ها را براساس شاخص‌های آماری مختلف فراهم می‌کنند. این روش‌ها با در نظر گرفتن معیارهای مختلف، به انتخاب مدلی کمک می‌کنند که بیش‌ترین تطابق را با شرایط واقعی داشته باشند (Saaty, 1990). در ادامه تحقیقات مختلفی که در این راستا انجام شده است، تشریح می‌شوند.

کیجلاستروم (Kjellstrom, 2010) آمار روزانه و ماهانه دماهای بیشینه و کمینه و بارش را در مجموعه‌ای از ۱۶ مدل اقلیمی منطقه‌ای با استفاده از داده‌های بازسازی‌شده برای دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ ارزیابی کردند.

نتایج نشان دادند که دقت مدل‌ها بسته به فصل و منطقه متغیر بوده و هیچ مدلی در همه شرایط بهترین یا بدترین عملکرد را نداشته است. ویانت (Weyant, 2017) دو دسته از مدل‌های ارزیابی یک‌پارچه (IAMs) را بررسی نمود: مدل‌های تصمیم‌فرآیند (DP-IAM) که بر گزینه‌های کاهش تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن تمرکز

داشتند، و مدل‌های تحلیل هزینه-فایده (BCA-IAM) که به‌صورت کلی‌تر به محاسبه مسیرهای انتشار کربن و قیمت‌های کربن برای بیشینه‌سازی رفاه جهانی پرداختند. نتیجه این بود که این مدل‌ها در سیاست‌گذاری مؤثر بودند، اما عدم قطعیت‌های آن‌ها ناشی از کمبود درک کامل سامانه‌های اقلیمی بود. پیشرفت‌های آینده در مدل‌سازی می‌تواند این ابزارها را دقیق‌تر و کاربردی‌تر کند.

کیم و همکاران (Kim et al., 2020) مدل‌های CMIP6 را با تمرکز بر شاخص‌های حدی اقلیمی^۱ ETCCDI ارزیابی کردند و عملکرد آنها را در شبیه‌سازی الگوهای دما و بارش‌های شدید با داده‌های HadEX3، بازتحلیل‌ها و مدل‌های CMIP5 مقایسه کردند.

نتایج نشان دادند که مدل‌های CMIP6 بهبودهای محدودی در شبیه‌سازی دما و بارش نسبت به CMIP5 داشتند، اما اریبی‌هایی مانند سردی بیش از حد در مناطق قطبی و خشکی در مناطق گرمسیری همچنان وجود داشت.

بایسا و همکاران (Bayissa et al., 2021) عملکرد چهار مدل اقلیمی منطقه‌ای که توسط سه مدل گردش عمومی جو راه‌اندازی شده‌اند را برای شبیه‌سازی شاخص‌های اقلیمی مبتنی بر دما و بارش در دوره مرجع ۱۹۷۵-۲۰۰۵ ارزیابی کردند.

نتایج نشان دادند که برخی مدل‌ها مانند EC-EARTH.HIRHAM5 و MPI-ESM-LR.CRCM5 در بازتولید شاخص‌های مشاهده‌شده عملکرد بهتری داشتند، در حالی که میانگین مجموعه مدل‌ها در شبیه‌سازی شاخص‌های دمایی موفق‌تر بود.

پرادان و همکاران (Pradhan et al., 2021) عملکرد ۱۲ مدل گردش عمومی (GCM) از گزارش CMIP5 را برای شبیه‌سازی بارش و دما در حوضه رودخانه کوشی نیپال ارزیابی نمودند.

نتایج نشان دادند که مدل‌های CanESM2 و CSIRO-Mk3.6.0 برای پیش‌بینی رویدادهای حدی بارش و

¹ Expert Team on Climate Change Detection and Indices

Choice رویکردی دقیق و سازمان‌دهی شده برای انتخاب بهترین مدل‌ها به نظر می‌رسد.

با توجه به حساسیت منطقه قرنقو نسبت به تغییرات اقلیمی، تمرکز بر پیش‌بینی‌های دقیق‌تر می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های مؤثر در مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای کمک کند.

از دیدگاه علمی، بهره‌گیری از معیارهای آماری در این مطالعات برای ارزیابی دقیق‌تر، اهمیت ویژه‌ای دارد. هدف این مطالعه، ارزیابی و مقایسه‌ی عملکرد مدل‌های تغییر اقلیمی گزارش ششم (CMIP6) در شبیه‌سازی دما و بارش در حوضه قرنقو در دوره (۲۰۰۰-۱۹۷۱) برای انتخاب بهترین مدل با بهترین رویکرد دمایی و بارشی است.

منطقه مذکور به دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی و تأثیرپذیری بالا از تغییرات اقلیمی، به‌عنوان یک منطقه حساس و مهم شناخته می‌شود. با توجه به تأثیرات تغییر اقلیم بر الگوهای دما و بارش، ضرورت دارد که مدل‌های اقلیمی با دقت بالایی ارزیابی شوند تا بتوانند پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از شرایط اقلیمی آینده ارائه دهند. برای این منظور، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (روش AHP) در نرم‌افزار Expert choice با معیارهای آماری دقیقی بهره گرفته شد.

این رویکرد به‌دنبال شناسایی بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی دقیق‌تر تغییرات اقلیمی در منطقه است. بنابراین، این مطالعه با هدف رفع این چالش‌ها و ارائه یک چارچوب علمی، به ارزیابی و انتخاب بهترین مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش منطقه قرنقو می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

در ابتدا، داده‌های مشاهداتی دما و بارش جمع‌آوری و پردازش می‌شوند تا به‌عنوان مبنای مقایسه عملکرد مدل‌ها قرار گیرند. پس از جمع‌آوری داده‌های مربوط به مدل‌ها، وزن‌دهی اولیه مورد بررسی قرار می‌گیرد. به‌منظور ارزیابی دقت هر مدل، معیارهای آماری مختلفی شامل NSE، KGE، RMSE، NRMSE، MAE، PBIAS و r برای هر مدل محاسبه می‌شوند.

مدل‌های NorESM1-M، CanESM2، BCC-CSM 1.1 و CNRM-CM5 برای رویدادهای حدی دما مناسب‌تر بودند. آنیل و راج (Anil and Raj, 2022)، ۲۱ مدل GCM از پروژه CMIP6 را برای شبیه‌سازی بارش ماهانه در دوره ۱۹۵۱-۲۰۱۴ در حوضه رودخانه کریشنا^۱ بررسی نمودند. روش عدم قطعیت متقارن^۲ (SU) و روش اولویت‌بندی براساس شباهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) برای انتخاب مناسب‌ترین مدل‌ها استفاده شدند. مدل‌های BCC-INM-CM2-MR، MIROC6، IPSL-CM6A-LR و MPI-ESM1-2-HR به‌عنوان مناسب‌ترین مدل‌ها شناسایی شدند. نتایج نشان دادند که تغییرات بارش در دوره آینده (۲۰۷۱-۲۱۰۰) در فصل موسم بارانی بیش‌تر از کل سال بود، که نشان‌دهنده تمرکز بیش‌تر بارندگی در این فصل بود.

هونگو و همکاران (Houngue et al., 2022)، ۱۵ مدل اقلیمی منطقه‌ای موجود در پایگاه داده CORDEX را با استفاده از روش اولویت‌بندی براساس شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) برای شناسایی بهترین مدل‌ها برای مطالعات اقلیمی در حوضه رودخانه مونو^۳ در بنین^۴ و توگو^۵ ارزیابی کردند.

براساس نتایج روش TOPSIS، شش مدل برتر انتخاب و به‌صورت میانگین در یک گروه، ترکیب شدند. دهقانی و همکاران (Dehghani et al., 2025) به بررسی داده‌های پیش‌بینی بارش در منطقه صباح و ساراواک، مالزی، تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP 585 با استفاده از سه مدل GCM پرداختند. نتایج نشان دادند که به‌طور کلی روند مثبتی در بارش پیش‌بینی شد. همچنین آن‌ها دریافتند که با افزایش مدت خشک‌سالی، شدت آن نیز افزایش می‌یابد.

ارزیابی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای شبیه‌سازی شرایط دما و بارش در حوضه قرنقو ضروری بوده و استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره (AHP) و نرم‌افزار Expert

¹ Krishna

² Symmetric Uncertainty

³ Mono River

⁴ Benin

⁵ Tongo

مدیریت منابع آب منطقه ایفا می‌کند. شکل ۱ موقعیت این حوضه آبریز را نشان می‌دهد.

این حوضه دارای هشت رودخانه اصلی است که بزرگ‌ترین آن‌ها، رودخانه قرقنو، میزبان سد چندمنظوره قرقنو می‌باشد. این سد با ظرفیت کلی ۱۶۵ میلیون مترمکعب، شامل ۱۳۵ میلیون مترمکعب حجم مفید و ۱۷ میلیون مترمکعب حجم مرده، به‌عنوان یکی از زیرساخت‌های کلیدی منطقه شناخته می‌شود.

آبدهی سالانه سد حدود ۱۴۹ میلیون مترمکعب برآورد شده که به تأمین نیازهای شرب، صنعت، کشاورزی و زیست‌محیطی اختصاص می‌یابد.

تقاضای آب در بخش شرب و صنعت هرکدام ۳ میلیون مترمکعب و در بخش زیست‌محیطی ۵ میلیون مترمکعب است.

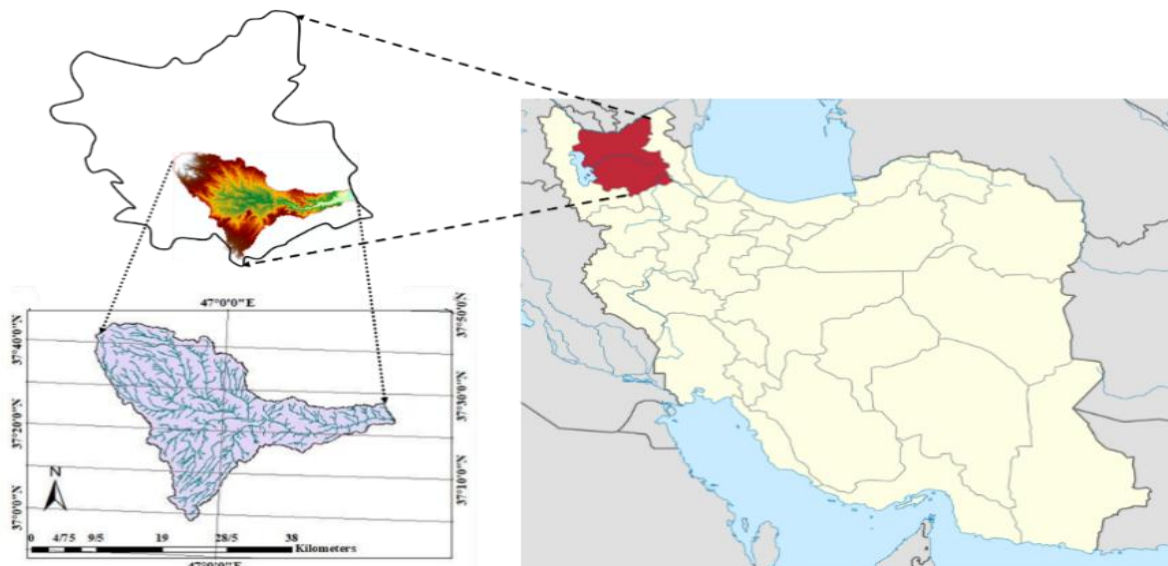
علاوه بر این، سطح زیر کشت در پایاب سد حدود ۱۴۵۰۰ هکتار است که نشان‌دهنده اهمیت این حوضه در تأمین آب کشاورزی منطقه است. حوضه قرقنو به‌دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه‌اش، تحت تأثیر الگوهای اقلیمی متنوعی قرار دارد که بر رژیم بارش و جریان آب تأثیر می‌گذارد. حفظ این منبع آبی و مدیریت پایدار آن، ضروری برای توسعه اقتصادی و اجتماعی منطقه محسوب می‌شود (Ashofteh, 2018).

برای وزن‌دهی به این شاخص‌ها، از روش AHP نرم‌افزار Expert Choice استفاده می‌شود که در آن نظرات کارشناسان حوزه اقلیم‌شناسی و مدیریت منابع آب به‌عنوان عاملی کلیدی در نظر گرفته خواهد شد. پس از تعیین وزن‌های نسبی هر معیار، عملکرد مدل‌ها با توجه به نمرات حاصل از ترکیب شاخص‌ها مقایسه می‌شود.

در نهایت، مدلی که بهترین عملکرد را براساس معیارهای انتخابی داشته باشد، به‌عنوان بهترین مدل انتخاب خواهد شد. این رویکرد نه تنها دقت ارزیابی را افزایش خواهد داد، بلکه به‌عنوان یک روش سازمان‌دهی‌شده برای انتخاب مدل‌های اقلیمی معرفی می‌شود و می‌تواند برای تولید پارامترهای اقلیمی دوره آینده نیز مورد استفاده قرار گیرد.

منطقه مورد مطالعه و معیارهای مدیریتی

حوضه آبریز قرقنو در دامنه‌های شرقی رشته‌کوه سهند، واقع در استان آذربایجان شرقی ایران است. محدوده این حوضه بین طول شرقی ۴۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۰ دقیقه و عرض شمالی ۳۶ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۵۰ دقیقه قرار دارد. یکی از زیرحوضه‌های مهم حوضه آبریز بزرگ خزر است که با وسعتی حدود ۳۵۹۰ کیلومتر مربع، نقش حیاتی در



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز قرقنو در شمال غرب ایران.

Fig 1. Geographical Location of The Qarnqu Watershed in The Northwest of Iran.

گزارش ششم ارزیابی

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های جهانی برجسته، همواره مورد توجه سازمان‌ها و نهادهای بین‌المللی قرار داشته است.

در این راستا، هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۱ (IPCC) که در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان ملل متحد و سازمان جهانی هواشناسی^۲ (WMO) تأسیس شد، نقش مهمی در ارزیابی علمی، فنی و اجتماعی-اقتصادی تغییرات اقلیمی ایفا کرده است.

این هیئت با انتشار گزارش‌های دوره‌ای، دیدگاه‌های جامعی از وضعیت فعلی تغییر اقلیم، علل آن و پیامدهای آن ارائه داده و راه‌کارهایی برای مقابله با این پدیده ارائه می‌کند.

گزارش ششم (AR6) IPCC آخرین و جامع‌ترین ارزیابی منتشرشده توسط این هیئت است که در سه بخش اصلی تنظیم شده است. هر بخش به‌وسیله یک کارگروه متخصص بررسی شده و شامل جنبه‌های مختلفی از تغییرات اقلیمی است.

کارگروه اول (WG1) با عنوان "پایه‌های علمی تغییر اقلیم"، به بررسی علوم فیزیکی و مشاهدات اقلیمی می‌پردازد و با استفاده از داده‌های تاریخی، شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی‌های آینده، علل و سازوکارهای تغییر اقلیم را تحلیل می‌کند.

کارگروه دوم (WG2) با عنوان "تأثیرات، سازگاری و آسیب‌پذیری"، پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی تغییر اقلیم را ارزیابی می‌کند و به بررسی ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم، تأثیرات آن بر بوم‌سازگان‌ها، منابع آب و جوامع مختلف و ارائه راهبردهای سازگاری می‌پردازد.

در نهایت، کارگروه سوم (WG3) با عنوان "کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای"، راه‌کارهای عملی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را بررسی می‌کند و به موضوعاتی مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه پایدار، اقتصاد کم‌کربن و نقش سیاست‌های بین‌المللی می‌پردازد (IPCC, 2001).

این سه کارگروه با همکاری متخصصان حوزه‌های مختلف، دیدگاه‌های جامعی از تغییر اقلیم و راه‌کارهای مقابله با آن ارائه می‌دهند که به‌عنوان مرجعی کلیدی برای تصمیم‌گیری‌های جهانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این گزارش هم‌چنین شامل یک گزارش ترکیبی است که یافته‌های کلیدی سه کارگروه را خلاصه کرده و به سیاست‌گذاران اطلاعات جامع و قابل‌استفاده‌ای ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، گزارش ششم به موضوعات خاصی مانند تأثیرات اقلیمی بر مناطق مختلف، نقش شهرها در کاهش تغییر اقلیم و اهمیت همکاری‌های بین‌المللی پرداخته است.

سناریوهای SSP

سناریوهای SSP در گزارش ششم IPCC به‌عنوان ابزاری برای درک تأثیرات مختلف سیاست‌ها و اقدامات انسانی بر تغییرات اقلیمی طراحی شده‌اند. در این گزارش از ترکیب سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) و مسیره‌های غلظت نماینده (RCP) برای ارزیابی آینده تغییرات اقلیمی استفاده شده است. این ترکیب به‌صورت SSP X-Y نمایش داده می‌شود که در آن X نشان‌دهنده مسیر اجتماعی-اقتصادی و Y بیان‌گر سطح غلظت گازهای گلخانه‌ای است.

در ادامه، به معرفی خلاصه‌ای از این سناریوها در جدول ۱ پرداخته می‌شود.

مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC

استفاده از مدل‌های گوناگون در گزارش ششم IPCC به‌دلیل تنوع در فرضیات، کاهش عدم قطعیت‌ها، و پوشش شرایط مختلف جغرافیایی و اقلیمی است. هر مدل با ساختار و روش‌های خاص خود، جنبه‌های متفاوت تغییر اقلیم را شبیه‌سازی می‌کند و خطاهای قاعده‌مند را تعدیل می‌کند. این رویکرد به محققان اجازه می‌دهد تا سناریوهای SSP متنوع را بررسی کرده و نیازهای سیاست‌گذاران را برآورده کنند.

هم‌چنین، استفاده از مدل‌های مختلف به اعتبارسنجی نتایج و ترکیب دانش‌های چندرشته‌ای کمک می‌کند و این تنوع، تصویر دقیق‌تری از آینده ارائه می‌دهد. در این

^۱ Intergovernmental Panel on Climate Change

^۲ Expert Team on Climate Change Detection and Indices

Copernicus استفاده شد. در این پژوهش از پارامتر دما برحسب کلوین و پارامتر بارش برحسب کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه استفاده شده است. همچنین در این تحقیق قبل از اینکه وزندهی اولیه انجام شود، متوسط بلندمدت (۳۰ ساله) ماهانه بارش و دما برای تمام مدل‌ها و داده‌های مشاهده‌ای تعیین می‌شود.

مطالعه از ۱۹ مدل اقلیمی گزارش ششم بدین‌منظور استفاده شده است.

جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه میانگین بلندمدت ماهانه تغییر اقلیم

برای به‌دست آوردن پارامترهای اقلیمی دما و بارش در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای تمامی مدل‌ها از پایگاه

جدول ۱. خلاصه‌ای از تحلیل ویژگی‌های هر سناریو.

Table 1. Summary of Analysis of The Characteristics of Each Scenario.

سناریو Scenario	عنوان Title	ویژگی‌های کلیدی Key Features	تأثیر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای Impact on greenhouse gas emissions
SSP1	Sustainable Development	Reducing inequality, the use of renewable energy, international cooperation, and the improvement of the quality of life	Significant reduction in emissions
SSP2	Middle Path	Continuation of the current path without significant changes, limited actions to reduce emissions, and gradual changes	Moderate emissions
SSP3	Regional Disparity	Limited international cooperation, increased inequality, and continued use of fossil fuels	Increased emissions
SSP4	Inequality	Uneven development, unequal access to technology, deep differences between regions and groups	Varied emissions
SSP5	Fossil Fuels	Rapid economic growth, heavy reliance on fossil fuels, and extensive use of natural resources	Significant increase in emissions

مشاهداتی دما و بارش استفاده شد (Ashofteh et al., 2013). این روش که بر پایه داده‌های مشاهداتی محلی توسعه یافته است، به محاسبه میانگین مقادیر دما و بارش در یک دوره پایه (به‌طور معمول ۳۰ ساله) مطابق با رابطه (۱) می‌پردازد و این میانگین‌ها به‌عنوان معیاری برای وزندهی مدل‌ها در نظر گرفته می‌شوند. در این رویکرد و برای هر ماه، مدل‌هایی که خروجی‌های نزدیک‌تری به میانگین بلندمدت ماهانه مشاهداتی دارند، وزن بیشتری دریافت می‌کنند.

این روش نه‌تنها به‌دلیل سادگی و قابلیت اجرا در مناطق مختلف، بلکه به‌دلیل تأکید بر داده‌های محلی، ابزاری قدرتمند برای ارزیابی عدم قطعیت‌ها و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها محسوب می‌شود.

جمع‌آوری داده‌ها و محاسبه میانگین بلندمدت ماهانه تغییر اقلیم

برای به‌دست آوردن پارامترهای اقلیمی دما و بارش در دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ برای تمامی مدل‌ها از پایگاه Copernicus استفاده شد. در این پژوهش از پارامتر دما برحسب کلوین و پارامتر بارش برحسب کیلوگرم بر متر مربع در ثانیه استفاده شده است. همچنین در این تحقیق قبل از اینکه وزندهی اولیه انجام شود، متوسط بلندمدت (۳۰ ساله) ماهانه بارش و دما برای تمام مدل‌ها و داده‌های مشاهده‌ای تعیین می‌شود.

وزندهی مدل‌های اقلیمی

در این مطالعه، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها و ترکیب نتایج آن‌ها، از روش وزندهی مبتنی بر میانگین

اهمیت نسبی معیارها یا گزینه‌ها را با دقت بیش‌تری تعیین کنند.

این مرحله بر پایه قضاوت‌های کارشناسان و متخصصان حوزه مربوطه استوار است و نقش کلیدی در دقت و اعتبار نتایج نهایی دارد، این فرآیند شامل مراحل زیر است:

(الف) جمع‌آوری نظرات کارشناسان

(ب) بررسی سازگاری قضاوت‌ها

- پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری^۱ (CR) محاسبه می‌شود.

- اگر CR کم‌تر از ۰/۱ باشد، قضاوت‌ها سازگار هستند. در غیر این صورت، کارشناسان باید مقایسه‌های خود را دوباره بررسی و اصلاح کنند. برای انجام مقایسات زوجی، کارشناسان از یک مقیاس عددی استفاده می‌کنند که از ۱ تا ۹ تعریف شده است. این مقیاس نشان‌دهنده اهمیت نسبی یک عنصر نسبت به عنصر دیگر است، در جدول ۲ مفهوم توصیفی از هر یک از اعداد آورده شده است.

بررسی نرخ ناسازگاری

این مرحله به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا اعتبار و دقت مقایسات زوجی انجام‌شده توسط کارشناسان را ارزیابی کنند. اگر نرخ ناسازگاری بیش از حد مجاز باشد، نشان‌دهنده وجود ناهماهنگی یا خطاهایی در قضاوت‌هاست که باید بررسی و اصلاح شود. مراحل محاسبه نرخ ناسازگاری در ادامه آورده شده است:

(الف) محاسبه بردار ویژه (λ_{max})

بردار ویژه (λ_{max}) یکی از اجزای اصلی در محاسبه نرخ ناسازگاری است. این مقدار از طریق ضرب ماتریس مقایسات زوجی در بردار وزن‌ها به دست می‌آید. فرمول کلی آن مطابق با رابطه (۲) است:

استفاده از این رویکرد در تحلیل‌های فعلی، امکان مقایسه دقیق‌تر بین مدل‌ها و ارائه نتایجی با قابلیت اعتماد بالاتر را فراهم می‌کند.

$$W_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{Dif_{x,i}}} \quad (1)$$

که در آن، $Def_{x,i}$ = انحراف میانگین بارش یا دما داده‌های هر یک از مدل‌ها در دوره پایه در ماه (x) از میانگین داده‌های مشاهداتی است. N تعداد مدل‌ها و W_i = وزن داده‌شده به هر یک از این مدل‌ها (i) می‌باشد.

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره به منظور مدیریت و ساختاردهی گسترده‌ای از اهداف و معیارها و پیچیدگی ذاتی مسائل همواره در مسیر برگزیدن تصمیمات و انتخاب‌های با کیفیت و همه‌جانبه مورد استفاده قرار گرفته است (Parviz et al., 2024). روش AHP یکی از روش‌های پرکاربرد در تصمیم‌گیری چندمعیاره است که توسط ساعتی (Saaty, 1990) معرفی شد.

این روش با استفاده از مقایسه‌های زوجی، امکان اولویت‌بندی معیارها و گزینه‌ها را فراهم می‌کند و به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا وزن هر معیار را براساس اهمیت آن تعیین کنند. AHP از طریق تجزیه مسئله به سطوح مختلف، از جمله اهداف، معیارها و گزینه‌ها، به تحلیل سامان‌دهی شده می‌پردازد. این روش قابلیت ترکیب داده‌های کیفی و کمی را دارد و از ماتریس‌های مقایسه زوجی برای محاسبه وزن‌ها استفاده می‌کند.

ناسازگاری در مقایسه‌ها نیز توسط AHP بررسی می‌شود که به افزایش اعتبار نتایج کمک می‌کند. این رویکرد به دلیل سادگی و انعطاف‌پذیری، در حوزه‌های مختلفی مانند مدیریت منابع، برنامه‌ریزی شهری و ارزیابی پروژه‌ها کاربرد فراوانی دارد.

مقایسه‌های زوجی

مقایسه‌های زوجی یکی از مراحل اصلی و اساسی در روش AHP است که به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا

¹ Consistency Ratio

جدول ۲. مفهوم توصیفی ارزش اعداد

Table 2. Descriptive Concept of Numbers' Value

توصیف Description	ارزش عددی Number's Value
ترجیح برابر Equal preference	1
ترجیح متوسط Moderate preference	3
ترجیح قوی Strong preference	5
ترجیح خیلی قوی Very strong preference	7
نهایت ترجیح بی Infinite preference	9
مقادیر بینابینی Intermediate values	2, 4, 6, 8

تحلیل حساسیت^۱

تحلیل حساسیت به بررسی تأثیر تغییرات در وزن معیارها بر نتایج نهایی می‌پردازد. این تحلیل به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا پایداری تصمیم‌گیری را ارزیابی کنند و بهترین گزینه را انتخاب نمایند. این تحلیل به کاربر کمک می‌کند تا پایداری و اعتبار نتایج را در شرایط مختلف ارزیابی کند. زمانی که وزن معیارها تحت تأثیر عوامل تصادفی قرار می‌گیرد، تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که آیا گزینه منتخب همچنان بهترین انتخاب خواهد بود یا خیر.

رویکرد مذکور، به‌ویژه در حوزه سازگاری با تغییر اقلیم، که پیچیدگی و عدم قطعیت بالایی دارد، بسیار کاربردی است. با شناسایی معیارهای حساس و بررسی تأثیر تغییرات آن‌ها، می‌توان نقاط ضعف مدل را شناسایی و رفع کرد.

همچنین، این تحلیل به تصمیم‌گیران اطمینان می‌دهد که انتخاب نهایی، مستقل از تغییرات جزئی در وزن‌دهی است. بنابراین، تحلیل حساسیت نه تنها اعتبار نتایج را تقویت می‌کند، بلکه به طراحی سیاست‌های انعطاف‌پذیر و مقاوم کمک می‌کند.

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i}}{n} \quad (۲)$$

(ب) محاسبه شاخص سازگاری (CI)

شاخص سازگاری (CI) نشان‌دهنده میزان انحراف از سازگاری در مقایسات زوجی است. این شاخص از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (۳)$$

(پ) محاسبه نرخ سازگاری (CR)

نرخ سازگاری (CR) از تقسیم شاخص سازگاری (CI) بر شاخص ناسازگاری تصادفی (RI) مطابق با رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (۴)$$

شاخص ناسازگاری تصادفی (RI) یک مقدار ثابت است که براساس تعداد عناصر مقایسه‌شده (n) تعیین می‌شود.

¹ Sensitivity Analysis

نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی به میانگین مقادیر مشاهده‌ای است.

شاخص‌های RMSE و MAE که توسط ویلموت و ماتسورا (Willmott and Matsuura, 2005) معرفی شدند، برای اندازه‌گیری‌های خطا هستند. RMSE به خطاهای بزرگ حساسیت بیشتری نشان می‌دهد، زیرا از مربع خطاها استفاده می‌کند. MAE اما به خطاهای بزرگ حساسیت کم‌تری نشان می‌دهد، زیرا از مقدار مطلق خطاها استفاده می‌کند. هر دو شاخص با واحد داده‌ها مطابقت دارند و هرچه مقدار آنها کوچک‌تر باشد، دقت مدل بالاتر است. روابط ریاضی آنها به صورت روابط (۷) و (۸) ارائه شده است:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2} \quad (7)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\bar{y}_i - x_i| \quad (8)$$

NRMSE توسط هایدمن و کوهرلر (Hydman and Koehler, 2006) معرفی شد، که به کمک شاخص RMSE نرمالایز می‌شود، بدین صورت که مطابق با رابطه (۹) RMSE به میانگین داده‌های مشاهده‌شده تقسیم می‌شود. این نرمالیزاسیون، مقایسه مدل‌ها را با مقیاس‌های متفاوت آسان‌تر می‌کند.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (9)$$

شاخص PBIAS توسط موریاسی و همکاران (Moriasi et al., 2007) معرفی شد، این شاخص مطابق با رابطه (۱۰) میزان اریبی یا انحراف سیستمی مدل را نشان می‌دهد. مقدار PBIAS نزدیک به صفر، نشان‌دهنده عدم‌اریبی است. مقدار مثبت به معنای تخمین پایین و مقدار منفی به معنای تخمین بالای مدل است.

$$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^N x_i} \right] \quad (10)$$

معیارهای آماری

ارزیابی مدل‌های پیش‌بینی، فرایندی حیاتی در علوم مختلف است که منجر به درک دقت و قابلیت اطمینان آنها می‌انجامد. شاخص‌های آماری، ابزارهای قدرتمندی برای این ارزیابی هستند. هر یک از شاخص‌های NSE، KGE، RMSE، MAE، NRMSE، PBIAS و r ، جنبه‌های متفاوتی از عملکرد مدل را روشن می‌کنند، و استفاده از ترکیبی از آنها دیدگاه جامعی ارائه می‌دهد.

شاخص NSE که توسط نش و ساتکلیف (Nash and Sutcliffe, 1970) معرفی شد، میزان تطابق کلی بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات را نشان می‌دهد. وقتی مقدار NSE نزدیک به ۱ است، نشان از دقت بسیار بالای مدل می‌دهد، در حالی که مقادیر کم‌تر از صفر، به معنای عملکرد ضعیف‌تر از یک پیش‌بینی ساده با استفاده از میانگین داده‌های مشاهده شده است. NSE در واقع، نسبت واریانس خطاها در مدل به واریانس داده‌های مشاهده شده است. فرمول این شاخص به صورت رابطه (۵) است:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

شاخص KGE که توسط گوپتا و همکاران (Gupta et al., 2009) توسعه داده شد، به صورت جامع‌تر سه جنبه‌ی کلیدی از عملکرد مدل را شامل همبستگی (رابطه‌ی خطی بین پیش‌بینی و مشاهده)، میانگین (میزان اریبی) و مقیاس (تناسب پراکندگی پیش‌بینی‌ها با پراکندگی مشاهدات) در نظر می‌گیرد. مقدار KGE نزدیک به ۱، نشان‌دهنده تطابق عالی است. مزیت KGE در تفکیک این سه مولفه است که درک دقیق‌تری از عملکرد مدل فراهم می‌کند. این شاخص به صورت رابطه (۶) است:

$$KGE = 1 - \sqrt{(CC - 1)^2 + (\sigma_f - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (6)$$

که در آن، CC = ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای، σ_f = نسبت انحراف معیار شبیه‌سازی به انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای، و γ =

برخی مدل‌ها مانند GFDL-ESM4 و MIROC6 در کل ماه‌های سال بارش‌های بیش‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت برخی از مدل‌ها مانند CMCC-ESM2 و FIO-ESM-2-0 عملکرد خوبی داشته‌اند و بارش‌های برآورد شده به‌طور تقریبی با داده‌های مشاهده‌شده هم‌خوانی داشتند و نیز برخی مدل‌ها مانند MRI-ESM2-0، FGOALS-F3-L و GFDL-ESM4 در برخی ماه‌ها بارش‌های بسیار بیش‌تری را نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند، این در حالی است که برخی مدل‌ها مانند INM-CM4-8 بارش‌های بسیار کم‌تری تخمین زده‌اند.

هم‌چنین با توجه به شکل ۲ (ب) قابل درک است که در ماه‌های زمستانی ژانویه و فوریه، دمای مشاهده‌شده به نسبت پایین است و بیش‌تر مدل‌ها نیز دمای پایینی را برآورد کرده‌اند. برخی مدل‌ها مانند CMCC-ESM2 و MRI-ESM2-0 در این ماه‌ها، دمای کم‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند. در ماه‌های بهاری آوریل و می، دمای مشاهده‌شده افزایش می‌یابد و بیش‌تر مدل‌ها نیز این روند را نشان می‌دهند. برخی مدل‌ها مانند MIROC6 و INM-CM5-0 دمای بیش‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند. در ماه‌های تابستانی ژولای و آگوست، دمای مشاهده‌شده بیشینه می‌شود و بیش‌تر مدل‌ها نیز این روند را نشان می‌دهند. در این ماه‌ها برخی مدل‌ها مانند GFDL-ESM4 و ACCESS-CM2 دمای کم‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند. در ماه‌های پربارش (اکتبر و نوامبر)، دمای مشاهده‌شده روند کاهشی را دارد و بیش‌تر مدل‌ها نیز این روند را نشان می‌دهند. برخی مدل‌ها مانند MIROC6 و FGOALS-G3 دمای بیش‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند. در ماه انتهایی فصل پاییز (دسامبر) به‌غیر از مدل‌های MIROC6 و FGOALS-G3 مابقی مدل‌ها دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. به‌صورت خلاصه می‌توان گفت برخی مدل‌ها مانند MRI-ESM2-0 و AWI-CM1-1-MR عملکرد خوبی داشته‌اند و دمای برآورد شده به‌طور تقریبی با داده‌های مشاهده‌شده هم‌خوانی دارند.

ضریب همبستگی r مطابق با رابطه (۱۱) میزان همبستگی خطی بین پیش‌بینی‌ها و مشاهدات را اندازه‌گیری می‌کند. این شاخص توسط پیرسون (Pearson, 1895) برای اولین بار معرفی شد و مقدارش بین ۱ و -۱ است. ۱ نشان‌دهنده همبستگی مثبت کامل و -۱ نشان‌دهنده همبستگی منفی کامل است. مقدار صفر به‌معنای عدم همبستگی است.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (11)$$

نتایج و بحث

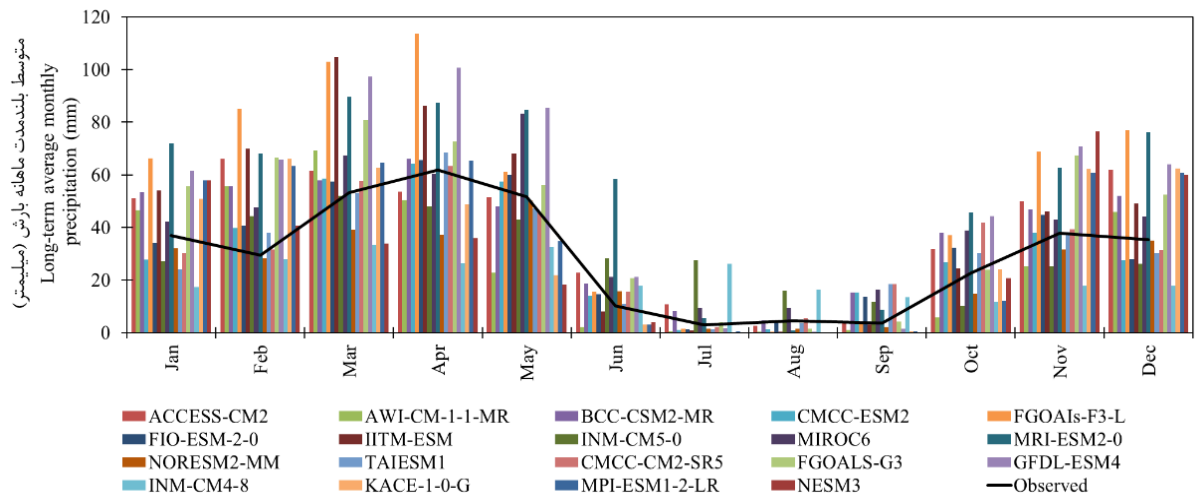
نتایج مدل‌سازی متغیرهای اقلیمی

متوسط بلندمدت ماهانه دما و بارش شبیه‌سازی‌شده توسط ۱۹ مدل اقلیمی از گزارش ششم در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ محاسبه و با مقادیر متناظر دوره مشاهداتی ایستگاه سینوپتیک میانه مقایسه شدند. نتایج مربوطه در شکل ۲ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۲ (الف) در ماه‌های مارس و آوریل و می (ماه‌های پایانی فصل زمستان و ماه‌های ابتدایی فصل بهار)، بارش‌های مشاهده‌شده به نسبت سایر ماه‌ها مقادیر بالاتری دارند و بیش‌تر مدل‌ها نیز بارش‌های قابل قبولی را برآورد کرده‌اند. برخی مدل‌ها مانند CMCC-ESM2 و MRI-ESM2-0 بارش‌های بیش‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند و در ماه‌های پربارش آوریل و می، به نسبت سایر ماه‌ها با مقایسه با مقادیر مشاهده‌شده تخمین درست‌تری داشته است. برخی مدل‌ها مانند FGOALS-F3-L و KACE-1-0-G بارش‌های کم‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده در فصل بهار که ماه‌های پربارش کشور است، برآورد کرده‌اند. این در حالی است که در فصل پاییز همین مدل‌ها بارش‌های بیش‌تری را نسبت به داده‌های مشاهده‌شده، شبیه‌سازی می‌نمایند. در ماه‌های تابستانی، بارش‌های مشاهده‌شده کمینه می‌شوند و بیش‌تر مدل‌ها نیز این روند را نشان می‌دهند. برخی مدل‌ها مانند INM-CM4-8 و MPI-ESM1-2-LR بارش‌های کم‌تری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده، در کل ماه‌های سال (به‌غیر از ماه‌های تابستان) برآورد کرده‌اند.

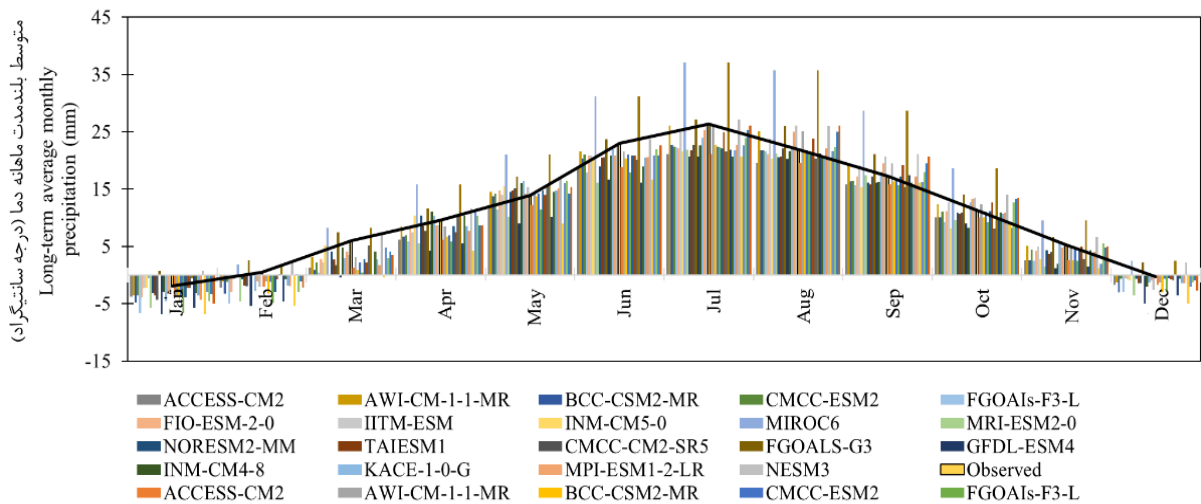
و NSE، استفاده شده است.

در ادامه به منظور بررسی عملکرد مدل‌های اقلیمی، معیارهای MAE, KGE, PBIAS, NRMSE, RMSE و



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۲. مقایسه میانگین بلندمدت ماهانه (الف) بارش و (ب) دمای حاصل از مدل‌سازی و مقادیر متناظر مشاهداتی.

Fig 2. Comparison of The Long-Term Monthly Average of (a) Precipitation and (b) Temperature Obtained From Modeling and Corresponding Observational Values.

یک بوده است و ضریب همبستگی بالا است که نشان‌دهنده عمل خوب مدل‌ها در شبیه‌سازی دما دارد، این در حالی است که برای متغیر بارش، تنها سه مدل CMCC-ESM2، FIO-ESM-2-0 و TAIESM1 شاخص NSE بیش‌تر از ۰/۸۵ است. برای این شاخص مقادیر منفی و نزدیک به صفر برای متغیر بارش وجود دارد، در حالی که برای متغیر دما وجود ندارد. برای مدل MIROC6

نتایج سنجش عملکرد مدل‌های اقلیمی

در این بخش، هریک از شاخص‌های آماری برای همه مدل‌های گزارش ششم اقلیمی محاسبه شد. بدین ترتیب که متوسط بلندمدت ماهانه بارش و دما محاسبه شد و نتیجه به این صورت حاصل شد که عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیر دما بهتر از بارش بوده است، به طوری که به‌عنوان مثال شاخص NSE برای بیش‌تر مدل‌ها نزدیک به

می‌تواند با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره صورت گیرد.

نتایج وزن‌دهی مدل‌ها به تفکیک ماه

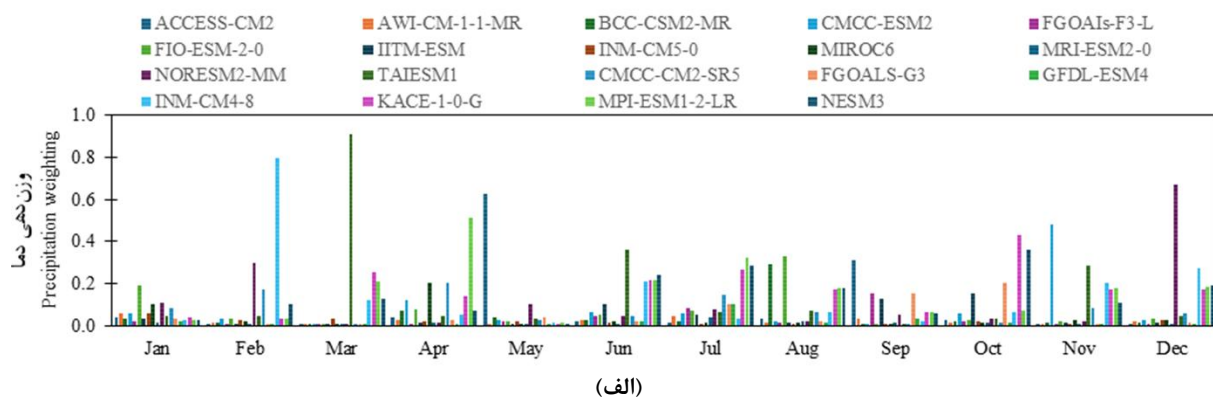
مقایسه میانگین بلندمدت دما و بارش مشاهده‌شده و خروجی مدل‌ها در شکل ۲ نشان می‌دهد که هرچند برخی مدل‌ها عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی متغیر اقلیمی در ماه یا فصل خاصی دارد، اما برای سایر ماه‌ها و فصل‌ها از مطلوبیت برخوردار نیستند.

برای بهبود تحلیل و مقایسه، لازم است هریک از مدل‌ها براساس روش وزن‌دهی مبتنی بر میانگین مشاهداتی دما و بارش (رابطه (۱))، وزن‌دهی شوند. مقادیر وزن‌دهی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم برای مقادیر بارش و دما به ترتیب در شکل ۳ (الف) و ۳ (ب)، ارائه شده است.

شبیه‌سازی متغیر دما با اینکه ضریب همبستگی ۹۹/۱ درصد است، NSE مقدار ضعیف ۰/۳۳ را نشان می‌دهد. این در حالی است که برای مدل BCC-CSM2-MR با همان ضریب همبستگی ۹۹/۱ درصد، NSE مقدار خوب ۰/۹۱ (نزدیک به یک) را دارا است.

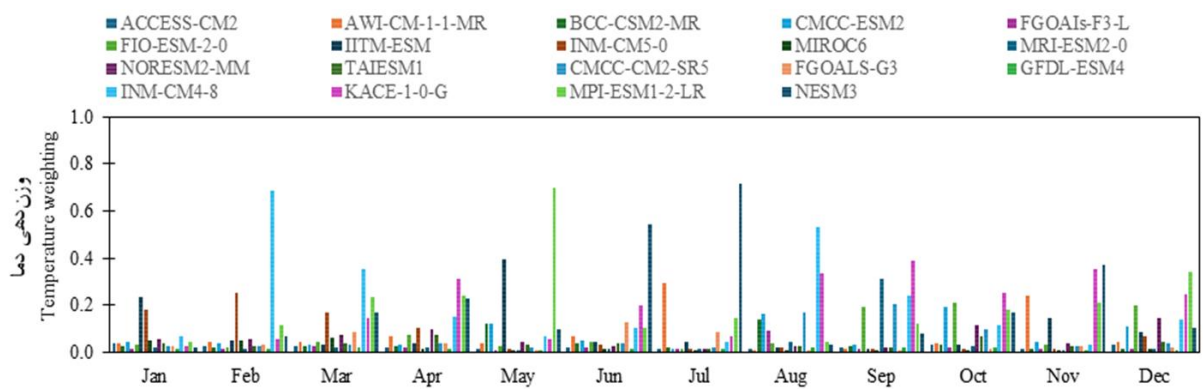
در شبیه‌سازی متغیر بارش با مدل GFDL-ESM4 با اینکه بالاترین و بهترین ضریب همبستگی (۹۸/۴) را دارا است، اما NSE مقدار منفی را دارد و RMSE به نسبت سایر مدل‌ها مقدار بالایی دارد که نشان‌دهنده عملکرد ضعیف این مدل در شبیه‌سازی متغیر بارش را دارد.

با توجه به اینکه هرکدام از مدل‌ها از نظر هر معیار بهترین است و معیارها نسبت به هم مستقل هستند، و عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی هرکدام از متغیرهای اقلیمی دما و بارش، متفاوت هستند، انتخاب بهترین مدل



(الف)

(a)



(ب)

(b)

شکل ۳. وزن‌دهی مدل‌ها در شبیه‌سازی (الف) بارش و (ب) دما به تفکیک هر ماه.

Fig 3. Weighting of Models In Simulating (a) Precipitation and (b) Temperature By Month.

نتایج AHP

در تحقیق حاضر انتخاب بهترین مدل از بین ۱۹ مدل برای شبیه‌سازی هر دو متغیر دما و بارش مد نظر است. این انتخاب با توجه به هفت معیار اصلی که به‌عنوان شاخص‌های آماری معرفی شده‌اند، انجام می‌گیرد.

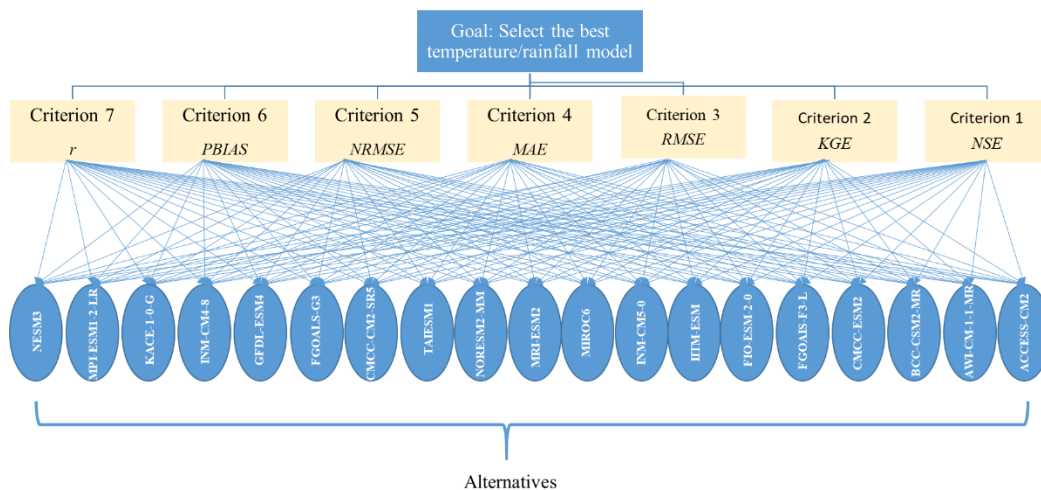
روند و ساختار سلسله مراتبی براساس هدف و معیارها و گزینه‌ها برای هر دو متغیر بارش و دما در شکل ۴ آورده شده است. با تکمیل شدن ساختار سلسله مراتبی در این مرحله مقایسه زوجی بین معیارها انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از وزن‌های تلفیقی به‌دست‌آمده برای معیارها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

نتایج حاصله از مقایسه زوجی معیارها در نرم‌افزار Expert Choice نشان‌دهنده این است که معیار NSE اثرگذارترین و مؤثرترین معیار در تصمیم‌گیری کارشناسان می‌باشد. طبق نظرسنجی سه معیار MAE، NRMSE و RMSE از نظر کارشناسان دارای ارزش یکسانی بوده و امتیازی یکسان را برای آنها در نظر گرفته شده است.

با توجه به این‌که اختلاف در وزن‌ها می‌تواند منجر به تغییرات قابل توجه در نتایج شود، بنابراین دقت در تعیین وزن‌ها با استفاده از مقایسات زوجی دقیق، برای حصول نتیجه‌ای معتبر مهم است.

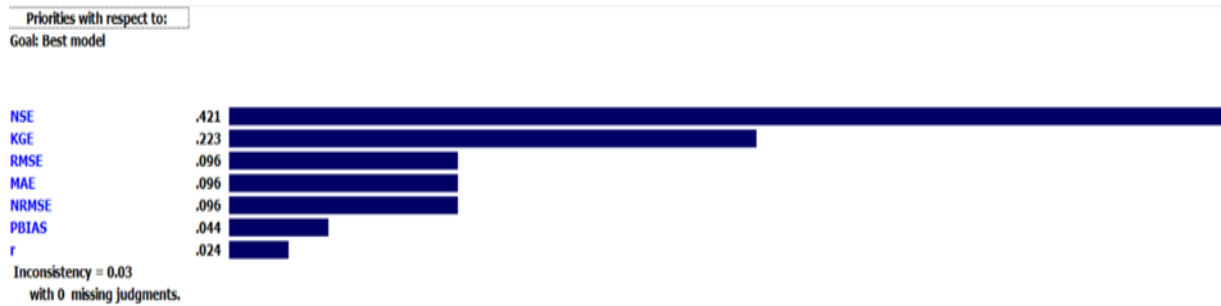
به‌طور کلی از شکل ۳ (الف) می‌توان نتیجه گرفت، مدل IM-CM4-8 و NORESM2-MM نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌ترین وزن را برای بارش به خود اختصاص داده‌اند. همچنین مدل‌های IITM-ESM و FGOALS-F3-L، کم‌ترین وزن را برای بارش اختیار کرده‌اند. بنابراین مدل‌های IM-CM4-8 و NORESM2-MM می‌توانند بیش‌ترین و مدل‌های IITM-ESM و FGOALS-F3-L کم‌ترین تأثیر را بر بارش و در نهایت بر رواناب منطقه طرح داشته باشند.

هم‌چنین شکل ۳ (ب) نشان می‌دهد که مدل‌های NESM3 و MPI-ESM1-2-LR بیش‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی متغیر دما دارد و مدل‌های GFDL-ESM4 و MIROC6 کم‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی این متغیر دارد. هم‌چنین بررسی‌های بیشتر برای متغیر بارش نشان می‌دهد که برای فصول بهار و تابستان مدل MPI-ESM1-2-LR بالاترین وزنی را داشته است و برای پاییز مدل KACE-1-0-G و برای زمستان مدل TALESM1 بیش‌ترین وزن را دارا است. برای متغیر دما نیز بررسی‌ها نشان می‌دهند که برای فصول بهار تا زمستان، به‌ترتیب مدل‌های MPI-ESM1-2-LR، NESM3، KACE-1-0-G و INM-CM4-8 بالاترین وزن را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۴. روند و ساختار سلسله مراتبی براساس هدف و معیارها و گزینه‌ها برای متغیر بارش و دما.

Fig 4. Process and hierarchical structure based on goal, criteria, and options for precipitation variable and temperature.



شکل ۵. مقایسه زوجی معیارها.

Fig 5. Pairwise Comparison of Criteria.

برگزیده بارش انتخاب شدند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب این مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش می‌باشد. مدل‌های AWI-CM-1-1-MR از لحاظ دو معیار (RMSE و MAE) و مدل MPI-ESM1-2-LR نیز از لحاظ دو معیار (NSE و NRMSE) به‌عنوان مدل برگزیده دما انتخاب شده است.

در دنیای پیچیده تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، انتخاب بهترین گزینه به‌سادگی مقایسه اعداد نیست. نرم‌افزار Expert Choice با رویکرد سلسله‌مراتبی خود، امکان بررسی دقیق و منسجم همه معیارها را فراهم می‌کند. در جدول ۷ بهترین گزینه با توجه به همه معیارها به‌ترتیب برای شبیه‌سازی بارش و دما، ارائه شده است.

نرخ ناسازگاری زمانی مناسب است که مقدارش کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، بنابراین با توجه به این‌که مقدار نرخ ناسازگاری در مقایسه زوجی معیارها ۰/۰۳ است، بنابراین سازگاری مناسبی بین قضاوت‌های کارشناسان حاکم است.

در ادامه، مقایسه زوجی یا دو به دوی مدل‌ها نسبت به هر شاخص طبق نظر متخصصین انجام گرفت.

با تمرکز بر هر معیار، مدل برگزیده برای بارش و دما با توجه به وزندهی‌هایی که کارشناسان انجام دادند، یکسان نمی‌باشد. هم‌چنین در میان هفت معیار مدنظر مدل از لحاظ سه معیار (NSE، RMSE و NRMSE)، به‌عنوان مدل

جدول ۳. اولویت‌بندی مدل‌ها نسبت به همه معیارها با هم برای شبیه‌سازی (الف) بارش و (ب) دما.

Table 3. Prioritization of Models Concerning All Criteria for Simulating (a) Precipitation and (b) Temperature.

مدل برتر دما به‌ترتیب	مدل برتر بارش به‌ترتیب
The best temperature model, in order	The best precipitation model, in order
MPI-ESM1-2-LR, AWI-CM-1-1-MR, IITM-ESM, KACE-1-0-G, CMCC-ESM2, INM-CM4-8, FIO-ESM-2-0, NORESM2-MM, CMCC-CM2-SR5, INM-CM5-0, NESM3, TAIESM1, FGOALS-G3, BCC-CSM2-MR, ACCESS-CM2, FGOAIS-F3-L, MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4, MIROC6	CMCC-ESM2, TAIESM1, FIO-ESM-2-0, CMCC-CM2-SR5, NORESM2-MM, BCC-CSM2-MR, INM-CM5-0, MIROC6, AWI-CM-1-1-MR, ACCESS-CM2, MPI-ESM1-2-LR, FGOALS-G3, KACE-1-0-G, NESM3, INM-CM4-8, IITM-ESM, GFDL-ESM4, FGOAIS-F3-L, MRI-ESM2-0

مدل‌هایی که نسبت به کل ۱۹ مدل دارای بیش‌ترین حساسیت هستند در جدول ۴ و ۵ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۳ با در نظر گرفتن تمامی معیارها، بهترین مدل برای تولید داده‌های آتی بارش مدل CMCC-ESM2 و بهترین مدل برای تولید داده‌های آتی دما مدل MPI-ESM1-2-LR می‌باشد. در این گام تحلیل حساسیت برای هر مدل نسبت به هر معیار با هدف یافتن بهترین مدل برای بارش و دما انجام شد.

جدول ۴. تغییرات عدد حساسیت مدل با بیش‌ترین حساسیت نسبت به هر معیار (مربوط به بارش).

Table 4. Changes in The Sensitivity Number of The Model With The Highest Sensitivity To Each Criterion (Related To Precipitation).

مدل Model	NSE (Dimensionless)	KGE (Dimensionless)	RMSE (mm)	MAE (mm)	NRMSE (Dimensionless)	PBIAS (%)	r (%)
CMCC-ESM2	0.47*	0.46	0.53*	0.48	0.49*	0.34	0.33
FIO-ESM-2-0	0.44	0.30	0.47	0.34	0.44	0.20	0.74*
INM-CM5-0	0.19	0.15	0.18	0.13	0.20	0.46*	0.05
TAIESM1	0.42	0.59*	0.41	0.54*	0.42	0.40	0.21

جدول ۵. تغییرات عدد حساسیت مدل با بیش‌ترین حساسیت نسبت به هر معیار (مربوط به دما).

Table 5. Changes in The Sensitivity Number of The Model With The Highest Sensitivity To Each Criterion (Related to Temperature).

مدل Model	NSE (Dimensionless)	KGE (Dimensionless)	RMSE (mm)	MAE (mm)	NRMSE (Dimensionless)	PBIAS (%)	r (%)
AWI-CM-1-1-MR	0.55*	0.40	0.72*	0.70*	0.50	0.68	0.50
IITM-ESM	0.46	0.71*	0.59	0.70*	0.44	0.47	0.12
FGOALS-G3	0.17	0.12	0.11	0.11	0.18	0.12	0.62*
MPI-ESM1-2-LR	0.56*	0.66	0.68	0.49	0.55*	0.56	0.64*
NESM3	0.26	0.14	0.22	0.13	0.28	0.72*	0.23

حساسیت ۰/۶۴ حساسیت بسیار زیادی نسبت به معیار همبستگی (r) دارند. به‌طور اجمالی می‌توان گفت با توجه به نتایج حاصل از جدول تغییرات عدد حساسیت هر مدل نسبت به هر معیار (مربوط به بارش) مدل CMCC-ESM2 و با توجه به نتایج حاصل از جدول تغییرات عدد حساسیت هر مدل نسبت به هر معیار (مربوط به دما) مدل AWI-1-1-MR و CM-1-1-MR بیش‌ترین حساسیت را نسبت به معیارها دارند.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، متوسط بلندمدت ماهانه دما و بارش شبیه‌سازی‌شده توسط ۱۹ مدل اقلیمی از گزارش ششم در دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ برای حوضه فرنگو محاسبه و با مقادیر متناظر دوره مشاهداتی مقایسه شدند. به‌طور کلی می‌توان گفت برخی از مدل‌ها مانند CMCC-ESM2 و FIO-ESM-2-0 عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی بارش داشته‌اند و بارش‌های برآورد شده به‌طور تقریبی با داده‌های

در جداول ۴ و ۵ مدلهایی که دارای بیش‌ترین عدد حساسیت نسبت به معیارها در مقایسه با سایر گزینه‌ها هستند با علامت ستاره نشان داده شدند.

در جدول ۴ که نشان‌دهنده تغییرات عدد حساسیت حساس‌ترین مدل‌ها نسبت به هر معیار (مربوط به بارش) است، مدل CMCC-ESM2 با حساسیت ۰/۴۷ بالاترین حساسیت را نسبت به معیار NSE دارند.

مدل CMCC-ESM2 با حساسیت ۰/۵۳ در تخمین RMSE بسیار حساس است. همچنین، مدل CMCC-ESM2 با حساسیت ۰/۴۹ بالاترین حساسیت را در تخمین NRMSE دارا است. در جدول ۵ که نشان‌دهنده تغییرات عدد حساسیت حساس‌ترین مدل‌ها نسبت به هر معیار (مربوط به دما) است، مدل‌های MPI-ESM1-2-LR با حساسیت ۰/۵۶ بیان‌گر این است که عملکرد این مدل‌ها نسبت به معیار NSE حساس است. مدل MPI-ESM1-2-LR با حساسیت ۰/۵۵ بالاترین حساسیت را در تخمین NRMSE دارا است. مدل MPI-ESM1-2-LR با

طرح داشته باشند. هم‌چنین مدل‌های NESM3 و MPI-ESM1-2-LR بیش‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی متغیر دما دارد و مدل‌های GFDL-ESM4 و MIROC6 کم‌ترین وزن را برای شبیه‌سازی این متغیر دارد.

در تحقیق حاضر انتخاب بهترین مدل از بین ۱۹ مدل برای شبیه‌سازی هر دو متغیر دما و بارش مد نظر است. این انتخاب با توجه به هفت معیار اصلی که به‌عنوان شاخص‌های آماری معرفی شده‌اند، انجام می‌گیرد.

نتایج حاصله از مقایسه زوجی معیارها در نرم‌افزار Expert Choice نشان‌دهنده این است که معیار NSE اثرگذارترین و مؤثرترین معیار در تصمیم‌گیری کارشناسان می‌باشد. در میان هفت معیار مدنظر مدل CMCC-ESM2 از لحاظ سه معیار (NSE، RMSE و NRMSE)، مدل برگزیده بارش انتخاب شده است که نشان‌دهنده عملکرد مناسب این مدل در شبیه‌سازی بارش می‌باشد.

مدل‌های AWI-CM-1-1-MR از لحاظ دو معیار (RMSE و MAE) و مدل MPI-ESM1-2-LR نیز از لحاظ دو معیار (NSE و NRMSE) به‌عنوان مدل برگزیده دما انتخاب شده است. با در نظر گرفتن تمامی معیارها، بهترین مدل برای تولید داده‌های آبی بارش مدل CMCC-ESM2 و بهترین مدل برای تولید داده‌های آبی دما مدل MPI-ESM1-2-LR می‌باشد.

با توجه به این امر که دما یک متغیر پایدارتر و با تغییرات آهسته‌تر است، مدل‌ها به‌طور معمول قادر هستند آن را با دقت بالاتری شبیه‌سازی کنند. همان‌طور که نتایج نشان دادند عملکرد مدل‌ها در شبیه‌سازی متغیر دما بهتر از بارش بوده است، که با نتایج خیاط و همکاران (Khayat et al., 2020)، صمدی و همکاران (Samadi et al., 2009)، المزره‌ئی و همکاران (Almazroui et al., 2021)، فرزانه و همکاران (Farzaneh et al., 2010) و رضانی اعتدالی و کوهی (Ramezani Etedali and Khoohi, 2024) مطابقت دارد.

علاوه بر این، عدم قطعیت‌های موجود در پارامترسازی فرآیندهای بارش، به‌ویژه در مناطق با توپوگرافی پیچیده مانند حوضه قرنقو، می‌تواند دقت شبیه‌سازی بارش را کاهش دهد. بنابراین، مدل‌هایی که توانایی بهتری در

مشاهده‌شده هم‌خوانی داشتند و نیز برخی مدل‌ها مانند GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0، FGOALS-F3-L برخی ماه‌ها بارش‌های بسیار بیش‌تری را نسبت به داده‌های مشاهده‌شده برآورد کرده‌اند، این در حالی است که برخی مدل‌ها مانند INM-CM4-8 بارش‌های بسیار کم‌تری تخمین زده‌اند. هم‌چنین، برخی مدل‌ها مانند MRI-ESM1-2-LR و AWI-CM-1-1-MR عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی دما داشته‌اند و دمای برآورد شده به‌طور تقریبی با داده‌های مشاهده‌شده هم‌خوانی دارند.

در ادامه به‌منظور بررسی عملکرد مدل‌های اقلیمی، از معیارهای r ، RMSE، NRMSE، PBIAS، KGE، MAE، NSE و استفاده شده است. هر یک از شاخص‌های آماری برای همه مدل‌های گزارش ششم اقلیمی محاسبه شد. نتایج این‌گونه است که به‌عنوان مثال شاخص NSE برای بیش‌تر مدل‌ها نزدیک به یک بوده است و ضریب همبستگی بالا است که نشان‌دهنده عمل خوب مدل‌ها در شبیه‌سازی دما دارد، این در حالی است که برای متغیر بارش، تنها سه مدل CMCC-ESM2، FIO-ESM-2-0 و TAIESM1 شاخص NSE بیش‌تر از ۰/۸۵ است. برای این شاخص مقادیر منفی و نزدیک به صفر برای متغیر بارش وجود دارد، در حالی که برای متغیر دما وجود ندارد.

مقایسه میانگین بلندمدت دما و بارش مشاهده‌شده و خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد که هرچند برخی مدل‌ها عملکرد خوبی برای شبیه‌سازی متغیر اقلیمی در ماه یا فصل خاصی دارد، اما برای سایر ماه‌ها و فصل‌ها از مطلوبیت برخوردار نیستند. برای بهبود تحلیل و مقایسه، لازم است هر یک از مدل‌ها براساس روش وزن‌دهی مبتنی بر میانگین مشاهداتی دما و بارش، وزن‌دهی شوند.

مقادیر وزن‌دهی مدل‌های اقلیمی گزارش ششم برای مقادیر بارش و دما نشان دادند که مدل INM-CM4-8 و NORESM2-MM نسبت به سایر مدل‌ها بیش‌ترین وزن را برای بارش به خود اختصاص داده‌اند.

هم‌چنین مدل‌های IITM-ESM و FGOALS-F3-L کم‌ترین وزن را برای بارش اختیار کرده‌اند. بنابراین مدل‌های INM-CM4-8 و NORESM2-MM می‌توانند بیش‌ترین و مدل‌های IITM-ESM و FGOALS-F3-L کم‌ترین تأثیر را بر بارش و در نهایت بر رواناب منطقه

<https://doi.org/10.30488/CCR.2022.361233.1093>.

Bayissa, Y., Melesse, A., Bhat, M., Tadesse, T. & Shiferaw, A. (2021). Evaluation of regional climate models (RCMs) using precipitation and temperature-based climatic indices: (A case study of Florida, USA), *Water*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/w13172411>.

Dehghani, A., Mortazavi, F., Dehghani, A., Rahmat, M. B., Galavi, H., Bolonio, D., Ng, J. L., Rezaverdinejad, V., & Mirzaei, M. (2025). Multi-model assessment of climate change impacts on drought characteristics. *Natural Hazards*, 121(5), 6069–6084. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07015-z>.

Farzaneh, M. R., Samadi, S. Z., Akbarpour, A. & Eslamian, S. S. (2010). *Introducing selected predictors for statistical-regression downscaling in the Behesht Abad sub-basin of North Karun*, 1st Iranian National Conference on Applied Research in Water Resources. 11 May 2010. Kermanshah, Kermanshah University of Technology. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/112792>.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: (Implications for improving hydrological modelling). *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

Houngue, 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. *Journal of Atmosphere*, 13(9), 1471. <https://doi.org/10.3390/atmos13091471>.

Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>.

Helmi, M., Neyshabouri, S. Z., Amirabadizadeh, M. & Yaghoobzadeh, M. (2024). Evaluation of SDSM, LARS-WG, and ANN methods in downscaling of temperature and precipitation for two different climates. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 1(4), 105–118. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/JDCR.2023.6996.1049>.

پارامترسازی فرآیندهای بارش دارند، به‌طور معمول عملکرد مناسب‌تری نشان می‌دهند.

یعقوب‌زاده (Yaghoobzadeh, 2022) در پژوهش خود نشان داد که استفاده از دوره‌های طولانی‌تر تاریخی، مانند بازه ۱۹۶۰ تا ۱۹۹۰، برای شبیه‌سازی متغیر بارش منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود. این یافته با نتایج تحقیق حاضر هم‌خوانی دارد.

منابع

Anil, S., & Raj P. A. (2022). Deciphering the projected changes in CMIP-6-based precipitation simulations over the Krishna River Basin. *Journal of Water & Climate Change*, 13(3), 1389–1407. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.399>.

Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Adnan Abid, M., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensen, A. A., Arias, P. A., Alves, L. M., Tippett, M. K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F. J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J. A., Ehsan, M. A., Martínez-Castro, D., Muñoz, Á. G., Coppola, E., & Bamba Sylla, M. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America, *Earth Systems and Environment*, 5, 155–183. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

Ashofteh, P.-S., Bozorg-Haddad, O. & Mariño, M. (2013). Climate change impact on reservoir performance indexes in agricultural water supply. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(2), 85–97. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000496](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000496).

Ashofteh, P.-S. (2018). Evaluation of the flexibility of the reservoir system in terms of climate change in the optimal supply of water. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 49(2), 269–279. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2017.226689.66762>.

Abdolizadeh, F., Khorshiddoust, A. M. & Jahanbakhsh, S. (2021). Assessment of the performance of the CMIP6 model for the analysis of temperature and precipitation in the Urmia Lake basin. *Journal of Climate Change Research*, 3(11), 17–30. [In Persian].

- Kim, Y.-H., Min, S.-K., Zhang, X., Sillmann, J. & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100269. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100269>.
- Kjellström, E., Boberg, F., Castro, M. & Christensen, J. H. (2010). Daily and monthly temperature and precipitation statistics as performance indicators for regional climate models. *Climate Research*, 44(2-3), 135-150. <https://doi.org/10.3354/cr00932>.
- Khayat, A., Amirabadizadeh, M., Pourreza-Bilondi, M. & Khozaymehnehad, H. (2020). Study temperature and precipitation parameters under the effect of climate change (Case study: Birjand Plain). *Journal of Irrigation and Water Engineering*, 11(1), 200–210. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/iwe.2020.114963>.
- Mirzaei, M., Shirmohammadi, A., Ruiz-Barradas, A., Olson, L. J., & Negahban-Azar, M. (2025). Climate change effects on the spatial and temporal distribution of extreme precipitation in the Mid-Atlantic region. *Urban Climate*, 61, 102382. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102382>.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, Part I—A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
- Parviz, L., Kazemi, B., & Hatef, M. A. (2024). Utilization of the climate indices and the multi-criteria decision-making approach in crop yield forecasting in line with policy-making in agriculture. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2(3), 49–66. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7942.1072>.
- Pradhan, P., Shhrestha, S., Sundram, S.M.M. & Virdis, S. (2021). Evaluation of the CMPI5 general circulation models for simulating the precipitation and temperature of the Koshi River basin in Nepal. *Journal of Water and Climate Change*, 12(1). <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.124>.
- Legg, S. (2021). IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. *Interaction*, 49(4), 44–45.
- Pearson, K. (1895). VII. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *proceedings of the royal society of London*, 58(347-352), 240–242. <https://doi.org/10.1098/rsp1.1895.0041>.
- Ramezani Etedali, H., & Koohi, S. (2024). Investigating the impact of climate change on the aridity in Iran with a population exposure approach. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, In Press. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9-26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I).
- Samadi, S. Z., Massah Bavani, A. R. & Mahdavi, M. (2009). *Selecting a predictor variable for statistical downscaling of temperature and precipitation data in the Karkheh watershed*, Fifth National Conference on Watershed Management Science and Engineering of Iran. 11-12 May 2010. Golestan, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. [In Persian]. <https://civilica.com/doc/87064>
- Weyant, J. (2017). Some contributions of integrated assessment models of global climate change. *Review of Environmental Economics and Policy*, 11(1), 115-137. <https://doi.org/10.1093/reep/rew018>.
- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>.
- Yaghoobzadeh, M. (2022). Selecting the best general circulation model and historical period to determine the effects of climate change on precipitation, *IDŐJÁRÁS/Quarterly journal of the Hungarian meteorological service*, 126(2): 247-265. <https://doi.org/10.28974/idojaras.2022.2.5>.



Using Machine Learning to Improve Precipitation Estimation by ERA5 Data at Meteorological Stations in West Azerbaijan Province

Moslem Mohammadi^{1,*} 

1. Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Engineering Faculty, Payame Noor University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: mo_mohammadi@pnu.ac.ir

Keywords:

Precipitation estimation; ERA5 reanalysis; Machine learning; Artificial neural networks; Support vector regression; Shepard interpolation; West Azerbaijan Province.

Introduction

Precipitation is one of the most critical components of the hydrological cycle, directly influencing water resources, agriculture, and climate-related risk management. Accurate precipitation estimation is essential for hydrological modeling, flood forecasting, drought monitoring, and agricultural planning. In mountainous and data-scarce regions, however, reliable precipitation information is difficult to obtain due to the limited density of ground-based meteorological stations and the inherent uncertainties of remote sensing products. In recent years, reanalysis datasets such as ERA5, produced by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), have provided long-term, globally consistent climate variables. Despite their advantages, these datasets often suffer from systematic biases, particularly in regions with complex topography, such as West Azerbaijan Province in northwestern Iran. Machine learning (ML) methods, capable of capturing nonlinear and multivariate relationships, have emerged as effective tools for improving precipitation estimation by integrating satellite or reanalysis data with ground observations. The objective of this study was to assess the potential of two machine learning techniques—Artificial Neural Networks (ANN) and Support Vector Regression (SVR)—in reducing ERA5 precipitation biases and improving estimation accuracy in West Azerbaijan Province. The performance of these approaches was also compared with a traditional interpolation method, Shepard's technique, to evaluate the relative benefits of modern ML-based approaches.

Received:

20 April 2025

Revised:

27 August 2025

Accepted:

29 September 2025

How to cite this article:

Mohammadi, M. (2026). Using machine learning to improve precipitation estimation by ERA5 data at meteorological stations in West Azerbaijan Province. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 37-56. [10.22077/jdcr.2025.9231.1137](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9231.1137).



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Materials and Methods

The study area, West Azerbaijan Province, is characterized by diverse topography, ranging from lowland plains to high mountain ranges, leading to significant spatial variability in precipitation patterns. Ground-based daily precipitation records from 16 synoptic meteorological stations were collected for the period 2010–2023. ERA5 reanalysis precipitation data with a spatial resolution of 0.25° and hourly temporal resolution were aggregated to daily and monthly scales to match station data. Three modeling approaches were employed: Shepard interpolation, SVR, and ANN (Multilayer Perceptron). For the machine learning models, several predictor variables were tested, including ERA5 precipitation values, station elevation, latitude, longitude, and temporal lag features (previous-day and next-day ERA5 estimates for daily scale; previous-month and next-month ERA5 estimates for monthly scale). Data were divided into training and testing subsets using k-fold cross-validation to ensure generalizability. Model evaluation was based on four statistical metrics: Root Mean Square Error (RMSE), Normalized RMSE (NRMSE), Nash–Sutcliffe Efficiency (NSE), and Pearson Correlation Coefficient (CC). These indicators provided complementary insights into model accuracy, relative error, predictive skill, and correlation strength.

Results and Discussion

The results clearly demonstrated the superiority of machine learning models over the conventional Shepard interpolation method. Among the ML approaches, ANN consistently produced the best performance at both daily and monthly scales. At the daily scale, the ANN achieved the lowest RMSE (2.73 mm), the highest correlation coefficient ($CC = 0.71$), and the highest NSE (0.50), while maintaining a low NRMSE (0.05). In contrast, the SVR model achieved a moderate improvement over Shepard interpolation but was less accurate than ANN, particularly in capturing extreme precipitation events. Shepard interpolation, by relying solely on spatial proximity without considering atmospheric predictors, failed to adequately reproduce precipitation variability. At the monthly scale, all models showed improved performance due to reduced short-term variability; however, ANN again outperformed alternatives. The ANN model achieved an RMSE of 10.20 mm, CC of 0.84, and NSE of 0.67. SVR also provided reasonable accuracy, but its performance was less stable, particularly in stations located in mountainous terrain. Shepard interpolation continued to underperform compared with ML-based corrections. Feature analysis revealed that including temporal lag variables significantly enhanced predictive performance, especially at the daily scale. This highlights the importance of accounting for temporal persistence in precipitation processes. Elevation and spatial coordinates also contributed to improved accuracy, confirming the influence of topography on precipitation distribution.

Conclusion

The findings emphasize the effectiveness of machine learning approaches, particularly ANN, in correcting ERA5 precipitation estimates in regions with complex terrain and limited station density. By capturing nonlinear dependencies and incorporating temporal and spatial features, ANN substantially reduced systematic biases and improved alignment with ground observations. The comparison with SVR showed that while kernel-based methods are useful, they are less flexible than neural networks in modeling high-dimensional feature interactions. Shepard interpolation, though simple and computationally efficient, was unable to address the structural biases of reanalysis data, underscoring the need for more advanced methods. This research has both methodological and practical implications. From a methodological perspective, it demonstrates the importance of combining multiple predictors—including ERA5 estimates, station metadata, and temporal lags—for effective bias correction. From a practical standpoint, the improved precipitation datasets can support hydrological modeling, water resource management, agricultural planning, and climate change impact assessments in West Azerbaijan and other regions with similar geographic and data constraints. Future research could expand on these results by exploring deep learning architectures such as Long Short-Term Memory (LSTM) networks, which may better capture temporal dynamics, or by incorporating additional predictors such as temperature, humidity, and atmospheric circulation indices. Moreover, applying

spatial downscaling techniques in combination with ML approaches could further refine precipitation estimates at local scales. In conclusion, this study confirms that machine learning, and especially ANN-based methods, offer a robust and reliable approach to enhancing reanalysis precipitation datasets, thereby contributing to more accurate climate and hydrological analyses in data-sparse mountainous regions.



استفاده از یادگیری ماشین برای بهبود تخمین بارش توسط داده‌های ERA5 در ایستگاه‌های هواشناسی استان آذربایجان غربی

مسلم محمدی^۱ *

۱- استادیار گروه کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: mo_mohammadi@pnu.ac.ir

چکیده

تخمین دقیق بارش نقشی اساسی در پیش‌بینی آب‌وهوا، مدیریت منابع آبی و کاهش اثرات بلایای طبیعی ایفا می‌کند. روش‌های سنتی مبتنی بر مدل‌های فیزیکی و داده‌های راداری دارای محدودیت‌هایی در دقت و مقیاس‌پذیری هستند. در سال‌های اخیر، روش‌های یادگیری ماشین به‌عنوان ابزاری توانمند برای بهبود تخمین بارش مطرح شده‌اند. این مقاله به بررسی روش‌های یادگیری ماشین برای تخمین بارش، چالش‌های موجود و پیشرفت‌های اخیر در این حوزه می‌پردازد. در این مقاله، روش‌های رگرسیون شبکه‌های عصبی مصنوعی و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان برای نداشت میزان بارش تخمین زده شده توسط داده‌های ERA5 به بارش‌های سنجش شده در ایستگاه‌های هواشناسی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. دقت داده‌های ماهواره‌ای در مقایسه با داده‌های زمینی نیاز به ارزیابی و بهبود دارد. در این مطالعه، روش‌های مختلفی از جمله روش‌های آماری و یادگیری ماشین با استفاده از ترکیب ویژگی‌های مختلف همچون مقدار تخمین ماهواره‌ای روز/ماه جاری، ارتفاع ایستگاه هواشناسی، طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی، مقدار تخمین ماهواره‌ای روز/ماه قبل و مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه بعد برای بهبود دقت داده‌های ERA5 مورد بررسی قرار می‌گیرند. داده‌های بارش از طول جغرافیایی ۴۴ درجه تا ۴۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. ناحیه مورد مطالعه شامل ۱۶ ایستگاه هواشناسی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که روش رگرسیون شبکه‌های عصبی مصنوعی در مقایسه با روش درون‌یابی شپرد و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان دقت تخمین بارش را تقریباً متناسب با تعداد ویژگی‌های ورودی افزایش داده و در بهترین حالت منجر به دستیابی به کمترین RMSE (mm 73/2) برای روزانه و mm 10/20 برای ماهانه)، بالاترین CC (۰/۷۱) برای روزانه و ۰/۸۴ برای ماهانه)، بالاترین NSE (۰/۵۰) برای روزانه و ۰/۶۷ برای ماهانه) و کمترین NRMSE (۰/۰۵) برای روزانه و ۰/۱۰ برای ماهانه) شد.

واژه‌های کلیدی:

تخمین بارش، شبکه‌های عصبی مصنوعی، ماشین بردار پشتیبان، یادگیری ماشین، داده‌های ERA5.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۱/۳۰

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۰۵

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۷/۰۷

مقدمه

بارش یک جزء اساسی از چرخه هیدرولوژیکی زمین است که بر کشاورزی، مدیریت منابع آب و مدل سازی آب و هوا تأثیر می‌گذارد. داده‌های دقیق بارش برای برنامه ریزی و تصمیم‌گیری مؤثر در این حوزه‌ها ضروری است. به‌طور سنتی، اندازه‌گیری‌های بارش بر ایستگاه‌های هواشناسی زمینی تکیه می‌کنند که دقت بالایی ارائه می‌دهند، اما در پوشش مکانی، به‌ویژه در مناطق دورافتاده یا از نظر توپوگرافی پیچیده، محدود هستند. تخمین‌های بارش مبتنی بر ماهواره، مانند آن‌هایی که توسط مجموعه داده‌های تحلیل مجدد^۱ ERA5 از مرکز اروپا برای پیش‌بینی‌های هوای متوسط ارائه شده است، راه‌حلی را با ارائه پوشش مکانی و زمانی گسترده ارائه می‌دهد. با این حال، این تخمین‌ها اغلب در مقایسه با مشاهدات زمینی، سوگیری‌های را نشان می‌دهند که به روش‌های اصلاحی برای افزایش قابلیت اطمینان آنها نیاز دارد (Beck et al., 2020). در دهه‌های اخیر، استفاده از یادگیری ماشین در علوم جوی به‌عنوان یک ابزار کارآمد برای مدل‌سازی پدیده‌های پیچیده‌ای مانند بارش باران مطرح شده است. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند روابط غیرخطی بین متغیرهای جوی را کشف کرده و دقت پیش‌بینی بارش را افزایش دهند. یادگیری ماشین به‌عنوان یکی از شاخه‌های پویا و روبه‌رشد هوش مصنوعی، به مطالعه و توسعه الگوریتم‌هایی می‌پردازد که قادرند از داده‌ها یاد بگیرند و پیش‌بینی‌های دقیقی انجام دهند. این حوزه با بهره‌گیری از روش‌های آماری و محاسباتی، به ماشین‌ها امکان می‌دهد تا الگوهای پنهان در داده‌ها را شناسایی کرده و از آن‌ها برای حل مسائل پیچیده استفاده کنند. یکی از کاربردهای مهم یادگیری ماشین، تخمین بارش در هواشناسی است که به‌دلیل نقش حیاتی بارش در مدیریت

منابع آبی، کشاورزی، و برنامه‌ریزی شهری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Saha et al., 2024). با توجه به پیچیدگی الگوهای بارش و تأثیر عوامل متعدد بر آن، روش‌های سنتی اغلب با محدودیت‌هایی مواجه هستند. در این راستا، یادگیری ماشین با ارائه روش‌های پیشرفته مانند شبکه عصبی پرسپترون چندلایه^۲ و ماشین بردار پشتیبان^۳، ابزارهای قدرتمندی را برای بهبود دقت و کارایی در تخمین بارش فراهم می‌کند (Houénafa et al., 2025).

بارش یکی از مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی است که نقش کلیدی در مطالعات هیدرولوژی، کشاورزی و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند (Jiang et al., 2023). داده‌های بارش معمولاً از دو منبع اصلی به‌دست می‌آیند: ایستگاه‌های هواشناسی زمینی و ماهواره‌ها. داده‌های زمینی به‌دلیل دقت بالا، معیار مناسبی برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای هستند. جمع‌آوری مجموعه داده‌های بارش به‌موقع و قابل اعتماد در مناطق کم داده و کوهستانی ضروری و چالش‌برانگیز است (Zhou et al., 2020). روش‌های مختلفی مانند باران‌سنج، رادارهای زمینی و سنسور از دور ماهواره‌ای برای جمع‌آوری داده‌های بارش استفاده شده است (Kalhori et al., 2025). همه این روش‌های تخمین بارندگی مزایا و معایب خاص خود را دارند (Yu et al., 2020). روش‌های تخمین بارندگی دارای عدم قطعیت‌های متنوعی از منابع داده، نمونه‌برداری، الگوریتم‌های بازبازی، و شرایط آب و هوایی طبیعی و جغرافیایی هستند (Wang et al., 2021). بنابراین، ارزیابی کمی از دقت تخمین بارش می‌تواند در طیف گسترده‌ای از کاربردهای تحقیقاتی هیدرولوژیکی و اقلیمی، از جمله مدیریت منابع آب (Bagheri Khanghani et al., 2025; Espinosa et al., 2024; Donat et al.,

² MLP (Multi-Layer Perceptron)

³ SVM (Support Vector Machine)

¹ ECMWF Reanalysis v5

آن به طور گسترده در تحقیقات هواشناسی و هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (Hersbach et al., 2020; Amjad et al., 2020). علی‌رغم مزایای آن، مطالعات نشان داده‌اند که تخمین‌های بارش ERA5 می‌تواند با اندازه‌گیری‌های زمین، به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده یا شبکه‌های ایستگاهی پراکنده اختلاف زیادی داشته باشد (Tang et al., 2020). این اختلاف به‌ویژه در مناطقی مانند استان آذربایجان غربی که در شمال غربی ایران قرار دارد، قابل توجه است. آذربایجان غربی دارای توپوگرافی متنوعی از جمله رشته کوه‌های زاگرس، دشت میان‌دوآب و دریاچه ارومیه است که بر الگوهای بارش محلی تأثیر می‌گذارد و تخمین مبتنی بر ماهواره را پیچیده می‌کند.

روش‌های یادگیری ماشین، مانند ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM) و پرسپترون‌های چند لایه (MLP)، به‌عنوان ابزار قدرتمندی برای تصحیح داده‌های ماهواره‌ای با مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی بین ویژگی‌های ورودی و متغیرهای هدف ظاهر شده‌اند (Kumar et al., 2019; Komasi et al., 2025). این مطالعه به بررسی کاربرد رگرسیون‌های SVM و MLP برای نقشه‌برداری تخمین بارش ERA5 در اندازه‌گیری‌های زمینی از ۱۶ ایستگاه هواشناسی آذربایجان غربی در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد. مطالعات متعددی به مقایسه داده‌های ERA5 با داده‌های زمینی پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال سوسی و همکاران در مطالعه‌ای جامع نشان دادند که داده‌های ERA5 در مقایسه با نسخه‌های قبلی مانند ERA-Interim، بهبود قابل توجهی در دقت تخمین بارش دارند (Soci et al., 2024). با این حال، هنوز اختلافاتی بین داده‌های ERA5 و داده‌های زمینی وجود دارد که نیاز به اصلاح دارد. یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، ناهمگونی مکانی و زمانی داده‌ها است در مطالعه‌ای نشان دادند که ناهمگونی مکانی داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند منجر به خطاهای قابل توجهی در

(Yuan et al., 2025;) و پیش بینی خشک‌سالی (Yang et al., 2024; Huang et al., 2024) مفید باشد. به‌طور سنتی، محصولات بارش مبتنی بر سنج شبکه‌ای، به‌دلیل منبع داده‌های قابل اعتمادشان (یعنی ایستگاه‌های جهانی) تخمین واقع‌بینانه‌ای را برای سوابق تاریخی بلندمدت ارائه می‌کنند. با این حال، کیفیت آنها به‌دلیل تراکم شبکه باران سنج زمینی و عدم دسترسی به موقع محدود شده است (Yousefi-Kebria et al., 2023). در حال حاضر، چندین محصول بارشی مبتنی بر چند ماهواره‌ای شبه جهانی در دهه‌های اخیر ظهور کرده‌اند که روش‌های جدیدی را برای ثبت سریع اطلاعات بارش مداوم و ارائه مؤثرترین ابزار برای مشاهده بارش در مقیاس جهانی ارائه می‌کنند (Sun et al., 2018). محصولات بارشی مبتنی بر ماهواره اکنون از دوران مأموریت اندازه‌گیری بارندگی استوایی^۱ (TRMM) به عصر اندازه‌گیری بارش جهانی^۲ (GPM) منتقل شده‌اند (Huffman et al., 2014). به‌طور کلی، طی چند دهه گذشته، محصولات بارش مبتنی بر ماهواره و سنج شامل بازیابی‌های یکپارچه چندماهواره‌ای برای مأموریت اندازه‌گیری باران جهانی^۳ (IMERG) برای بازیابی‌های چندماهواره‌ای یکپارچه برای GPM، تحلیل بارش چندماهواره‌ای TRMM^۴ (TMPA) برای بارش چند ماهواره‌ای TRMM، نسل پنجم تحلیل مجدد جوی توسط مرکز اروپایی^۵ (ERA و ECMWF) و داده‌های مرکز پیش بینی آب و هوا^۶ (CPC) می‌باشد.

مجموعه داده ERA5، با وضوح مکانی ۰/۲۵ درجه و وضوح زمانی ساعتی، به‌دلیل پوشش جهانی و دسترسی

¹ Tropical Rainfall Measuring Mission

² Global Precipitation Measurement

³ Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM

⁴ TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis

⁵ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

⁶ Climate Prediction Center

لایه خروجی تولید می‌شود. هر نورون با استفاده از یک تابع فعال‌سازی (مانند سیگموئید یا ReLU)، ورودی‌های وزن‌دار خود را به خروجی تبدیل می‌کند. فرآیند یادگیری در MLP از طریق الگوریتم‌هایی مانند پس‌انتشار^۱ خطا انجام می‌شود که وزن‌های اتصالات بین نورون‌ها را تنظیم می‌کند تا خطای پیش‌بینی کاهش یابد. در تخمین بارش، شبکه عصبی MLP می‌تواند از داده‌های هواشناسی مانند دما، رطوبت، فشار هوا، و سرعت باد به‌عنوان ورودی استفاده کند و میزان بارش را به‌عنوان خروجی پیش‌بینی کند. یکی از مزایای کلیدی این روش، توانایی آن در مدیریت داده‌های دارای نوفه و ناقص است که در هواشناسی به‌دلیل خطاهای اندازه‌گیری یا محدودیت‌های ابزارها رایج است. علاوه‌بر این، MLP قادر است روابط غیرخطی پیچیده بین متغیرها را مدل‌سازی کند، که در پدیده‌هایی مانند بارش، که تحت تأثیر تعاملات متعدد عوامل محیطی قرار دارد، بسیار مفید است. رگرسیون ماشین بردار پشتیبان (SVM) یک روش یادگیری ماشین است که بر اساس تئوری یادگیری آماری توسعه یافته و برای مسائل رگرسیون و طبقه‌بندی به کار می‌رود. در حالت رگرسیون، SVM به‌دنبال یافتن تابعی است که داده‌های آموزشی را با کمترین خطا پیش‌بینی کند، در حالی که از پیچیدگی بیش از حد مدل جلوگیری می‌کند (Nouhani et al., 2024). این روش از مفهوم حاشیه استفاده می‌کند و سعی دارد فاصله بین داده‌ها و ابر صفحه تصمیم را حداکثر کند، که این امر به بهبود قابلیت تعمیم مدل کمک می‌کند. SVM همچنین با استفاده از توابع کرنل (مانند کرنل گاوسی یا RBF)، می‌تواند روابط غیرخطی بین متغیرها را مدل‌سازی کند.

در تخمین بارش، SVM از داده‌های تاریخی بارش و متغیرهای هواشناسی برای ایجاد مدلی استفاده می‌کند که

تخمین بارش شود (Kidd et al., 2017). بنابراین، نیاز به روش‌هایی برای کاهش این ناهمگونی وجود دارد. روش‌های مختلفی برای بهبود دقت داده‌های ماهواره‌ای پیشنهاد شده است (Chen et al., 2018). از جمله روش‌های یادگیری ماشین، مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهبود دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان دادند که استفاده از روش‌های یادگیری ماشین می‌تواند دقت تخمین بارش را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد.

این مقاله به بررسی روش‌های نگاشت داده‌های بارش ماهواره ERA5 به داده‌های زمینی پرداخته و نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ترکیبی می‌تواند دقت تخمین بارش را افزایش دهد. در این مقاله، یک مدل ترکیبی برای بهبود تخمین بارش ارائه می‌شود که از داده‌های ERA5 و ایستگاه‌های زمینی به‌همراه الگوریتم‌های یادگیری ماشین بهره می‌برد. تعریف و استفاده از ویژگی‌های ترکیبی در رگرسیون‌های مختلف برای ارضای اهداف تعریف‌شده، نوآوری این تحقیق می‌باشد. اهداف این پژوهش سه مورد است:

- ارزیابی دقت برآورد بارش ERA5 در برابر اندازه‌گیری‌های زمینی در آذربایجان غربی.
- توسعه و ارزیابی رگرسیون‌های SVM و MLP برای بهبود دقت تخمین بارش ERA5.
- مقایسه عملکرد این مدل‌های یادگیری ماشینی با روش درونیابی سنتی شپرد.

مبانی نظری

شبکه عصبی MLP یکی از انواع شبکه‌های عصبی مصنوعی است که از چندین لایه نورون تشکیل شده است: لایه ورودی، لایه‌های پنهان، و لایه خروجی. این ساختار سلسله‌مراتبی به شبکه امکان می‌دهد تا الگوهای پیچیده و غیرخطی را در داده‌ها یاد بگیرد. در یک شبکه MLP، داده‌ها از لایه ورودی وارد شده، در لایه‌های پنهان پردازش می‌شوند، و در نهایت پیش‌بینی (مانند میزان بارش) از

^۱ Backpropagation

تحقیق، هم‌بستگی پیرسون) داده‌های نگاشت شده ERA5 با داده‌های واقعی ایستگاه‌های هواشناسی، میزان مطابقت دو مجموعه داده اندازه‌گیری می‌شود. از معیار خطای جذر میانگین مربعات^۲ (RMSE) و معیار خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده^۳ (NRMSE) برای تعیین کمیت تفاوت بین برآوردهای ERA5 و معیار نش-ساتکلیف^۴ (NSE) برای ارزیابی دقت اندازه‌گیری‌های واقعی استفاده شده است. مقادیر بالاتر NSE نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل است و مقادیر نزدیک به ۱، تطابق کامل را نشان می‌دهد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های هواشناسی استان آذربایجان غربی است. این منطقه بین طول جغرافیایی ۴۴ درجه تا ۴۷ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ تا ۴۰ درجه شمالی مطابق با شکل ۱، واقع شده است. از نظر توپوگرافی، دارای تنوع ارتفاعی از ارتفاع ۱۱۰۳/۴ تا ۱۸۸۸/۵ متر می‌باشد.

در این مطالعه، داده‌های بارش ماهواره ERA5 و داده‌های بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی «ارومیه»، «اشنویه»، «بوکان»، «پیرانشهر»، «نکاب»، «چالدران»، «خوی»، «سردشت»، «سلماس»، «شاهیندژ»، «چاپاره»، «کهریز»، «ماکو»، «مهاباد»، «میاندوآب» و «نقده» برای یک دوره ۱۴ ساله از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳، از سازمان هواشناسی استان آذربایجان غربی جمع‌آوری شده است. داده‌های ERA5 با رزولوشن زمانی ساعتی و رزولوشن مکانی ۰/۲۵ درجه در دسترس هستند که رزولوشن زمانی به داده‌های روزانه و ماهانه بارش تجمیع شد تا با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی هم مقیاس شود.

بتواند بارش آینده را پیش‌بینی کند. یکی از ویژگی‌های برجسته SVM، توانایی آن در مدیریت داده‌های با ابعاد بالا است، که در مواردی که تعداد ویژگی‌های ورودی زیاد باشد (مانند داده‌های هواشناسی)، بسیار کاربردی است. این روش در برابر یادگیری بیش از حد مقاوم است، به‌خصوص زمانی که تعداد نمونه‌های آموزشی محدود باشد، که در مطالعات هواشناسی، جایی که داده‌های دقیق همیشه در دسترس نیستند، مزیت بزرگی محسوب می‌شود.

مواد و روش‌ها

برای انجام رگرسیون غیرخطی می‌توان از مدل‌های مختلفی استفاده کرد که قادر به مدل‌سازی روابط پیچیده‌تر و غیرخطی بین ویژگی‌ها و متغیر وابسته هستند. رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، رگرسیون درخت تصمیم، مدل جنگل تصادفی، روش مبتنی بر تقویت گرادیان، مدل KNN برای رگرسیون و رگرسیون با شبکه‌های عصبی مصنوعی برخی از روش‌های رگرسیون غیرخطی هستند (Modaresi et al., 2018). برای مدل‌های ساده‌تر و زمانی که داده‌ها به‌صورت سلسله‌مراتبی یا گروه‌بندی شده هستند، درخت تصمیم یا جنگل تصادفی مناسب است؛ ولی برای داده‌های پیچیده‌تر و زمانی که ارتباطات غیرخطی بسیار پیچیده هستند، مدل‌های مبتنی بر تقویت گرادیان، SVR یا شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند کارایی بیشتری داشته باشند.

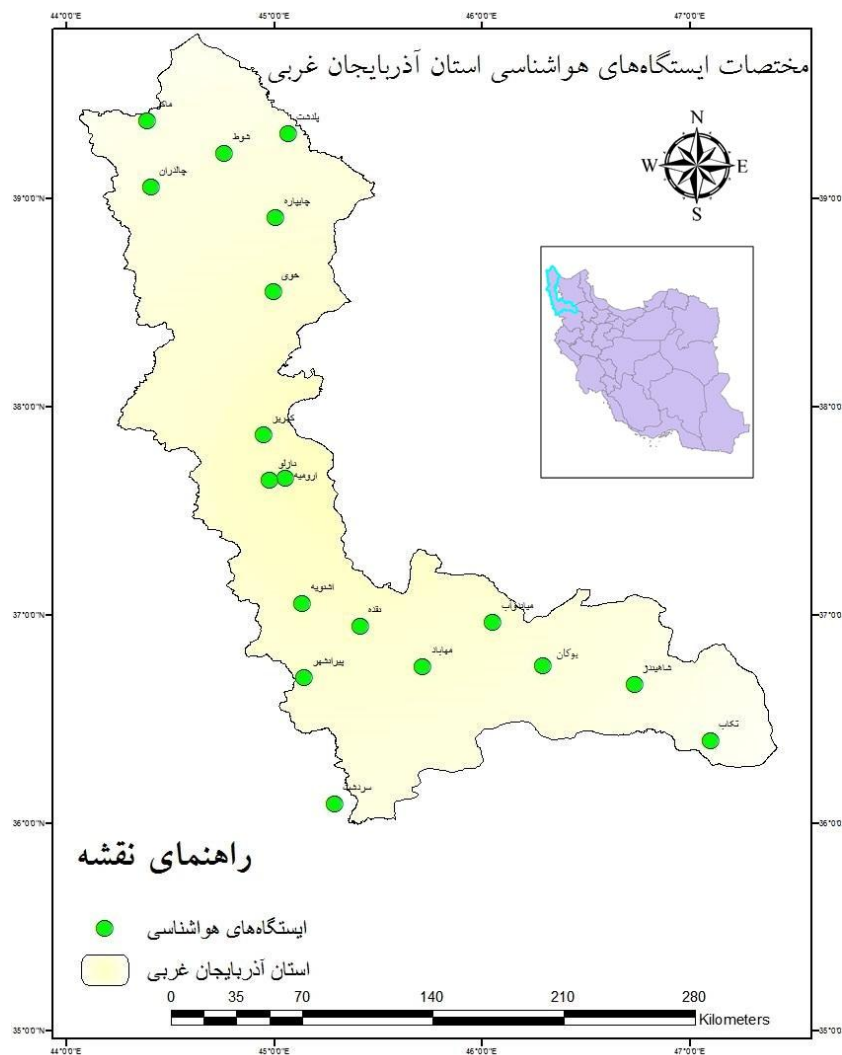
در این تحقیق از دو روش ماشین بردار پشتیبان و شبکه عصبی مصنوعی برای بهبود نتایج استفاده شده است. ضریب هم‌بستگی^۱ (CC) نشان‌دهنده میزان ارتباط خطی بین داده‌های بارش ERA5 و داده‌های بارش مشاهده‌شده است. با محاسبه ضرایب هم‌بستگی (در این

² Root Mean Squared Error

³ Normalized RMSE

⁴ Nash-Sutcliffe Efficiency

¹ Correlation Coefficient



شکل ۱. پراکندگی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی

Fig 1. Distribution of studied meteorological stations in West Azerbaijan Province

درونیابی شپرد یک روش درونیابی با وزن دهی معکوس فاصله^۱ است که در آن مقدار یک نقطه مجهول بر اساس نقاط معلوم اطرافش و با وزن دهی معکوس فاصله آنها محاسبه می‌شود (Iacono et al., 2008).

بعد از تراز کردن مقیاس‌های زمانی و مکانی با درونیابی دوبعدی شپرد، دو گروه داده سنجش زمینی و تخمین ماهواره‌ای میزان بارش در هر ایستگاه هواشناسی برای بازه‌های زمانی مختلف وجود دارد. در گام نخست، ضریب هم‌بستگی و میزان RMSE, NRMSE و NSE

وضوح فضایی هر دو مجموعه داده باید تراز باشد. از آنجایی که داده‌های ERA5 اغلب در قالب‌های شبکه‌ای ارائه می‌شوند، اگر داده‌های حقیقی زمینی مبتنی بر نقطه (از یک ایستگاه هواشناسی) باشد، باید داده‌های ERA5 را در همان منطقه جغرافیایی به‌طور میانگین محاسبه کرده یا از روش‌های درونیابی برای استخراج مقادیری از شبکه ERA5 که با موقعیت ایستگاه زمینی مطابقت دارد، استفاده گردد (Mianabadi et al., 2024). برای تراز کردن اولیه داده‌های محدوده مورد مطالعه از روش درون یابی شپرد برای درونیابی تخمین مقادیر بارندگی در ایستگاه‌های هواشناسی جداگانه استفاده شده است.

¹ Inverse distance weighting (IDW)

الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل ترکیبی از ۶ ویژگی جدول ۱ می‌باشد که از بین حالت‌های مختلف ۵ اجرا انتخاب شده و نتایج گزارش شده است. نتایج به‌صورت مجزا برای داده‌های ماهانه بارش و روزانه با استفاده از روش اعتبارسنجی متقابل، سنجش و گزارش شده است.

داده‌های سنجش زمینی و تخمین ماهواره‌ای میزان بارش تجمیع شده در تمامی ایستگاه‌ها و زمان‌های مختلف محاسبه می‌شود. در گام بعدی، از دو روش یادگیری ماشین بردار پشتیبان و شبکه‌های عصبی مصنوعی برای بهبود درونیایی شپرد استفاده می‌شود. ورودی

جدول ۱. ویژگی‌های مورد استفاده در مدل‌های یادگیری ماشین
Table 1. Features used in machine learning models

نام ویژگی Feature Name	ویژگی‌های ورودی Input Features	نام ویژگی Feature Name	ویژگی‌های ورودی Input Features
CP	مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری Satellite estimate value for the current day/month	عرض جغرافیایی latitude	LA
SA	ارتفاع ایستگاه هواشناسی station elevation	مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه قبل Satellite estimate value for the previous day/month	PE
LO	طول جغرافیایی Longitude	مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه بعد Satellite estimate value for the next day/month	NE

نتایج

نتایج حاصل از ۱۰ اجرای متفاوت بر روی داده‌های روزانه و ماهانه با ورودی‌های مختلف در جداول ۲ الی ۱۱ آورده شده است. هر ستون که با Fold نشان داده شده است بیانگر یک اجرا با ۹۰ درصد داده‌های آموزشی و ۱۰ درصد داده‌های آزمایشی می‌باشد. ستون آخر میانگین تمام ۱۰ اجرای متفاوت هست. هر سطر جداول مذکور نشان دهنده معیارهای ارزیابی مختلف بر اساس سه روش Raw Shepard¹، SVR² و MLPregressor³ است. Raw Shepard مدل پایه است که فقط از درونیایی مکانی ساده (شپرد) روی داده‌های ERA5 استفاده می‌کند و هیچ یادگیری ماشینی در آن انجام نشده است. این مدل معیار

مقایسه برای سنجش بهبود حاصل از روش‌های SVR و MLPregressor است. به دلیل عدم استفاده از یادگیری ماشین برای پارامترهای مختلف، مقدار RMSE، NRMSE، NSE و CC مربوط به سطر Raw Shepard در تمامی جدول‌ها یکسان و ثابت می‌باشد.

مدل‌های یادگیری با یک ویژگی ورودی

در این مدل فقط از مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری (CP) استفاده شده است. یعنی در این مدل مقدار تخمین ماهواره‌ای محاسبه شده توسط درونیایی شپرد به مدل داده می‌شود و مقدار اصلاح شده متناسب با داده‌های آموزشی به‌عنوان خروجی برگردانده می‌شود.

در جدول ۲، MLPregressor با RMSE متوسط ۳/۵۲mm و NSE متوسط ۰/۱۶ بهترین عملکرد را دارد و نسبت به مدل پایه بهبود نشان می‌دهد.

¹ روش مبتنی بر داده‌های درونیایی شده با استفاده از روش درونیایی

شپرد بدون پردازش اضافی

² روش بهبود نتایج شپرد با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان

³ روش بهبود نتایج شپرد با استفاده از رگرسیون شبکه‌های عصبی مصنوعی

جدول ۲. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش با یک پارامتر ورودی (CP)

Table 2. Results of daily data analysis with one input parameter (CP)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.03	3.92	3.95	4.18	4.18	3.91	4.12	3.98	3.91	4.20	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.76	3.69	3.61	3.90	3.85	3.63	3.72	3.54	3.66	3.73	3.71
RMSE: MLPregressor (mm)	3.98	3.42	3.34	3.68	3.60	3.40	3.55	3.33	3.39	3.54	3.52
CC: Raw Shepard	0.47	0.46	0.43	0.40	0.37	0.46	0.44	0.38	0.45	0.37	0.42
CC: SVR	0.43	0.40	0.33	0.34	0.25	0.41	0.43	0.31	0.35	0.30	0.35
CC: MLPregressor	-0.26	0.46	0.44	0.41	0.38	0.46	0.44	0.39	0.46	0.38	0.36
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.06	0.07	0.07
NRMSE: MLPregressor	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
NSE: Raw Shepard	-0.14	-0.14	-0.17	-0.40	-0.42	-0.12	-0.19	-0.30	-0.16	-0.34	-0.24
NSE: SVR	0.10	0.09	0.06	0.06	0.02	0.10	0.11	0.04	0.07	0.04	0.07
NSE: MLPregressor	0.00	0.21	0.19	0.17	0.14	0.21	0.19	0.15	0.20	0.14	0.16

جدول ۳. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش با یک پارامتر ورودی (CP)

Table 3. Results of monthly data analysis with one input parameter (CP)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	28.22	26.24	27.32	26.06	33.19	31.31	28.45	28.52	33.73	23.99	28.70
RMSE: SVR (mm)	21.37	25.38	23.72	20.06	24.26	26.81	22.52	34.04	30.89	18.85	24.79
RMSE: MLPregressor (mm)	22.37	23.23	22.81	18.99	24.57	25.93	20.93	52.18	28.23	19.40	25.86
CC: Raw Shepard	0.73	0.84	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.83	0.76	0.82	0.78
CC: SVR	0.76	0.79	0.75	0.78	0.75	0.73	0.75	0.70	0.71	0.83	0.75
CC: MLPregressor	0.73	0.83	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.00	0.76	0.81	0.69
NRMSE: Raw Shepard	0.15	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.15
NRMSE: SVR	0.10	0.12	0.11	0.10	0.12	0.13	0.11	0.16	0.15	0.09	0.12
NRMSE: MLPregressor	0.11	0.11	0.11	0.09	0.12	0.13	0.10	0.25	0.14	0.09	0.13
NSE: Raw Shepard	0.42	0.61	0.45	0.53	0.42	0.45	0.49	0.60	0.47	0.56	0.50
NSE: SVR	0.56	0.61	0.56	0.58	0.55	0.52	0.49	0.47	0.50	0.68	0.55
NSE: MLPregressor	0.52	0.67	0.60	0.62	0.54	0.55	0.56	-0.25	0.58	0.66	0.51

بیش از حد^۱ روی داده‌های آموزشی در آن اجرا است. این موضوع اهمیت گزارش میانگین چندین اجرا را نشان می‌دهد. افزودن روش‌های یادگیری ماشین حتی با یک ویژگی می‌تواند مفید باشد، اما بهبود آن محدود است.

مدل‌های یادگیری با دو ویژگی ورودی

در این مدل از مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری (CP) و مقدار تخمین ماهواره‌ای روز/ماه قبل (PE) استفاده شده است. تحلیل داده روزانه مطابق جدول ۴، نشان می‌دهد هر دو مدل SVR و MLPregressor به‌طور چشمگیری بهبود یافته‌اند. RMSE هر دو به حدود mm ۳/۲ کاهش یافته و CC مدل SVR به ۰/۵۴ رسیده است.

با این حال، CC پایین و NSE منفی یا نزدیک به صفر نشان می‌دهد که داده روزانه بسیار پر نوفه و غیرقطعی است و حتی مدل‌های یادگیری ماشین با یک ورودی قادر به مدل کردن کامل الگوهای آن نیستند.

عملکرد ضعیف MLPregressor در برخی Foldها (مثلاً CC برابر با ۰/۲۶- در Fold1) نشان از ناپایداری اولیه مدل با داده‌های کم دارد. تحلیل داده‌های ماهانه جدول ۳ نشان می‌دهد که SVR با RMSE متوسط mm ۲۴/۷۹ بهترین عملکرد را دارد. داده ماهانه با حذف نوفه‌های روزانه، اثبات‌تر است و رابطه خطی‌تری بین ERA5 و داده زمینی برقرار است که SVR در مدل کردن آن موفق‌تر عمل می‌کند. MLPregressor در Fold8 عملکرد بسیار ضعیفی دارد که احتمالاً به دلیل یادگیری

¹ Overfitting

جدول ۴. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش با ۲ پارامتر ورودی (CP, PE)

Table 4. Results of daily data analysis with 2 input parameters (CP, PE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.03	3.92	3.95	4.18	4.18	3.91	4.12	3.98	3.91	4.20	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.29	3.36	3.13	3.37	3.33	3.31	3.44	3.10	3.12	3.24	3.27
RMSE: MLPregressor (mm)	3.22	3.38	3.09	3.15	3.24	3.22	3.27	3.06	3.31	3.26	3.22
CC: Raw Shepard	0.40	0.34	0.41	0.41	0.39	0.41	0.39	0.35	0.41	0.36	0.39
CC: SVR	0.57	0.51	0.55	0.56	0.55	0.52	0.51	0.54	0.58	0.55	0.54
CC: MLPregressor	0.44	0.41	0.45	0.44	0.43	0.45	0.43	0.41	0.44	0.41	0.43
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06
NRMSE: MLPregressor	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
NSE: Raw Shepard	-0.13	-0.32	-0.12	-0.17	-0.25	-0.16	-0.18	-0.25	-0.20	-0.25	-0.20
NSE: SVR	0.32	0.24	0.29	0.30	0.27	0.25	0.24	0.27	0.33	0.28	0.28
NSE: MLPregressor	0.19	0.16	0.19	0.19	0.18	0.20	0.19	0.16	0.19	0.17	0.18

مدل‌های یادگیری با چهار ویژگی ورودی

در این مدل از مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری (CP)، ارتفاع ایستگاه هواشناسی (SA)، طول جغرافیایی (LO) و عرض جغرافیایی (LA) استفاده شده است. این مدل بر مکان^۲ تمرکز دارد. ویژگی‌های مکانی (ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی) به مدل اضافه شده‌اند. طبق جدول ۸، بهبود نسبی نسبت به مدل پایه مشاهده می‌شود اما این بهبود به خوبی حالت استفاده از توالی زمانی (مدل ۲ و ۳ ویژگی) نیست. این نشان می‌دهد برای پیش‌بینی در یک روز خاص، مکان، عامل مهمی است اما داده‌های تاریخچه زمانی مهم‌تر است. در تحلیل بارش ماهانه (جدول ۹)، یک نقطه عطف وجود دارد به نحوی که هر دو مدل SVR و MLPregressor به طور قابل توجهی بهبود یافته‌اند. MLPregressor به RMSE شگفت‌انگیز ۲۰/۸۶ mm و CC برابر ۰/۸۳ دست یافته است. این نشان می‌دهد برای میانگین‌گیری در مقیاس ماهانه، تأثیر توپوگرافی و موقعیت مکانی به شدت تعیین‌کننده است و مدل به خوبی این رابطه غیرخطی پیچیده را یاد گرفته است. (عملکرد بد MLPregressor در Fold9 احتمالاً به دلیل یک داده پرت خاص است).

این نشان می‌دهد که توالی زمانی^۱ یک عامل بسیار مهم در تخمین بارش روزانه است. در داده‌های ماهانه (جدول ۵)، بهبود نسبت به حالت یک ویژگی محسوس اما کمتر از داده روزانه است. MLPregressor عملکرد بهتری دارد (RMSE=23.54 mm, NSE=0.59). این نشان می‌دهد برای داده‌های ماهانه، اطلاعات ماه قبل نیز مفید است اما تأثیر آن به اندازه داده روزانه تعیین‌کننده نیست.

مدل‌های یادگیری با سه ویژگی ورودی

در این مدل از مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری (CP)، مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه قبل (PE) و مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه بعد (NE) استفاده شده است. این مدل به اطلاعات آینده (ماه / روز بعد) دسترسی دارد. این سناریو بیشتر برای اصلاح داده‌های گذشته کاربرد دارد. در این مدل‌سازی هم، برای داده‌های روزانه (جدول ۶)، MLPregressor با RMSE متوسط mm ۲/۹۴ و CC متوسط ۰/۶۵، برتری قاطع خود را نشان می‌دهد.

MLPregressor به خوبی توانسته از اطلاعات آینده برای درک بهتر الگوهای جوی و اصلاح دقیق‌تر بارش استفاده کند.

² Geography

¹ Temporal Sequence

نتیجه را ارائه داده و به اوج عملکرد خود می‌رسد. در داده‌های ماهانه (جدول ۱۱) هم، MLPregressor بهترین Fold6 در RMSE، CC، NSE و NRMSE را دارد. اگرچه در عملکرد ضعیفی دارد (NSE=-0.15)، اما به‌طور کلی برتری خود را نشان می‌دهد SVR. نیز عملکرد بسیار خوب و باثباتی دارد. ترکیب همه ویژگی‌ها نتیجه بهینه را تولید می‌کند. این موضوع فرضیه اصلی مقاله مبنی بر اینکه استفاده از ترکیب ویژگی‌های مختلف دقت را افزایش می‌دهد، به‌طور کامل تأیید می‌کند. MLPregressor در استفاده از این ترکیب ویژگی‌ها از SVR پیشی می‌گیرد.

مدل‌های یادگیری با شش ویژگی ورودی

در این مدل از مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه جاری (CP)، ارتفاع ایستگاه هواشناسی (SA)، طول جغرافیایی (LO)، عرض جغرافیایی (LA)، مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه قبل (PE) و مقدار تخمین ماهواره‌ای روز / ماه بعد (NE) استفاده شده است. این حالت کامل‌ترین مدل است که هم اطلاعات توالی زمانی (حال، گذشته، آینده) و هم اطلاعات مکانی (مکان و ارتفاع) را یکجا دارد. در داده‌های روزانه (جدول ۱۰)، MLP با RMSE متوسط ۲/۷۳ mm و CC متوسط ۰/۷۱، بهترین

جدول ۵. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش با ۲ پارامتر ورودی (CP, PE)

Table 5. Results of monthly data analysis with 2 input parameters (CP, PE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw											
Shepard (mm)	28.22	26.24	27.32	26.06	33.19	31.31	28.45	28.52	33.73	23.99	28.70
RMSE: SVR (mm)	21.04	30.42	23.27	20.00	26.06	27.06	25.43	33.85	30.02	19.92	25.71
RMSE:											
MLPregressor (mm)	22.29	23.36	23.05	19.09	24.88	26.10	20.95	28.20	28.24	19.25	23.54
CC: Raw Shepard	0.73	0.84	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.83	0.76	0.82	0.78
CC: SVR	0.76	0.67	0.76	0.78	0.71	0.73	0.66	0.70	0.73	0.80	0.73
CC: MLPregressor	0.73	0.83	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.82	0.76	0.82	0.78
NRMSE: Raw											
Shepard	0.15	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.15
NRMSE: SVR	0.10	0.15	0.11	0.10	0.13	0.13	0.12	0.16	0.15	0.10	0.12
NRMSE:											
MLPregressor	0.11	0.11	0.11	0.09	0.12	0.13	0.10	0.14	0.14	0.09	0.11
NSE: Raw Shepard	0.42	0.61	0.45	0.53	0.42	0.45	0.49	0.60	0.47	0.56	0.50
NSE: SVR	0.57	0.44	0.58	0.58	0.48	0.51	0.35	0.47	0.53	0.64	0.52
NSE:											
MLPregressor	0.52	0.67	0.59	0.62	0.53	0.55	0.56	0.64	0.58	0.67	0.59

جدول ۶. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش با ۳ پارامتر ورودی (CP, PE, NE)

Table 6. Results of daily data analysis with 3 input parameters (CP, PE, NE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.03	3.92	3.95	4.18	4.18	3.91	4.12	3.98	3.91	4.20	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.30	3.44	3.20	3.35	3.56	3.30	3.33	3.13	3.17	3.31	3.31
RMSE: MLPregressor (mm)	3.02	3.06	2.86	2.98	3.00	2.88	3.04	2.81	2.85	2.95	2.94
CC: Raw Shepard	0.47	0.46	0.43	0.40	0.37	0.46	0.44	0.38	0.45	0.37	0.42
CC: SVR	0.57	0.50	0.53	0.57	0.49	0.53	0.55	0.54	0.57	0.53	0.54
CC: MLPregressor	0.65	0.62	0.64	0.68	0.64	0.66	0.64	0.64	0.66	0.64	0.65
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
NRMSE: MLPregressor	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NSE: Raw Shepard	-0.14	-0.14	-0.17	-0.40	-0.42	-0.12	-0.19	-0.30	-0.16	-0.34	-0.24
NSE: SVR	0.31	0.21	0.26	0.31	0.16	0.26	0.29	0.25	0.30	0.25	0.26
NSE: MLPregressor	0.42	0.37	0.41	0.45	0.41	0.43	0.41	0.40	0.44	0.40	0.41

جدول ۷. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش با ۳ پارامتر ورودی (CP, PE, NE)

Table 7. Results of monthly data analysis with 3 input parameters (CP, PE, NE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	28.22	26.24	27.32	26.06	33.19	31.31	28.45	28.52	33.73	23.99	28.70
RMSE: SVR (mm)	21.66	32.07	21.72	19.87	27.95	26.16	24.61	34.76	32.57	19.52	26.09
RMSE: MLPregressor (mm)	22.30	23.43	23.12	19.06	25.18	26.25	36.09	28.58	28.26	19.29	25.16
CC: Raw Shepard	0.73	0.84	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.83	0.76	0.82	0.78
CC: SVR	0.75	0.63	0.80	0.79	0.69	0.75	0.70	0.68	0.68	0.81	0.73
CC: MLPregressor	0.73	0.82	0.77	0.79	0.74	0.74	-0.94	0.81	0.76	0.82	0.60
NRMSE: Raw Shepard	0.15	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.15
NRMSE: SVR	0.10	0.16	0.11	0.10	0.14	0.13	0.12	0.17	0.16	0.09	0.13
NRMSE: MLPregressor	0.11	0.11	0.11	0.09	0.12	0.13	0.17	0.14	0.14	0.09	0.12
NSE: Raw Shepard	0.42	0.61	0.45	0.53	0.42	0.45	0.49	0.60	0.47	0.56	0.50
NSE: SVR	0.55	0.38	0.64	0.58	0.40	0.54	0.39	0.45	0.44	0.66	0.50
NSE: MLPregressor	0.52	0.67	0.59	0.62	0.52	0.54	-0.31	0.63	0.58	0.66	0.50

جدول ۸. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش با چهار پارامتر ورودی (CP, SA, LO, LA)

Table 8. Results of daily data analysis with four input parameters (CP, SA, LO, LA)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.03	3.92	3.95	4.18	4.18	3.91	4.12	3.98	3.91	4.20	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.88	3.77	3.66	3.96	3.84	3.74	3.86	3.57	3.72	3.77	3.78
RMSE: MLPregressor (mm)	3.46	3.35	3.32	3.58	3.52	3.26	3.43	3.29	3.30	3.44	3.39
CC: Raw Shepard	0.47	0.46	0.43	0.40	0.37	0.46	0.44	0.38	0.45	0.37	0.42
CC: SVR	0.49	0.48	0.44	0.42	0.40	0.50	0.47	0.40	0.47	0.40	0.45
CC: MLPregressor	0.49	0.50	0.46	0.46	0.43	0.53	0.50	0.43	0.50	0.44	0.47
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07	0.07
NRMSE: MLPregressor	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
NSE: Raw Shepard	-0.14	-0.14	-0.17	-0.40	-0.42	-0.12	-0.19	-0.30	-0.16	-0.34	-0.24
NSE: SVR	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.04
NSE: MLPregressor	0.24	0.25	0.21	0.21	0.18	0.27	0.25	0.18	0.25	0.19	0.22

جدول ۹. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش با چهار پارامتر ورودی (CP, SA, LO, LA)

Table 9. Results of monthly data analysis with four input parameters (CP, SA, LO, LA)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	28.22	26.24	27.32	26.06	33.19	31.31	28.45	28.52	33.73	23.99	28.70
RMSE: SVR (mm)	20.90	21.80	21.53	17.67	22.22	24.16	19.50	26.44	25.94	18.63	21.88
RMSE: MLPregressor (mm)	17.23	18.38	17.32	15.66	17.67	19.38	16.73	21.45	47.84	16.89	20.86
CC: Raw Shepard	0.73	0.84	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.83	0.76	0.82	0.78
CC: SVR	0.76	0.85	0.81	0.82	0.79	0.79	0.79	0.85	0.81	0.83	0.81
CC: MLPregressor	0.85	0.89	0.88	0.87	0.87	0.87	0.86	0.91	0.41	0.86	0.83
NRMSE: Raw Shepard	0.15	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.15
NRMSE: SVR	0.10	0.11	0.10	0.09	0.11	0.12	0.09	0.13	0.13	0.09	0.11
NRMSE: MLPregressor	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.08	0.10	0.23	0.08	0.10
NSE: Raw Shepard	0.42	0.61	0.45	0.53	0.42	0.45	0.49	0.60	0.47	0.56	0.50
NSE: SVR	0.58	0.71	0.64	0.67	0.62	0.61	0.62	0.68	0.65	0.69	0.65
NSE: MLPregressor	0.71	0.80	0.77	0.74	0.76	0.75	0.72	0.79	-0.20	0.74	0.66

جدول ۱۰. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش با ۶ پارامتر ورودی (CP, SA, LO, LA, PE, NE)

Table 10. Results of daily data analysis with 6 input parameters (CP, SA, LO, LA, PE, NE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.03	3.92	3.95	4.18	4.18	3.91	4.12	3.98	3.91	4.20	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.35	3.28	3.18	3.37	3.26	3.19	3.35	3.02	3.20	3.19	3.24
RMSE: MLPregressor (mm)	2.86	2.81	2.75	2.80	2.71	2.62	2.75	2.65	2.64	2.72	2.73
CC: Raw Shepard	0.47	0.46	0.43	0.40	0.37	0.46	0.44	0.38	0.45	0.37	0.42
CC: SVR	0.64	0.61	0.61	0.68	0.65	0.67	0.64	0.65	0.65	0.65	0.64
CC: MLPregressor	0.70	0.68	0.68	0.72	0.72	0.73	0.72	0.68	0.72	0.70	0.71
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06
NRMSE: MLPregressor	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
NSE: Raw Shepard	-0.14	-0.14	-0.17	-0.40	-0.42	-0.12	-0.19	-0.30	-0.16	-0.34	-0.24
NSE: SVR	0.29	0.28	0.27	0.30	0.30	0.30	0.28	0.30	0.29	0.30	0.29
NSE: MLPregressor	0.48	0.47	0.46	0.52	0.51	0.53	0.52	0.46	0.52	0.49	0.50

جدول ۱۱. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش با ۶ پارامتر ورودی (CP, SA, LO, LA, PE, NE)

Table 11. Results of monthly data analysis with 6 input parameters (CP, SA, LO, LA, PE, NE)

Model	Fold 1	Fold 2	Fold 3	Fold 4	Fold 5	Fold 6	Fold 7	Fold 8	Fold 9	Fold 10	average
RMSE: Raw Shepard (mm)	28.22	26.24	27.32	26.06	33.19	31.31	28.45	28.52	33.73	23.99	28.70
RMSE: SVR (mm)	21.02	21.86	21.61	17.74	22.37	24.28	19.56	26.42	26.01	18.62	21.95
RMSE: MLPregressor (mm)	16.97	18.60	17.17	15.65	17.73	41.54	16.23	21.78	18.71	16.65	20.10
CC: Raw Shepard	0.73	0.84	0.77	0.79	0.74	0.74	0.76	0.83	0.76	0.82	0.78
CC: SVR	0.76	0.85	0.81	0.82	0.79	0.78	0.79	0.85	0.81	0.83	0.81
CC: MLPregressor	0.85	0.89	0.88	0.87	0.87	0.48	0.87	0.90	0.91	0.87	0.84
NRMSE: Raw Shepard	0.15	0.14	0.15	0.14	0.18	0.17	0.15	0.15	0.18	0.13	0.15
NRMSE: SVR	0.10	0.11	0.10	0.09	0.11	0.12	0.09	0.13	0.13	0.09	0.11
NRMSE: MLPregressor	0.08	0.09	0.08	0.08	0.09	0.20	0.08	0.11	0.09	0.08	0.10
NSE: Raw Shepard	0.42	0.61	0.45	0.53	0.42	0.45	0.49	0.60	0.47	0.56	0.50
NSE: SVR	0.58	0.71	0.64	0.67	0.62	0.61	0.61	0.68	0.64	0.69	0.64
NSE: MLPregressor	0.72	0.79	0.77	0.74	0.76	-0.15	0.73	0.78	0.82	0.75	0.67

تحلیل نتایج داده‌های کلی

و در داده‌های ماهانه بارش کمتر می‌باشد. همچنین، در داده‌های روزانه بارش اختلاف بهبود نسبت به روش SVR هم قابل توجه هست. در مدل‌های مختلف اجرا، کمترین RMSE داده‌های روزانه و ماهانه مربوط به MLPregressor با ۶ ورودی با مقادیر ۲/۷۳ mm و ۲/۱۰ mm می‌باشد. بیشترین بهبود ضریب هم‌بستگی هم در این مدل اجرا اتفاق افتاده است. Raw Shepard همچنان ضعیف‌ترین مدل به لحاظ معیارهای ارزیابی شده می‌باشد. شکل ۲ و شکل ۳، نتایج کلی را به صورت بصری نشان می‌دهد.

در جدول ۱۲ و ۱۳ نتایج تجمیع شده ۵ مدل متفاوت اجرا از جدول‌های قبلی برای تحلیل بیشتر آورده شده است. همان طور که در جدول تجمیعی روزانه مشاهده می‌شود، مقدار NSE روش MLPregressor نسبت به روش Raw Shepard در تمامی مدل‌های ورودی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال در ستون ۶ ورودی مقدار CC: Raw Shepard از ۰/۲۴- به مثبت ۵۰ تغییر یافته است که بهبود ۰/۷۴ را نشان می‌دهد. همین نتیجه در مورد داده‌های ماهانه بارش هم صدق می‌کند ولی با این تفاوت که نسبت بهبود در داده‌های روزانه بارش بیشتر

جدول ۱۲. نتایج تحلیل داده‌های روزانه بارش کلی

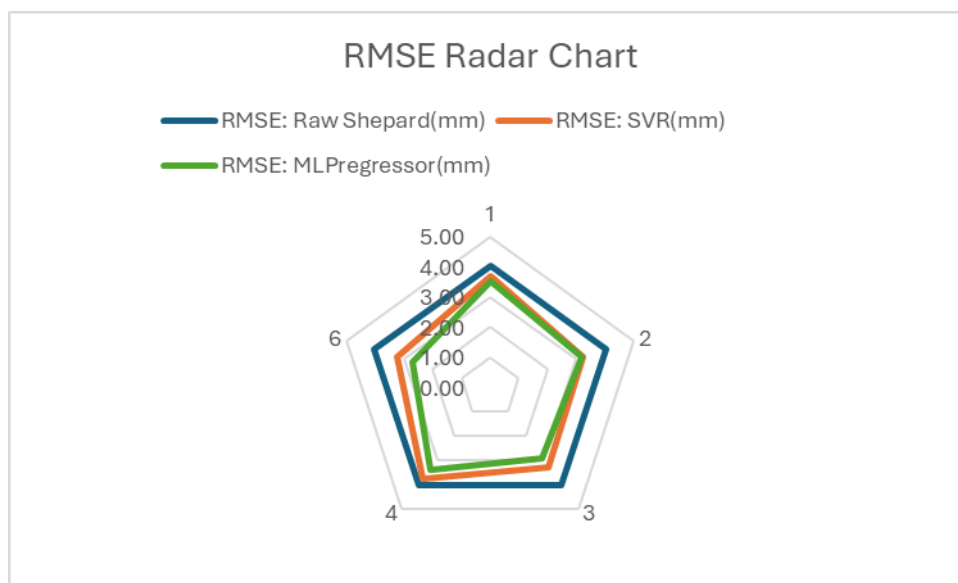
Table 12. Results of overall daily data analysis

Model	1	2	3	4	6
RMSE: Raw Shepard (mm)	4.04	4.04	4.04	4.04	4.04
RMSE: SVR (mm)	3.71	3.27	3.31	3.78	3.24
RMSE: MLPregressor (mm)	3.52	3.22	2.94	3.39	2.73
CC: Raw Shepard	0.42	0.39	0.42	0.42	0.42
CC: SVR	0.35	0.54	0.54	0.45	0.64
CC: MLPregressor	0.36	0.43	0.65	0.47	0.71
NRMSE: Raw Shepard	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
NRMSE: SVR	0.07	0.06	0.06	0.07	0.06
NRMSE: MLPregressor	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05
NSE: Raw Shepard	-0.24	-0.20	-0.24	-0.24	-0.24
NSE: SVR	0.07	0.28	0.26	0.04	0.29
NSE: MLPregressor	0.16	0.18	0.41	0.22	0.50

جدول ۱۳. نتایج تحلیل داده‌های ماهانه بارش کلی

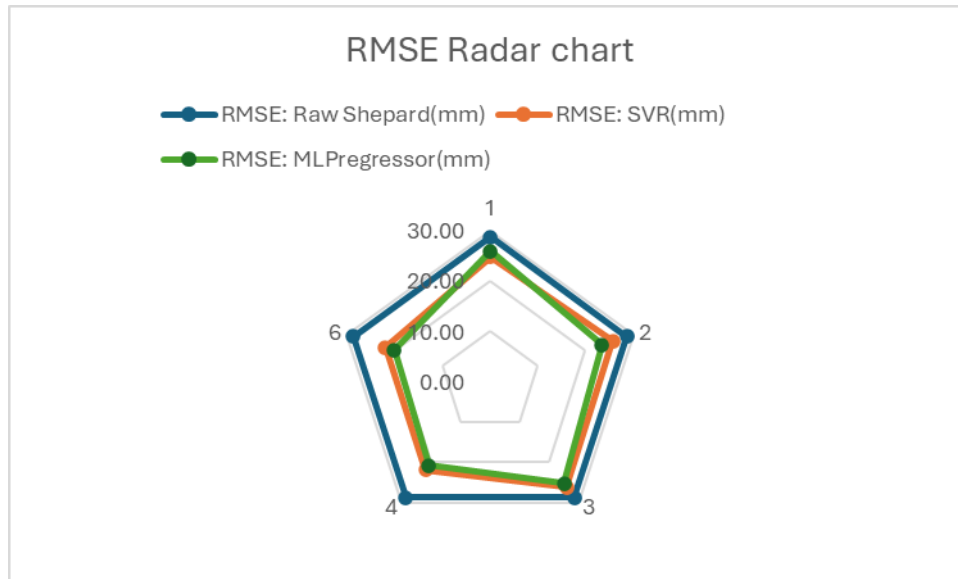
Table 13. Results of overall monthly data analysis

Model	1	2	3	4	6
RMSE: Raw Shepard (mm)	28.70	28.70	28.70	28.70	28.70
RMSE: SVR (mm)	24.79	25.71	26.09	21.88	21.95
RMSE: MLPregressor (mm)	25.86	23.54	25.16	20.86	20.10
CC: Raw Shepard	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
CC: SVR	0.75	0.73	0.73	0.81	0.81
CC: MLPregressor	0.69	0.78	0.60	0.83	0.84
NRMSE: Raw Shepard	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
NRMSE: SVR	0.12	0.12	0.13	0.11	0.11
NRMSE: MLPregressor	0.13	0.11	0.12	0.10	0.10
NSE: Raw Shepard	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
NSE: SVR	0.55	0.52	0.50	0.65	0.64
NSE: MLPregressor	0.51	0.59	0.50	0.66	0.67



شکل ۲. نمودار راداری معیار RMSE برای داده‌های بارش روزانه

Fig 2. Radar plot of RMSE criterion for daily precipitation data



شکل ۳. نمودار راداری معیار RMSE برای داده‌های بارش ماهانه

Fig 3. Radar plot of RMSE criterion for monthly precipitation data

نتیجه‌گیری

یادگیری ماشین با ارائه روش‌هایی مانند رگرسیون شبکه عصبی و رگرسیون ماشین بردار پشتیبان، افق‌های جدیدی را در تخمین بارش و مطالعات هواشناسی گشوده است. این روش‌ها با توانایی مدل‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی، دقت پیش‌بینی‌های بارش را بهبود می‌بخشند و به تصمیم‌گیرندگان در زمینه‌هایی مانند مدیریت منابع آبی و کشاورزی کمک می‌کنند تا برنامه‌ریزی مؤثرتری داشته باشند. نتایج به وضوح نشان داد که کاربرد هر دو روش SVR و MLPregressor منجر به بهبود چشمگیر دقت تخمین بارش در مقایسه با روش درونیایی ساده شپرد (Raw Shepard) می‌شود. کاهش معنادار معیار RMSE و افزایش معیارهای CC و NSE در کلیه مدل‌ها و برای هر دو مقیاس روزانه و ماهانه، گواهِ بر توانایی ذاتی الگوریتم‌های یادگیری ماشین در تصحیح خطاها و کشف روابط غیرخطی پیچیده بین داده‌های ماهواره‌ای و مشاهدات زمینی است. نتایج حاصل از به‌کارگیری روش‌های پیشنهادی بر روی داده‌های تخمینی ماهواره‌ای ERA5 و داده‌های واقعی بارش ایستگاه‌های هواشناسی

استان آذربایجان غربی نشان دهنده بهبود قابل توجهی در محاسبات مقدار دقیق بارش ایستگاه‌های هواشناسی بود. با توجه به اینکه مجموعه ویژگی‌های متفاوتی برای ورودی الگوریتم‌های یادگیری استفاده شد، به‌طور کلی برای SVR و MLPregressor، ویژگی‌های مقدار تخمین ماهواره‌ای روز جاری (CP)، مقدار تخمین ماهواره‌ای روز قبل (PE) و مقدار تخمین ماهواره‌ای روز بعد (NE) در داده‌های روزانه بارش خیلی تعیین‌کننده هستند. مقاومت مدل‌ها در داده‌های ماهانه بارش نسبت به تغییرات ویژگی‌های ورودی بیشتر هست. مهم‌ترین یافته این پژوهش، وابستگی شدید دقت مدل به تعداد و به‌ویژه نوع ویژگی‌های ورودی بود: اگرچه هر دو الگوریتم SVR و MLPregressor بهبود قابل توجهی نسبت به روش پایه ایجاد کردند، اما عملکرد آنها متفاوت بود. الگوریتم SVR در شرایطی که داده‌ها از پیچیدگی کمتری برخوردار بودند (مانند مدل‌های با تعداد ویژگی کم) یا در داده‌های ماهانه، پایداری و عملکرد قابل اطمینان‌تری از خود نشان داد. ولی MLPregressor در شرایط بهینه (استفاده از تمامی ۶ ویژگی)، برتری خود را نشان داد. توانایی بالاتر این الگوریتم در یادگیری روابط غیرخطی بسیار پیچیده، هنگامی که حجم و تنوع

(1981/1982–2022/2023). *Water*, 16(5), 628.
<https://doi.org/10.3390/w16050628>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J.,... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, 146(730), 1999-2049.
<https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Houénafa, S. E., Johnson, O., Ronoh, E. K., & Moore, S. E. (2025). Hybridization of Stochastic Hydrological Models and Machine Learning Methods for Improving Rainfall-Runoff Modelling. *Results in Engineering*, 104079.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104079>

Huang, S., Wang, S., Chen, J., Wang, C., Zhang, X., Wu, J., Chen, N. (2024). Urbanization-induced spatial and temporal patterns of local drought revealed by high-resolution fused remotely sensed datasets. *Remote Sensing of Environment*, 313, 114378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114378>

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Kidd, C., Xie, P. (2014). NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) Version 4*. NASA technical report.

Iacono, M.J.; Delamere, J.S.; Mlawer, E.J.; Shephard, M.W.; Clough, S.A.; Collins, W.D (2008).. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J. Geophys. Res.* 2008, 113, D13103.
<https://doi.org/10.1029/2008JD009944>

Jiang, S. H., Wei, L. Y., Ren, L. L., Zhang, L. Q., Wang, M. H., & Cui, H. (2023). Evaluation of IMERG, TMPA, ERA5, and CPC precipitation products over mainland China: Spatiotemporal patterns and extremes. *Water Science and Engineering*, 16(1), 45-56.
<https://doi.org/10.1016/j.wse.2022.05.001>

Kalhari M, Tadayon M, Kahrizi E, Ghiasvand M. Analysis and monitoring of water resources and drought using a combination of GRACE, MODIS, and Landsat 8 satellite images (Case study: Hamedan City). *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1), 62-74.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11390.1007>

Kidd, C., Becker, A., Huffman, G. J., Muller, C. L., Joe, P., Skofronick-Jackson, G., & Kirschbaum, D. B. (2017). So, how much of the Earth's surface is covered by rain gauges? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98(1), 69-78.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00283.1>

داده‌های ورودی کافی باشد، منجر به دستیابی به کمترین RMSE (mm 10/20 برای روزانه و mm 73/2 برای ماهانه) و بالاترین CC (0/71 برای روزانه و 0/84 برای ماهانه) شد. برای مطالعات آینده، پیشنهاد می‌شود که از داده‌های ماهواره‌ای با رزولوشن بالاتر و روش‌های پیشرفته‌تر یادگیری ماشین و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیچیده‌تر یادگیری عمیق مانند LSTM یا CNN برای مدل‌سازی بهتر وابستگی‌های مکانی-زمانی استفاده شود. همچنین می‌توان تأثیر افزودن سایر متغیرهای جوی (مانند رطوبت، فشار سطح دریا) به‌عنوان ویژگی‌های کمکی را بررسی کرد.

منابع

Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., & Yilmaz, K. K. (2020). Performance evaluation of satellite-and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology*, 584, 124707.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>

Bagheri Khanghahi M., Hazar Jaribi A., Kamali Mohammad I., Zamani F. Forecasting Rainfall in Different Climatic Regions of Iran Using the LARS WG7 Climate Model. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1), 28-39.
<https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11744.1008>

Beck, H. E., Vergopolan, N., Pan, M., Levizzani, V., van Dijk, A. I., Weedon, G. P.,... & Wood, E. F. (2020). Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. *Satellite precipitation measurement: Volume 2*, 625-653. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_9

Chen, F., Gao, Y. (2018). Evaluation of precipitation trends from high-resolution satellite precipitation products over Mainland China. *Climate Dynamics*, 51, 3311-3331.
<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4080-z>

Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508-513.
<https://doi.org/10.1038/nclimate2941>

Espinosa, L. A., Portela, M. M., & Gharbia, S. (2024). Assessing changes in exceptional rainfall in Portugal using ERA5-land reanalysis data

- Komasi M, Dalvand R. Evaluation of nonparametric decision tree models for predicting scour depth of bridges. *Water Resources and Climate Change*. (2025); 1(1), 40-50. <https://doi.org/10.22091/wrcc.2025.11363.1005>
- Kumar, A., Ramsankaran, R. A. A. J., Brocca, L., & Munoz-Arriola, F. (2019). A machine learning approach for improving near-real-time satellite-based rainfall estimates by integrating soil moisture. *Remote Sensing*, 11(19), 2221. <https://doi.org/10.3390/rs11192221>
- Mianabadi, A., Omidvar, J., & Pourreza-Bilandi, M. (2024). Development of intensity–duration–frequency curves at the basin scale using the ERA5 reanalysis product. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(4), 121–140 [in Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8636.1098>
- Modaresi, F., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2018). A comparative assessment of artificial neural network, generalized regression neural network, least-square support vector regression, and K-nearest neighbor regression for monthly streamflow forecasting in linear and nonlinear conditions. *Water resources management*, 32, 243-258. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1807-2>
- Nouhani, E., Babaali, H. R., & Dehghani, R. (2024). Estimation of suspended sediments in the coastal areas of the Caspian Sea using machine learning techniques. *Journal of Drought and Climate Change Research*. Advance online publication. [in Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8983.1121>
- Saha, A., & Pal, S. C. (2024). Application of machine learning and emerging remote sensing techniques in hydrology: A state-of-the-art review and current research trends. *Journal of Hydrology*, 632, 130907. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130907>
- Soci, C., Hersbach, H., Simmons, A., Poli, P., Bell, B., Berrisford, P., Thépaut, J. N. (2024). The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(764), 4014-4048. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>
- Tang, W., Qin, J., Yang, K., Zhu, F., & Zhou, X. (2021). Does ERA5 outperform satellite products in estimating atmospheric downward longwave radiation at the surface?. *Atmospheric Research*, 252, 105453. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105453>
- Wang, Q., Xia, J., She, D., Zhang, X., Liu, J., & Zhang, Y. (2021). Assessment of the four latest long-term satellite-based precipitation products in capturing the extreme precipitation and streamflow across a humid region of southern China. *Atmospheric Research*, 257, 105554. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105554>
- Yang, L., Shi, Z., Liu, R., & Xing, M. (2024). Evaluating the performance of global precipitation products for precipitation and extreme precipitation in arid and semiarid China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130, 103888. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103888>
- Yousefi-Kebria, A., & Nadi, M. (2023). Evaluation of the accuracy of GPM satellite precipitation estimates: A case study in Mazandaran Province. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(3), 1–14. [in Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6232.1022>
- Yu, C., Hu, D., Liu, M., Wang, S., & Di, Y. (2020). Spatio-temporal accuracy evaluation of three high-resolution satellite precipitation products in the China area. *Atmospheric Research*, 241, 104952. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104952>
- Yuan, Y., & Liao, B. (2025). Evaluation of multi-source precipitation products for monitoring drought across China. *Frontiers in Environmental Science*, 13, 1524937. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1524937>
- Zhou, Z., Guo, B., Xing, W., Zhou, J., Xu, F., & Xu, Y. (2020). Comprehensive evaluation of the latest GPM era IMERG and GSMaP precipitation products over mainland China. *Atmospheric Research*, 246, 105132. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105132>



Response of Iranian Cloud Cover to Teleconnection Variability: A Study of 136 Synoptic Stations

Alireza Saadatmoghadasi¹, Zahra Aghashariatmadari^{2*} 

1. Ph.D. Student, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Engineering and Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2. Associate Professor, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Faculty of Engineering and Agricultural Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: zagha@ut.ac.ir

Keywords:

Components analysis, Indices, Cloud cover, East Atlantic, Iran plateau.

Received:

02 June 2025

Revised:

13 September 2025

Accepted:

03 October 2025

Introduction

Teleconnections organize large-scale climate variability by linking remote regions through wave dynamics, air–sea coupling, and chains of transient weather events. Beyond stationary Rossby-wave frameworks, recent studies have emphasized non-stationarity and intermittency. Cloud cover, which is central to the surface radiation budget and the hydrological cycle, is particularly sensitive to such large-scale controls over complex terrain. Iran’s juxtaposition of the Zagros Mountains, the Iranian Plateau, and Caspian and coastal zones demands methods that preserve phase information and nonlinear structure. Accordingly, we aim to quantify the joint effects of fifteen teleconnection indices on cloudiness over Iran and to assess whether a phase-aware, rotation-based kernel framework can reveal interpretable signals for applications in seasonal outlooks and resource planning.

Materials and Methods

Monthly cloud-cover data from 136 synoptic stations covering the period 1979–2023 were quality controlled and normalized, with ERA5 fields used to provide reanalysis context and for compositing. We applied the ROCK-PCA pipeline:

How to cite this article:

Saadatmoghadasi, A. & Aghashariatmadari, Z.(2026). Response of Iranian Cloud Cover to Teleconnection Variability: A Study of 136 Synoptic Stations. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 57-78. [10.22077/jdcr.2025.9514.1148](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9514.1148)



(i) Hilbert analytic embedding to encode phase and lag information in complex form; (ii) kernel PCA with linear and Gaussian kernels to capture curved manifolds within a reproducing-kernel Hilbert space; and (iii) Varimax and Promax rotations to achieve simple-structure loadings and enhance component interpretability. Rotated component scores were correlated with the NAO, AO, PNA, EA/WR, SCAND, AMM, TNA, TSA, DMI, EP–NP, and other indices using Spearman’s rho, evaluated on annual and seasonal timescales. Statistical significance was assessed at $\alpha = 0.05$ with consideration of false discoveries. To examine dynamical consistency, we generated composites of geopotential height, winds, and humidity at 850, 700, and 500 hPa for key index phases and combinations (e.g., NAO+/EAWR+).

Result and Discussion


At the annual scale, the Tropical North Atlantic (TNA) emerges as the leading control on Iranian cloudiness, exhibiting coherent negative correlations that peak near $|r| \approx 0.49$ across approximately sixty stations. EP–NP ranks second (about 31 stations, $|r| \approx 0.45$), followed by EA/WR (around 20 stations, $|r| \approx 0.46$). At the seasonal scale, the North Atlantic Oscillation (NAO) is dominant, showing broadly positive associations (mean $r \approx 0.33$ across roughly 130 stations). The strongest spatial responses occur along the Zagros Mountains and over the southern–central plateau, whereas southeastern Iran displays mixed signals consistent with monsoonal influences. Composite diagnostics confirm physical plausibility: NAO+ and EA/WR+ phases jointly restructure the subtropical jet and storm-track pathways, producing belt-like reductions in cloud cover over Western and Central Europe and enhanced cloudiness over the Caucasus–Caspian corridor extending into Iran. Vertically, regions of increased cloudiness coincide with 500-hPa divergence and positive vorticity advection, 700-hPa moisture convergence, and 850-hPa surges in humidity.

Conclusion

Methodologically, ROCK-PCA integrates phase awareness, nonlinear manifold learning, and interpretable rotation—three properties that are rarely achieved together—yielding components that are both meteorologically coherent and operationally useful. Substantively, the analysis refines the teleconnection–cloudiness nexus over Iran: the TNA provides a persistent annual-scale control, the NAO governs seasonal modulation, and the EP–NP and EA/WR offer additional region-specific leverage through jet displacement and storm-track rephasing. These findings support the targeted use of teleconnection-conditioned forecasts for water-resource management, solar-energy planning, and climate-risk monitoring. Future efforts should assimilate satellite-based cloud products, examine kernel and hyperparameter sensitivity, adopt causal discovery approaches (e.g., PCMCI+), and embed ROCK-PCA outputs into S2S and machine-learning forecasting systems.



پاسخ ابرناکی ایران به نوسانات دورپیوندی: مطالعه‌ای بر ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک

علیرضا سعادت مقدسی^۱، زهرا آفاشریعتمداری^۲ 

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

*نویسنده مسئول: zagha@ut.ac.ir

چکیده

پدیده‌های دورپیوندی به‌عنوان الگوهای هم‌بستگی دوربرد، اثرگذاری در مناطق برون حاره با رویکردهای نوین داده‌کاوی دوباره پررنگ شده‌اند. در این پژوهش نقش همزمان ۱۵ شاخص دورپیوندی بر ابرناکی ایران نرمال سازی و کمی‌سازی شد. بدین‌منظور میانگین ماهانه ابرناکی ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک کشور طی ۱۹۷۹-۲۰۲۳ به کار رفت و با چارچوب Rock-PCA، همبستگی‌ها با چرخش Varimax و چرخش بازتولیدپذیر RKHS (با اسپیرمن) در دو مقیاس ماهانه و سالانه استخراج شد. نقشه‌های ترکیبی در سه سطوح ۸۵۰، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال با استفاده از نرم‌افزار پایتون ترسیم گردید. بیشترین اثر سالانه متعلق به TNA بود ($r \approx 0/33$ ایستگاه؛ $r \approx -0/49$ ؛ $p < 0/05$) و در مقیاس ماهانه NAO بر ۱۳۰ ایستگاه با میانگین $r \approx 0/33$ غالب بود. الگوهای مکانی با جابه‌جایی جت جنب‌حاره‌ای، تغییر مسیر توفان‌ها و انتقال رطوبت مدیترانه-دریای سرخ-خلیج فارس سازگار است؛ ترکیب +NAO+/EAWR کمربند کاهش ابر بر اروپای غربی-میانی و افزایش آن بر قفقاز-کاسپین و بخش‌هایی از ایران را تقویت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: آنالیز ترکیبی، شاخص‌ها، پوشش ابر، شرق اطلس، فلات ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۶/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۷/۱۱

مقدمه

پدیده «پیوند از دور» (Teleconnection) به منزله الگوهای همبستگی دوربرد در سامانه جو-اقیانوس، در دهه اخیر با رویکردهای نوین تحلیل داده و کشف روابط علی دوباره در کانون توجه قرار گرفته است. بر خلاف تبیین‌های کلاسیک مبتنی بر موج‌های رسوبی ایستا، مطالعات جدید نشان داده‌اند که بسیاری از این شاخص‌ها از زنجیره‌ای از رخدادهای هوا شناختی ناپایا بر مقیاس‌های همدیدی پدید می‌آیند؛ در نتیجه، سنجش اثرات شاخص‌های گوناگون (AO, NAO, ENSO/MEI/ONI, DMI, TSA, TNA, AMM, SCAND, EA/WR, PNA, AMO و غیره که در جدول یک توضیح داده شده است) بر متغیرهای اقلیمی باید هم‌زمان بر ماهیت زمانی-مکانی و برهم‌کنش‌های غیرخطی تکیه کند (Spens Berger, 2024; Weylandt and Swiler, 2024). در این میان، «پوشش ابر» یکی از مؤلفه‌های کلیدی تراز انرژی و چرخه هیدرولوژیک است و تغییرات آن می‌تواند به‌طور معناداری دما، بارش و فرین‌ها را دگرگون کند. شواهد تازه از مقیاس جهانی و منطقه‌ای نشان می‌دهد که کاهش ابرناکی، در بسیاری از نواحی خشکی‌زی، به افزایش تابش ورودی و گرم‌شدن تندتر منجر شده است (Liu et al., 2023; Wang et al., 2024). در ایران با توجه به رشد جمعیت و اثر تغییر اقلیم بر میزان خشکی و نیز روندهای معناداری که در ابرناکی گزارش شده، بر برنامه‌ریزی منابع آب و انرژی بیش از پیش بایستی اهمیت داده شود. با توجه به اینکه خشک‌سالی یکی از مهم‌ترین مسائل در دو دهه اخیر در کشور بوده است (Rashedi et al., 2024; Ramezani et al., 2024; Ahmadi et al., 2025 and Hajararian, 2025). با وجود نقش شناخته‌شده ENSO در کنترل بازخورد تابشی ابرها، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که فازها و شدت‌های متفاوت ENSO می‌تواند اثربخشی بازخورد

تابشی را بر هم زده و به ناهمگنی‌های مکانی قابل توجهی بینجامد (Jin et al., 2024). افزون بر آن، شاخص‌های اطلس شمالی و قطبی (NAO/AO) و نیز الگوهای پاسیفیک-آمریکای شمالی (PNA) و اسکاندیناوی (SCAND) می‌توانند مسیرها و شدت‌های انتقال موجی و ساختار ابرها را دگرگون کنند (Zhang et al., 2024; Park et al., 2024). در حوضه اطلس، نقش شاخص‌های مرتبط با دوقطبی اقیانوس هند (DMI) و محرک‌های مدیترانه‌ای و آتلانتیکی گرمسیری (EA/WR, EA, AMM, TNA, TSA) نیز در سال‌های اخیر با رویکردهای علی-آماري بازبینی شده و اهمیت برهم‌کنش‌های فرامنطقه‌ای بیشتر روشن گشته است (Carvalho-Oliveira et al., 2024; An et al., 2023; Sheng et al., 2023; Galytska et al., 2023). در نتیجه، مطالعه نقش هم‌زمان این شاخص‌ها بر ابرناکی ایران ضرورتی علمی و کاربردی دارد؛ خاصه آن‌که منطقه خاورمیانه در دهه اخیر یکی از بالاترین نرخ‌های گرم‌شدن را تجربه کرده است (Malik et al., 2024) و گزارش‌های اقلیمی اروپا / اوراسیا نیز تغییرات چشم‌گیر در الگوهای ابرناکی و ساعات آفتابی را مستند کرده‌اند (Schilliger et al., 2024).

شناسایی و پایش الگوهای ابرناکی یکی از ابزارهای کلیدی در درک فرایندهای جوی و تغییر اقلیم به‌شمار می‌آید. از این منظر، بررسی شاخص‌های اثرگذار برجو و سایر متغیرهای اقلیمی می‌تواند به تبیین میزان تأثیر و شدت عملکرد دورپیوندی‌ها در شکل‌گیری و توزیع مکانی و زمانی ابرها کمک کند. در این چارچوب، نقش پدیده‌های دورپیوندی مختلف در افزایش یا کاهش ابرناکی در مناطق متنوعی همچون ایران، هیمالیا، چین و سایر نقاط جهان قابل ارزیابی است. افزون بر این، انتشار گازهای گلخانه‌ای و پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی، تغییرپذیری مکانی و زمانی دما و بارش را تشدید کرده و از این طریق بر تغییر الگوهای بارشی، دمایی و ابرناکی

al., 2020). افزوده شدن چرخش وریمکس و آزمون‌های همبستگی با شاخص‌های دورپیوندی اجازه می‌دهد سهم نسبی هر شاخص در توضیح تغییرپذیری ابرناکی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه برآورد شود؛ ضمن آن‌که تحلیل‌های مکمل مکانی-زمانی می‌توانند پیوندهای با تأخیر زمانی را آشکار کنند (Rieger et al., 2021).

در این پژوهش از ۱۳۶ ایستگاه سینوپتیک کشور با میانگین ماهانه ابرناکی در بازه زمانی ۱۹۷۹ الی ۲۰۲۳ به مدت ۴۵ سال و تمامی ماه‌های سال با استفاده از داده‌های ERA5 اتحادیه اروپا نرمال‌سازی داده‌ها انجام و اثر ۱۵ شاخص دورپیوندی بر روی آنها با روش جدید ROCK-PCA انجام شده است. از مزایای این روش کشف روابط غیرخطی پنهان در داده‌های اقلیمی، کاهش بُعد داده‌ها همراه با حفظ ساختار غیرخطی، تفسیر بهتر به‌خاطر مرحله‌ی rotation (مثل varimax) را می‌توان نام برد. در جدول ۱ معرفی شاخص‌های دورپیوندی مورد استفاده در پژوهش و سایر توضیحات نشان داده شده است.

تأثیرگذار بوده‌اند (Hussain et al., 2021; Kambezidis et al., 2024; Cardenas et al., 2020; Chitrikova et al., 2023; Sundararajan et al., 2021; Pi et al., 2020; Meidani and Araghinejad, 2014; Zohrabi et al., 2020; Foroozan et al., 2020).

از منظر روش‌شناختی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA)^۱ همچنان ابزار بنیادین کاهش بُعد و کشف ساختارهای هم‌بسته در اقلیم‌داده‌های چند متغیره است؛ با این حال، محدودیت‌های قیود و خطی بودن در PCA کلاسیک، به‌ویژه در حضور روابط ناپایا، غیر ایستا و غیرخطی، می‌تواند به الگوهای کم‌معنا بینجامد. کارهای نوین در خانواده «PCA پیشرفته» بر بهره‌گیری از روش‌های تنک، غیر منفی، چرخش‌های مبتنی بر معیارهای تفسیربخشی تأکید می‌کنند (Weylandt and Swiler, 2024). در همین راستا، رویکرد ROCK-PCA^۲ به‌عنوان یک چارچوب غیرخطی و استوار معرفی شده که با نگاشت هسته‌ای/غیرخطی، نرمال‌سازی مقاوم، و چرخش وریمکس، هم بارهای عاملی تفسیرپذیرتر و هم نمره‌مؤلفه‌های واقع‌گرایانه‌تری تولید می‌کند (Bueso et

جدول ۱. فهرست شاخص‌های دورپیوندی مورد استفاده در پژوهش

Table 1: List of teleconnections for this study

ردیف	توضیحات
AMO	Atlantic Multidecadal Oscillation
NAO	North Atlantic Oscillation
PDO	Pacific Decadal Oscillation
ENSO	Elnino Southern Oscillation
AO	Arctic Oscillation
SCAND	Scandinavian Index
PNA	Pacific North America
QBO	Quasi Biennial Oscillation
SOI	Southern Oscillation Index
TNA	Tropical North America
TSA	Tropical South America
DMI	Dipole Multivariate Index
EP-NP	East Pacific-North Pacific
MEI	Multivariate Enso Index
ONI	Oscillation Nino Index

مواد و روش‌ها

محاسبه روش جدید^۱ Rock-PCA به شکل ذیل می‌باشد:

ROCK-PCA تعمیمی از EOF/PCA است که سه مورد را هم‌زمان انجام می‌دهد: (۱) کدگذاری فاز/تأخیر با تعبیه مختلط مبتنی بر انتقال هیلبرت، (۲) مدل‌سازی غیرخطی با نگاشت کرنلی به فضای هیلبرت بازتولیدپذیر^۲ (RKHS)، و (۳) تفسیرپذیری با چرخش (Varimax/ProMax). این چارچوب، وقتی کرنل خطی باشد، به تابع متعامد تجربی^۳ complex/EOF/PCA فروکاسته می‌شود و وقتی کرنل غیرخطی است، ساختارهای خمیده/غیرخطی را نیز می‌گیرد.

۱- ترکیب مختلط هیلبرت:

برای هر ستون سری زمانی $X(t) = x(t)$ (هر ایستگاه/متغیر)، انتقال هیلبرت را روی محور زمان اعمال می‌کنیم:

$$Z = X + iH[X] \in C^{T \times M} \quad (1)$$

$$H[X] \in R^{T \times M} \quad (2)$$

که در آن $X(t)$ زمانی حقیقی هر ایستگاه، H عملکرد هیلبرت بر محور زمان، Z سیگنال تحلیلی، $C^{T \times M}$ ماتریس داده مختلط است.

۲- مرحله دوم یک کرنل مثبت معین $k = (0,0)$ (گوسی، پلی‌نومی و خطی) و نگاشت $H \times PC: \emptyset$ به RKHS انتخاب می‌شود. هر برش زمانی سطر (t) از Z یک نمونه است که به شکل ذیل محاسبه شده است:

$$K_{t,t'} = k(z_t, z_{t'}), K \in C^{T \times T} \quad (3)$$

وقتی که k خطی است این مرحله معادل EOF/PCA Complex است که برای تمرکز پیدا کردن بر روی RKHS از فرمول ذیل استفاده خواهد شد:

$$K = HKH \quad (4)$$

$$H = I_T - \frac{1}{T} 11^T$$

که در آن H ماتریس مرکز سازی، K کرنل مثبت معین و T متغیر زمان است.

۳- محاسبه KPCA (صورت دوگانه و نمرات بارگذاری شده بدون چرخش و به شکل استاندارد از طریق فرمول ذیل محاسبه خواهد شد):

$$\frac{1}{T} KU_p = \lambda_p u_p, U^*U = I, \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq 0, \quad (5)$$

که در آن λ بردار و مقدار ویژه، T متغیر زمان و U و U_p ضرایب دوگانه و بارگذاری نمونه‌ای مکانی معرفی می‌شوند.

و مرحله آخر چرخش ترکیبی برای تفسیرپذیری (Varimax, Promax) برای رسیدن به ساختار ساده و تفسیر داده از فرمول‌های ذیل استفاده شده است:

$$B = WT, \quad S = AT, \quad (6)$$

که در آن T متعامد در روش Varimax است و در روش Promax مایل نیز می‌تواند باشد. معیار وریمکس در رابطه γ بر حسب اندازه دوم بارگذاری‌ها به صورت ذیل بیشینه می‌شود:

$$\max T \varphi(T) = \sum_{p=1}^P \left[\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |b_{jp}|^4 \right] - \quad (7)$$

$$\left(\left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M |b_{jp}|^2 \right)^2 \right), B = WT, b_{jp} \in C$$

¹ Reduction of Components via Kernels/Nonlinearities + Orthogonal rotation + Component

² Principal Components Analysis

³ Empirical Orthogonal Function

ایستگاه‌های شرق کشور به‌رنگ نارنجی، ایستگاه‌های نیمه شمالی به‌رنگ سبز و ایستگاه‌های نیمه جنوبی کشور نیز به‌رنگ قرمز قابل مشاهده است. ایستگاه‌های فلات مرکزی نیز به‌رنگ صورتی در نقشه نمایش داده شده است. توچال با ۳۷۴۷ متر بلندترین ایستگاه و انزلی با ۲۳/۶- به‌عنوان کم‌ارتفاع‌ترین نقطه شناسایی شدند. همچنین ایستگاه‌های آبدلی، آشتیان، دماوند، اقلید، فریدون‌شهر، منشاد، میگون، شهرکرد و سپیدان به‌عنوان ایستگاه‌های بالای ۲۰۰۰ متر ارتفاع از سطح دریا در پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. سایر ایستگاه‌ها در دامنه ارتفاع ۲۲- تا ۱۹۸۰ متر از سطح دریا در نقشه قابل مشاهده هستند.

که در آن b_{jp} قدر مطلق مختلط، ستون‌های B مدهای مکانی چرخیده و ستون‌های S مقدار pc های زمانی چرخیده هستند. T در فرمول ۷ ماتریس چرخش، $B=WT$ بارگذاری‌های چرخیده، و $S=AT$ نمرات زمانی چرخیده در رابطه ۶ محسوب می‌شوند. شواهد نظری و محاسباتی نشان داده است که چرخش و ریمکس افزون بر تفسیرپذیری بهتر، معناداری آماری محورها را هم بهبود می‌دهد: تحلیل‌های نامتعامل نیز در صورت نیاز برای همبستگی بین عوامل کارایی دارد (Bueso et al., 2022; Marukatat S., 2023; Matsuki et al., 2023; Javorskyi et al., 2024; Rohe K and Zeng M., 2023; Cap J., 2024; Fang et al., 2024 and Akhtar-Danesh N., 2023).

در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. ایستگاه‌های غرب کشور به‌رنگ آبی،

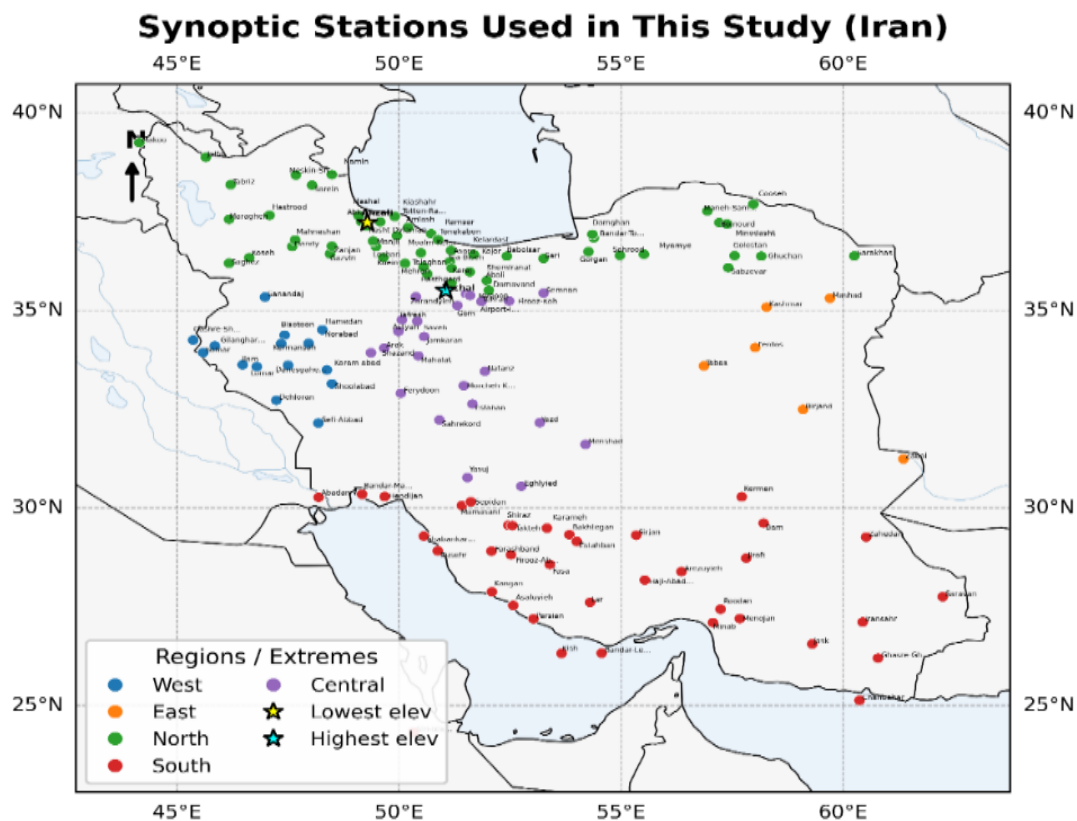


Fig1. The location of the synoptic stations for this study

ضریب همبستگی اسپیرمن

با استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن، درجه همبستگی مولفه ابرناکی با دورپیوندی‌ها انجام شده است. استفاده از این ضریب با توجه به اینکه توزیع آماری در آن آزاد است برای چنین پژوهش‌هایی مناسب‌تر است. فرمول ضریب همبستگی اسپیرمن به شرح ذیل است (Yang et al., 2022):

$$R_s = \text{Pr}(X), R(Y) = \frac{\text{cov}(R(X), R(Y))}{\sigma R(X)\sigma R(Y)} \quad (8)$$

که در آن R_s مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن را نشان می‌دهد، $\text{Cov}(X, Y)$ کوواریانس متغیرهای دسته بندی شده و $\sigma(X)$ و $\sigma(Y)$ انحراف از معیار متغیرهای طبقه بندی شده را نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

در شکل ۲ نمودارهای تحلیل سالانه اثر دور پیوندی بر مولفه ابرناکی نشان داده شده است. نمودار دارای چهار بخش a, b, c, d است. نمودار a اسکری پلات، b چرخش و ریمکس، c نقشه حرارتی RPC1-6 ها با دورپیوندی و d نمودار فراوانی بیشترین تأثیر دورپیوندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش را نمایش داده است. نمودارهای اطلس در چرخش و ریمکس در RPC1 مشاهده می‌شوند. در نمودار فراوانی نیز شاخص گرمسیری شمال اطلس TNA بیشترین تأثیر و همبستگی را بر روی مولفه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش نشان داده است. ۶۰ ایستگاه همبستگی ۰/۴۹- را با شاخص مذکور در سطح معنی‌داری $0.05 <$ نشان دادند که در جدول ۲ قابل مشاهده است. از جمله ایستگاه‌هایی که می‌توان نام برد در نیمه شمالی آبکنار، انزلی، بابلسر، املش، بندر ترکمن، گرگان و گلستان، در دامنه‌های البرز شمالی-جنوبی و غربی-شرقی ایستگاه‌های مانند کوئین، دندی، دماوند، قزوین، کجور، میگون، میامی، شمیرانات، سیاه‌بیشه،

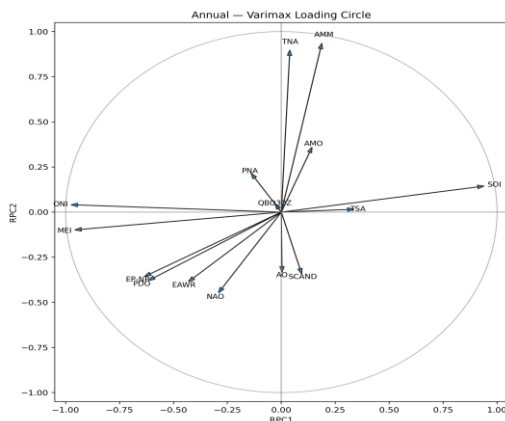
طالقان، زنجان و توجال می‌باشند. در شمال شرق کشور ایستگاه سبزوار و بیرجند و در شمال غرب کشور نمین در استان اردبیل در کنار مشکین‌شهر، و نطنز در اصفهان از استان‌های فلات مرکزی بیشترین همبستگی مولفه ابرناکی را با شاخص گرمسیری شمال اطلس نشان دادند.

در نیمه جنوبی کشور سپیدان فارس، بیشترین همبستگی را با شاخص مذکور نشان دادند این مقدار ۰/۳۹- محاسبه شده است. آرزوئیه در کرمان با مقدار ۰/۳۰- در رتبه بعدی قرار دارد ضمن اینکه مابقی ایستگاه‌های واقع در جنوب کشور همبستگی ضعیف کمتر از ۰/۲۳- درصد را با شاخص مذکور نشان دادند که یکی از علت‌های آن می‌تواند اقلیم متفاوت این منطقه با سایر نقاط باشد که تحت تأثیر دورپیوندی‌های دیگر از جمله دوقطبی اقیانوس‌هند، جریانات موسمی هند، شاخص زیر فصلی مادن و جولیان و رژیم بارشی متفاوت برخی ایستگاه‌ها از جمله سراوان، جاسک، زابل، حاجی‌آباد هرمز، بوشهر، شبانکاره، کیش، جزیره‌سیری، بخش‌هایی از کرمان، جیرفت، لار و بندر کنگان، رودان، میناب، منوجان، استهبان و فراه‌سبند، قصرقند و فیروز آباد و سایر مناطق مورد مطالعه در این بخش باشد. در غرب کشور ایستگاه مهران بیشترین همبستگی را با شاخص مذکور نشان داد و عدد ۰/۴۷- را به ثبت رساند. همدان در رتبه بعدی بیشترین تأثیر دورپیوندی مذکور بر روی مولفه ابرناکی مقدار ۰/۴۴- را به دست آورد. پس از آن بیستون و سنندج و کرمانشاه به‌طور مشترک با مقدار ۰/۳۹- و سقز در استان کردستان با مقدار ۰/۳۸- در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

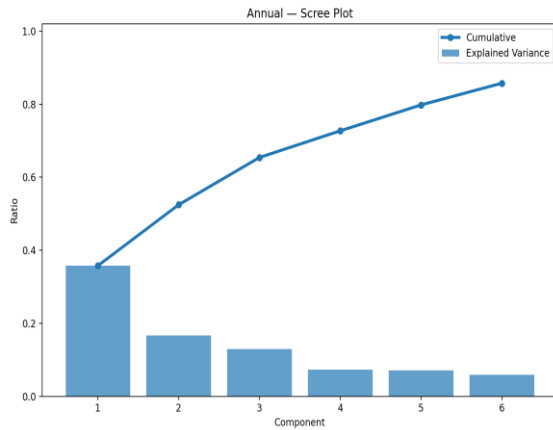
سایر ایستگاه‌های واقع در غرب کشور از جمله دهلران، قصر شیرین، ایلام، گیلان غرب همبستگی بین ۰/۲۸- تا ۰/۳۴- را نشان دادند. رتبه دوم به شاخص EP-NP تعلق دارد که ۳۱ ایستگاه مطابق جدول ۲ با میانگین همبستگی ۰/۴۵ در سطح معنی‌داری اشاره شده در بالا را نشان دادند. و رتبه سوم به شاخص غرب اطلس-شرق

فراز اوراسیا را دچار تغییرات می‌کند و از راه تعدیل مسیرهای توفان و جریانات همگرا بر رطوبت و ابرناکی ایران اثر می‌گذارد. EAWR الگوی بلاکینگ شرق اروپا-قفقاز / دریای خزر را کنترل می‌کند؛ تغییرات در بسامد بلاکینگ و جابه‌جایی ناوه مدیترانه‌ای به‌طور مستقیم روی ابرناکی شمال غرب تا شمال شرق ایران اثر دارد (Akhtar-). Danesh, 2023; Rohe and Zeng, 2023 سایر دورپیوندی‌ها اثر بسیار جزئی روی مولفه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان دادند.

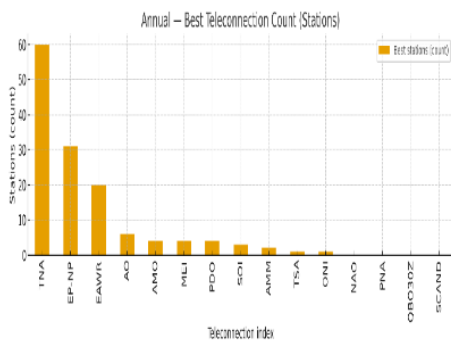
روسیه اختصاص دارد که میزان ۲۰ ایستگاه با میانگین همبستگی ۰/۴۶- را به ثبت رسانده‌اند. از عمده دلایل تأثیر شاخص TNA می‌توان بیان نمود که با تعدیل و اچرخند جنب‌حاره، سلول هادلی و انتقال بخار آب روی پهنه خاورمیانه، مسیر و فراوانی ناوه‌ها / پشته‌ها و رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال ایران را تغییر می‌دهد؛ بنابراین در بیشترین ایستگاه‌ها اثر منسجم نشان می‌دهد. EP-NP با امواج راسبی حاره به عرض میانه و تغییر جریان جتی آرام-شمالی، الگوی پرفشار / کم‌فشار بر



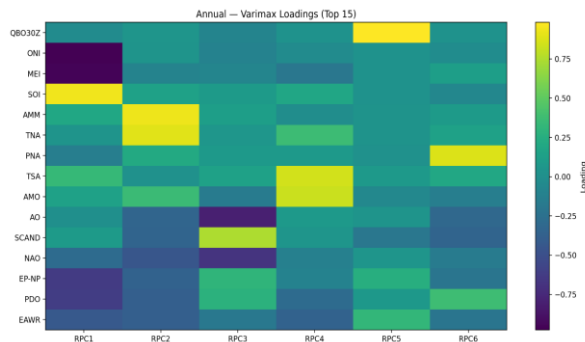
(ب)
b)



(الف)
a)



(د)
d)



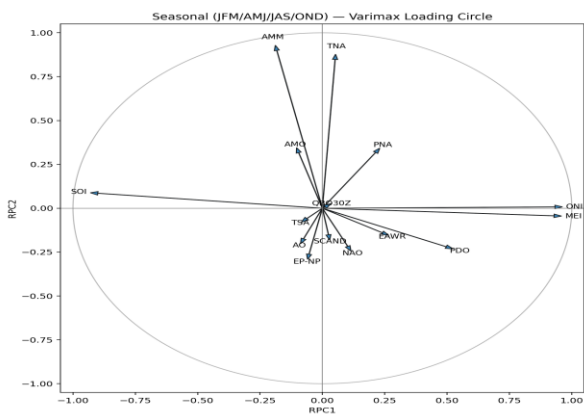
(ج)
c)

شکل ۲. نمودار اسکرپی پلات، وریمکس و نقشه حرارتی تحلیل اثر سالانه دورپیوندی بر میانگین سالانه ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه
Fig 2. Scree-plot, varimax loading, and heatmap graph of annual teleconnection impact on the annual mean cloudiness in the studied stations

جدول ۲. فهرست بهترین ایستگاه‌ها با درصد همبستگی با دور پیوندی (میانگین سالانه)

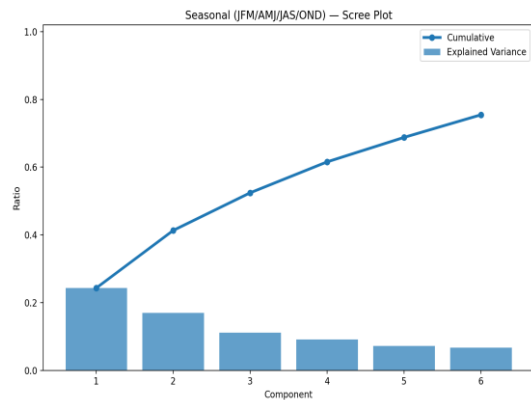
Table 2. The best stations with percent correlation of teleconnection (Annual mean)

شاخص Index	تعداد ایستگاه (N) Number of stations	سطح معنی‌داری ($p < 0.05$) Significance level	همبستگی (Spearman) R-Mean Spearman correlation
TNA	60	60	-0.49
EP-NP	31	31	0.45
EAWR	20	20	0.46
AO	6	4	0.32
AMO	4	4	-0.50
MEI	4	4	0.50
PDO	4	4	0.47
SOI	3	3	0.45
AMM	2	2	0.39
TSA	1	1	0.50
ONI	1	1	0.33
NAO	0	0	0.00
PNA	0	0	0.00
QBO	0	0	0.00
SCAND	0	0	0.00



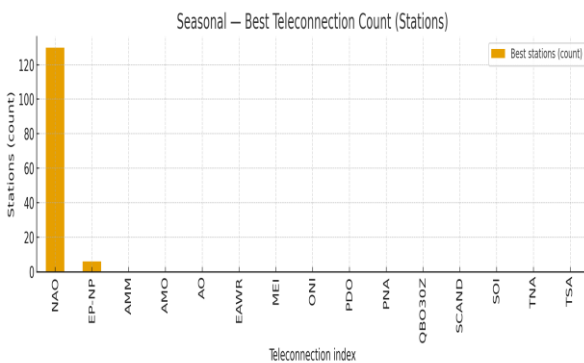
(ب)

b)



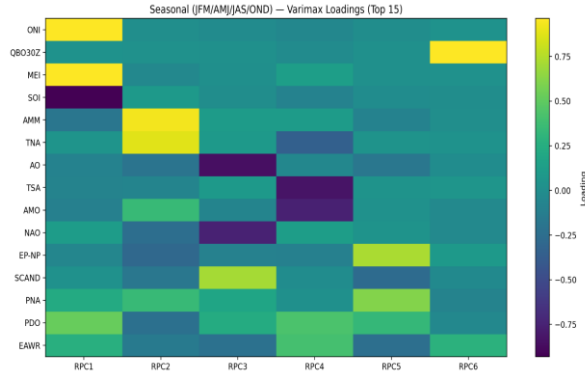
(الف)

a)



(د)

d)



(ج)

c)

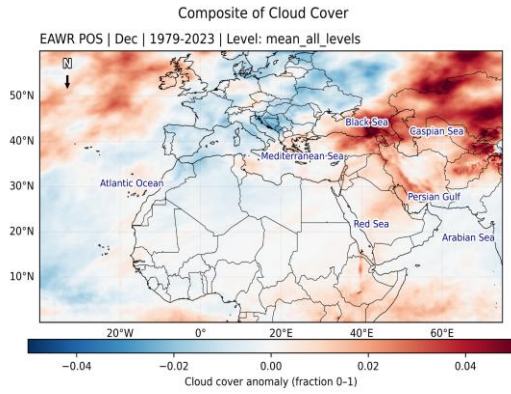
شکل ۳. نمودار اسکری پلات، وریمکس و نقشه حرارتی تحلیل اثر فصلی دور پیوندی بر میانگین فصلی ابرناکی ایستگاه‌های مورد مطالعه
Fig 3. Scree-plot, varimax loading, and heatmap graph of impact of seasonal teleconnection impact on the seasonal mean cloudiness in the studied stations

فاز مثبت آفرین باشد این مهم تأثیر چشمگیری دارد، از جمله مونسون هند در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ که حتی به سبب بالا آمدن کمربند حاره‌ی تا منطقه امامزاده داود تهران در سال ۱۴۰۱ شمسی در تابستان سبب سیل و رخداد‌های مخاطره‌آمیز در این مورد شده است. به طور کلی شاخص‌های منطقه اطلس در برهمکنش با شاخص‌های اقیانوس آرام از جمله EP-NP اثرگذار در تغییر در موقعیت‌قدرت جت جنب‌حاره‌ای، انتشار و شکست امواج راسبی، تغییر در جابه‌جایی رطوبت از مدیترانه-دریای سرخ-خلیج فارس و کاهش یا افزایش همرفت در جلوی ناهه‌ها هستند. رژیم‌های خاص مسیر توفان اقیانوس اطلس (storm-track regimes) به‌ویژه در زمستان می‌توانند با ایجاد جریان‌های ورتکس قطبی در شرق مدیترانه، فرکانس سامانه‌های بارشی و در نتیجه پوشش ابر را روی ایران افزایش بدهند؛ در تابستان، نقش TNA/AMM از طریق تنظیم گرادیان فشار سطح در اطلس گرمسیری و فرا رفت رطوبت ضعیف دیده می‌شود، که با توجه به استقرار واچرخند جنب‌حاره و رژیم بارشی مدیترانه‌ی در اغلب نقاط کشور این مهم انکارناپذیر است (Sandler et al., 2024; Molteni et al., 2023; Strand et al., 2022; Vazques et al., 2023; Rivosecchi et al., 2024; Cheng et al., 2024; Halifa et al., 2024 and Shaw et al., 2024).

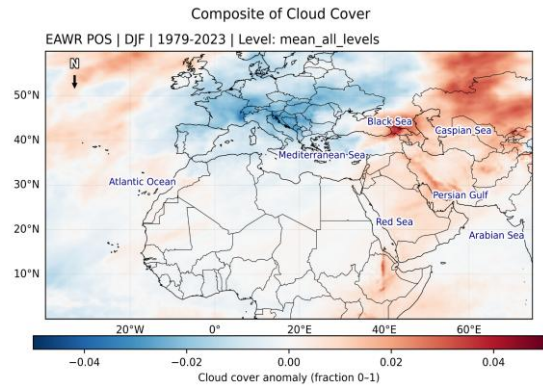
در ادامه به بررسی ترکیب (Composite) اثرات سالانه، فصلی و ماهانه سه شاخص تأثیرگذار یعنی NAO, TNA, EAWR و برهمکنش آنها در سطوح ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و میانگین ابرناکی سه سطوح پرداخته می‌شود. لازم به توضیح است که موارد حدی و تأثیرگذار بر سه سطح نام‌برده شده مورد تحلیل و بحث و بررسی واقع شده است.

در شکل ۳ نمودارهای تحلیل فصلی اثر دور پیوندی بر مولفه ابرناکی نشان داده شده است. نمودار دارای چهار بخش a, b, c, d است. نمودار a اسکری پلات، b چرخش وریمکس، c نقشه حرارتی RPC1-6 ها با دور پیوندی و d نمودار فراوانی بیشترین تأثیر دور پیوندی در ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش را نمایش داده است. بیشتر دور پیوندی‌های اطلس در چرخش وریمکس در RPC2 مشاهده می‌شوند. نکته بسیار جالب توجه در نمودار فراوانی تأثیر بسیار چشمگیر شاخص اطلس شمالی در فصول مختلف ایستگاه‌های مورد مطالعه پژوهش است، که در چرخش وریمکس (شکل b) در RPC1 قرار گرفته است. این در حالی است که در تحلیل میانگین سالانه ابرناکی اثر صفر را داشته است. ۱۳۰ ایستگاه با میانگین کلی ۰/۳۳ همبستگی مثبت را با شاخص اطلس شمالی نشان دادند. در خصوص شاخص نوسان اطلس شمالی بایستی بیان شود که اثرات فصلی NAO در جریان‌های فصلی در غرب، فلات مرکزی ایران به لحاظ آماری انکارناپذیر است و تأثیر به‌سزایی در ابرناکی این منطقه دارد. تنها ۶ ایستگاه سروان، قصرقند، جاسک، چابهار در جنوب شرق کشور و رامسر و کیاسر در سواحل غربی کاسپین (خزر) با شاخص EP-NP همبستگی به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۲۸، ۰/۳۰، ۰/۳۸، ۰/۳۹ و ۰/۳۶ را با شاخص شرق آرام- شمال آرام نشان دادند.

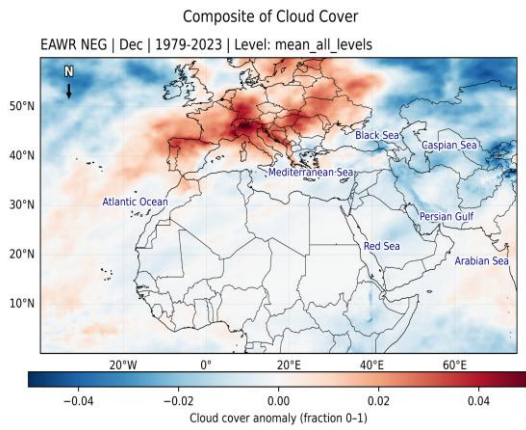
از دلایل عمده می‌توان به رژیم بارشی متفاوت در جنوب شرق کشور اشاره کرد که طبق طبقه‌بندی کوپن و گایگر مدیترانه‌ی و شبه مدیترانه‌ی است و در فصول گرم سال مانند تابستان در منطقه در اثر جریانات موسمی هند خصوصاً در زمان‌هایی که شاخص‌های نصف‌النهاری اطلس مثل AMM و خود شاخص کلان مقیاس AMO در



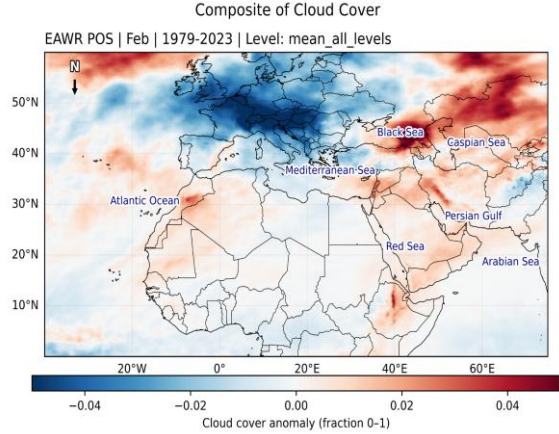
(ب)
b)



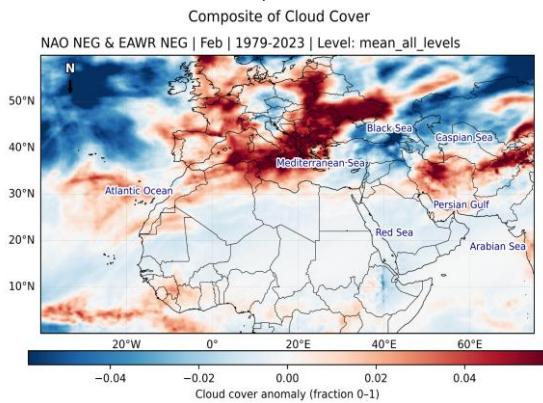
(الف)
a)



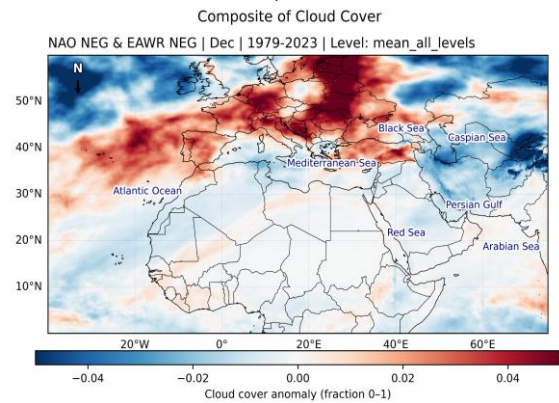
(د)
d)



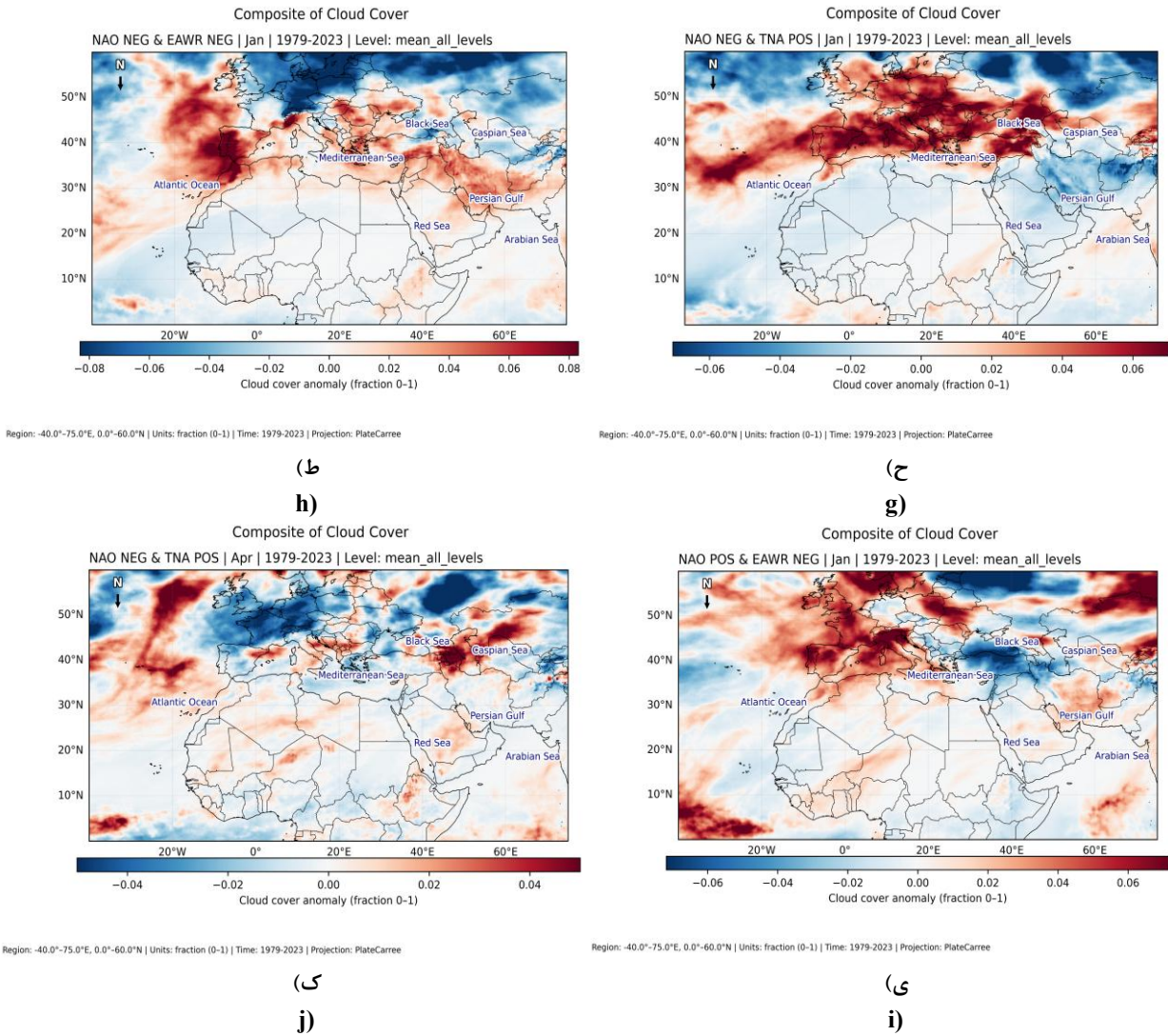
(ج)
c)



(و)
f)



(ه)
e)



شکل ۴. بررسی ترکیب اثر دورپیوندی‌های NAO, TNA, EAWR بر میانگین ابرناکی سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ هکتوپاسکال
Fig 4. Investigation of the impact of the merged teleconnections of NAO, TNA, and EAWR on mean cloudiness in three levels of 500,700, and 850hpa

که موسوم به سطح زمین است) ابرهای ارتفاع پایین حساس به فرا رفت سرد روی دریا و وارونگی لایه مرزی با همگرایی رطوبت با صعود کوهستانی و قطاع گرم جبهه بارشی باعث تشکیل ابرهایی از جنس استراتوکمولوس خواهد شد. شکل ۴ دارای ۱۰ قسمت است که به ترتیب از a تا z نام‌گذاری شده است.

در شکل (a) آذرماه تا بهمن‌ماه (دسامبر تا فوریه) فاز مثبت شرق اطلس - غرب روسیه (EAWR) با پشته پر ارتفاع بر اروپای غربی و ناوه بر روسیه شناخته می‌شود؛

در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (تراز میانی) ابرهای سیروس (پرسا چنگکی) با واگرایی سمت راست ورودی جت‌استریک و تاخت‌وتاز موجی تقویت می‌شود؛ در جو فشار ناورد (باروکیلینک) چتر ابری عمیق از تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال تا ۸۵۰ در سطح زمین تشکیل خواهد شد. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال ابرهای میانی با بیشینه در نوارهای جبهه‌ی و کم فشارهای مدیترانه پاسخ مستقیم به صعود و همگرایی در رطوبت منتقل شده به این تراز است. در تراز ۸۵۰ (سطح زمین ارتفاع ۱۴۷۰ متری از سطح دریا

فرو نشینی و آنتی-سیکلون سطحی در اروپا کاهش ابر را به صورت کمربند آبی از فرانسه تا ایتالیا و بالکان ایجاد می‌کند؛ در شرق دریای سیاه-کاسپین، ناوه عمیق و واگرایی تروپوپاز، افزایش ابر و نوار قرمز را ایجاد کرده است. نیمه غربی ایران افزایش انومالی رشد ابر را بیشتر از سایر نقاط نشان می‌دهد. در شکل (b) میانگین سه سطح ذکر شده در بالا در آذرماه (دسامبر) در فاز مثبت شاخص شرق اطلس-غرب روسیه مشاهده می‌شود، مرکز کم‌ارتفاع بر روی اروپای غربی-مرکزی و پشته بر روسیه غربی مستقر می‌شود؛ جابه‌جایی کمربند جبهه‌ای و تقویت واگرایی بالایی بر فراز مدیترانه مرکزی باعث صعود گسترده و افزایش ابر از ایبری تا بالکان می‌شود؛ در مقابل، بر روی دریای سیاه-خزر و شمال اقیانوس اطلس، فرو نشینی هوا، کاهش ابر را رقم می‌زند. در فلات ایران شمال غرب، غرب و دامنه‌های زاگرس جنوبی بیشترین آنومالی منفی ابرناکی را نشان داده‌اند.

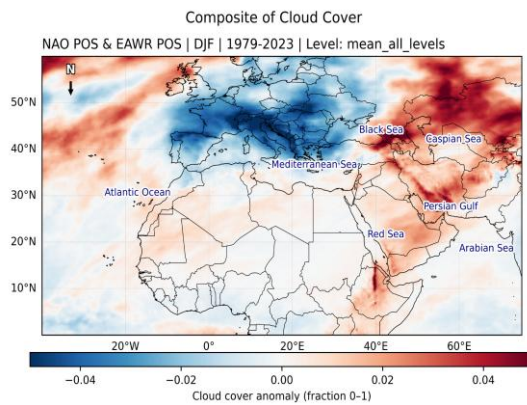
شکل (c) آنومالی ابرناکی ماه بهمن (فوریه) را نمایش داده است. تقویت گرادیان شدید جت و مهاجرت شرق سو الگوی پشته-ناوه، کاهش ابر را بر اروپای میانی تشدید می‌کند، در حالی که بر پیرامون قفقاز و خاورمیانه ابرناکی افزایش می‌یابد؛ این در چارچوب تقویت فرا رفت و چرخندگی مثبت در جلوی ناوه شرق مدیترانه قابل توجه است. بیشترین آنومالی مثبت ابرناکی در دامنه‌های زاگرس مرکزی در استان‌های فارس، بوشهر، ایلام، کرمانشاه، چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد مشاهده می‌شود. در شکل (d) وضعیت فاز منفی شاخص شرق اطلس-غرب روسیه در آذرماه نشان داده است. نکته جالب توجه این است که در فاز مثبت سواحل شرقی خزر با کاهش ابرناکی مواجه خواهند شد. شکل (e) فاز ترکیبی نوسان اطلس شمالی و شرق اطلس-غرب روسیه را به تصویر کشیده است. جت استریم در این ترکیب به عرض‌های جنوبی‌تر نقل مکان کرده است، در نتیجه افزایش

ابر در جنوب اروپا و شبه جزیره ایبری کاملاً مشهود است که این وضعیت ادامه داشته و پهنه وسیعی از فلات مرکزی ایران را فراگرفته است که به علت واگرایی بالایی در جلوی ناوه‌های عرض‌های میانه و همگرایی رطوبت در ۷۰۰ تا ۸۵۰ هکتوپاسکال ارتباط دارد. تنها در شمال شرق این مسئله دیده نمی‌شود که مربوط به جریانات آنتی-سیکلونی در فلات ترکمنستان است. در شکل (f) ترکیب نوسان اطلس شمالی (فاز منفی) و شرق اطلس-غرب روسیه (فاز منفی) را نشان داده است. در بهمن‌ماه پوشش ضخیم ابر پیوسته از اسپانیا تا بالکان نشان‌دهنده صعود قوی جبهه گرم و چرخنده‌زایی مدیترانه است؛ حجم ابر افزایش می‌یابد و بیشینه پاسخ در ۷۰۰ هکتوپاسکال انتظار می‌رود. نکته جالب توجه آنومالی بسیار مثبت ابرناکی (>0.04) در بخش‌هایی از ارتفاعات البرز شمالی و دامنه‌های البرز جنوبی استان‌هایی هم‌چون تهران، البرز، قزوین، و همچنين مناطق کویری قم، اصفهان، سمنان است که در این ترکیب فازی مشاهده می‌شود. در شکل (g) عکس قضیه صادق است.

بررسی ترکیب فازی فوق در آذرماه (دسامبر) نشان می‌دهد تأثیر دورپیوندی ماه به ماه و فصل به فصل متفاوت است و ممکن است در یک‌ماه آن ترکیب اثر مثبت و در ماه دیگر اثر منفی بر مولفه مورد بررسی (در اینجا میانگین ابرناکی) داشته باشد. در شکل (h) ترکیب NAO منفی و TNA مثبت است. الگوی TNA یکی از استخرهای سه‌گانه شاخص بزرگ مقیاس AMO است که تأثیر به سزایی در الگوی ابرناکی خاورمیانه و ایران دارد. این الگو که اختلاف گرادیان دمایی بین آب‌های شمال گرینلند با نام TNA و جنوب آن به نام TSA معروف است در کنار شاخص بزرگ مقیاس AMO الگوی سه‌گانه نامیده می‌شود. در این ترکیب فازی شمال و غرب اروپا تحت سیطره جت موسوم به سنت‌هلن اطلس واقع می‌شود که بارش و ابرناکی را برای آن مناطق به ارمغان می‌آورد. در

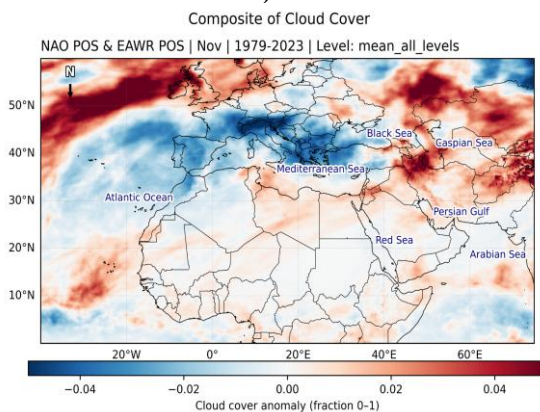
همراه است. نقش پشته غرب روسیه (EAWR-) در شکل‌گیری ناوه عمیق‌تر بر اروپای غربی-مرکزی می‌تواند نوار افزایشی ابر از فرانسه تا بالکان را (طبق نقشه) مشخص کند، در حالی که در شرق مدیترانه کاهش ابر به چشم می‌خورد (Spens Berger C., 2024; Yu et al., 2024; Geng et al., 2024; Xu et al., 2024; Ionita et al., 2025; Zhang et al., 2024; Hou et al., 2025; Felsxhe et al., 2024; Luo et al., 2024; Svennevik et al., 2024; Hersbach et al., 2024; Rantanen et al., 2025; Beranova R., 2025; Rivosecchi A., 2024; Maycock, A.C., 2025).

شکل (i) بررسی NAO منفی و TNA مثبت در فروردین‌ماه است (آوریل). در استانهایی مانند اردبیل، آذر غربی و شرقی و شمال‌کردستان آنومالی بسیار مثبت افزایش شدت ابرناکی مشاهده می‌شود. تداوم شار رطوبت از منطقه‌ی حاره‌ی اطلس و تقویت واگرایی سطوح بالا در جلوه ناوه دریای سیاه و قفقاز سبب افزایش ابرناکی در این مناطق شده است. شکل آخر (j) ترکیب NAO مثبت با EAWR منفی است (دی‌ماه)، این ترکیب معمولاً با تقویت جت اقیانوس اطلس و انتقال محور مسیر طوفان به شمال



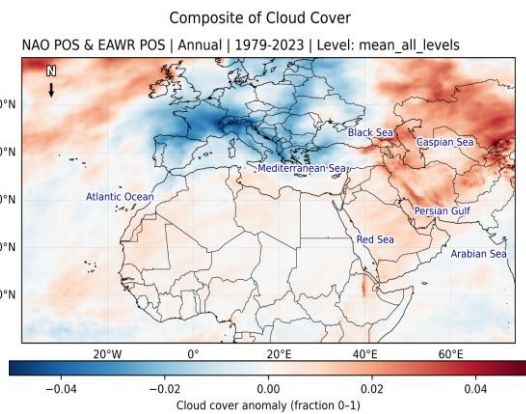
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ب)
b)



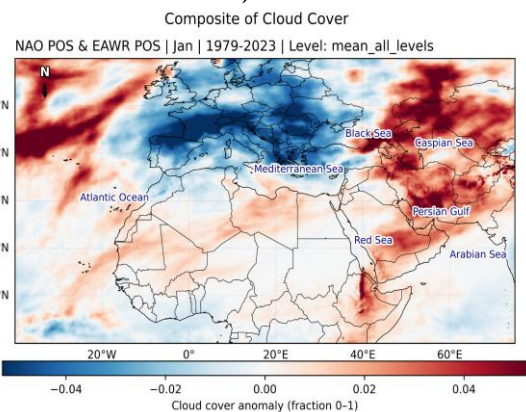
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(د)
d)



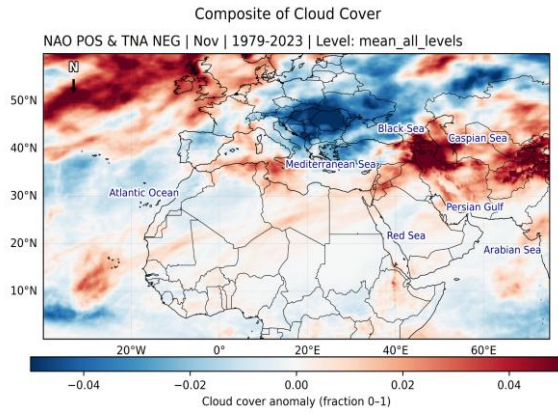
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(الف)
a)



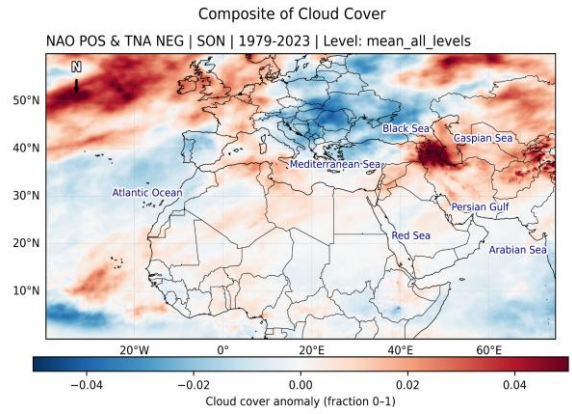
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ج)
c)



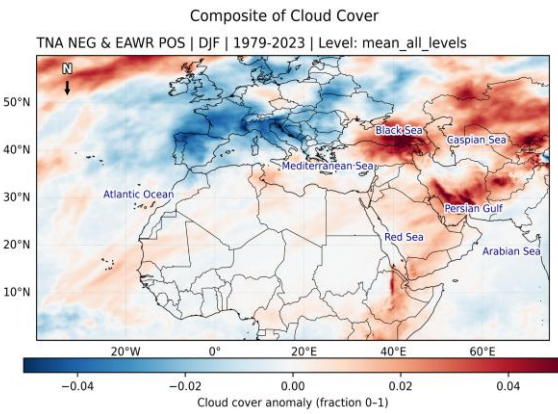
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ا)



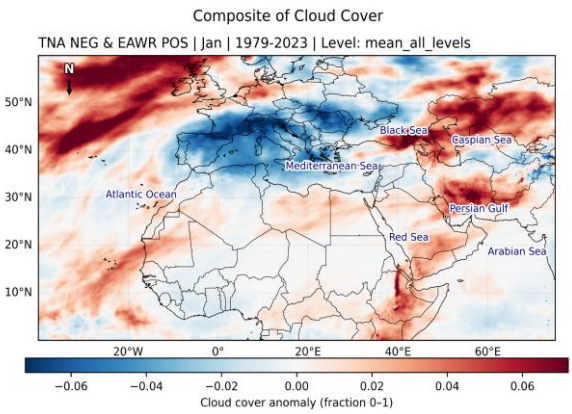
Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ب)



Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(ج)



Region: -40.0°-75.0°E, 0.0°-60.0°N | Units: fraction (0-1) | Time: 1979-2023 | Projection: PlateCarree

(د)

(ه)

(و)

شکل ۵. بررسی ترکیب اثر دورپیوندی‌های NAO, TNA, EAWR بر میانگین ابرناکی سه سطح ۵۰۰، ۷۰۰، ۸۵۰ هکتوپاسکال (بخش دوم)

Fig 5. Investigation of the impact of the merged teleconnections of NAO, TNA, and EAWR on mean cloudiness in three levels of 500,700, and 850hpa (section 2)

سه‌ماهه آذر تا بهمن (دسامبر تا ژانویه) با ترکیب فاز مثبت دو شاخص نمایش داده شده است. تقویت گرادیان جت اطلس و جنبه‌زایی حاشیه مدیترانه باعث کاهش ابر بر فرانسه، ایتالیا، بالکان و افزایش آن بر قفقاز-کاسپین می‌شود؛ کمبود ابر لایه‌پایین (۸۵۰ hPa) و میانی (۷۰۰ hPa) بر اروپا و افزایش ابر سیروس در (۵۰۰ hPa) در شرق مدیترانه از دیگر اثرات این ترکیب فازی است. در فلات ایران دوسوم جنوبی بیشینه تأثیر افزایش ابرناکی در سه‌ماهه حساس بارشی در کشور را به خود اختصاص داده است. و یک بیشینه تأثیر دیگر در مرز تمرچین و ارتفاعات

شکل (a) آنومالی ابرناکی سالانه در سه‌سطح ذکرشده با ترکیب نوسان اطلس شمالی در فاز مثبت و نوسان شرق اطلس- غرب روسیه در فاز مثبت را نشان می‌دهد. کمربند کاهش ابر در اروپای غربی-میانی قابل مشاهده است که با فرونشینی هوا در همین مناطق سازگاری دارد. همزمان در پیرامون دریای سیاه- کاسپین با توجه به فاز مثبت EAWR وجود پشته در اروپای غربی تا میانی در شرق الگو، چرخنده‌زایی سبب افزایش ابر در پهنه وسیعی از فلات ایران شده است، که بیشینه تأثیر آن در دامنه‌های زاگرس مشهود است. در شکل (b) آنومالی ابرناکی در

ابرناسکی را با مشکل مواجه می‌کند. در شکل (f) ترکیب فاز NAO مثبت و TNA منفی این بار در سه‌ماهه شهریور تا آبان (سپتامبر تا نوامبر) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که باز هم بیشینه تأثیر در شمال غرب ایران است. کمربند کاهش ابر در اروپای غربی و بالعکس افزایش آن در شبه جزیره بالکان تا قفقاز که ناشی از واگرایی ورودی سمت راست جت بر شرق مدیترانه است که صعود دینامیکی هوا و به دنبال آن افزایش ابرناکی را در سه سطح مورد بررسی پژوهش تشدید خواهد کرد.

در شکل (g) ترکیب فاز منفی TNA و EAWR مثبت در سه‌ماهه آذر تا بهمن (دسامبر تا ژانویه) نمایش داده شده است. حداکثر تأثیر در دامنه‌ها و ارتفاعات زاگرس مرکزی و جنوبی در فلات ایران قابل مشاهده است. و در آخر شکل (h) ترکیب بازهم دو فاز نام‌برده در بالا یعنی TNA منفی و EAWR مثبت در دی‌ماه (ژانویه) است که بازهم حداکثر تأثیر در دوسوم جنوبی فلات ایران قابل مشاهده است. نوار آبی در شکل کاهش کمربند ابرناکی را در شبه‌جزیره ایبری نشان داده است. این مورد نشان‌دهنده سیگنال قوی فرونشینی و نزول دینامیکی هوا در منطقه ذکر شده است که با جابه‌جایی مسیر طوفان به شمال، ابرناکی در سه سطح (۵۰۰ و ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال) کاهش چشمگیری دارد و صرفاً چتر ابر سیروس در جبهه‌های شرقی دور دست را تقویت خواهد کرد (Portal et al., 2024; Doiteau et al., 2024; Caporaso et al., 2024; Avolio et al., 2024; Gutierrez et al., 2024; Atkins et al., 2024; O'Reilly, 2025; Mitevski, et al., 2025; Dalelane et al., 2025; Hou et al., 2025; Diodato et al., 2025; Chen et al., 2024 and Post and Aun, 2024).

نتیجه‌گیری

از منظر روش‌شناختی، ROCK-PCA سه ویژگی که به‌ندرت به‌طور هم‌زمان فراهم می‌شوند—فاز آگاهی، یادگیری متعدد و متنوع غیرخطی، و چرخش

زاگرس شمالی به چشم می‌خورد، سایر مناطق نیز اثر افزایش نسبی ابرناکی را نیز به خود اختصاص داده‌اند. در شکل (c) ترکیب مثبت دو شاخص در دی‌ماه (ژانویه) را نشان می‌دهد. بیشینه فرونشینی هوا بر اروپای میانی همراه است؛ نوار آبی (کاهش ابرناکی) از ایبری تا بالکان نمایانگر تسلط واچرخندی سطحی و واگرایی تروپوپاز در خروجی چپ جت استریک اقیانوس اطلس شمال شرقی است؛ در شرق، ناوه پایدار (الگوی بندال) سبب ابرناکی زیاد پیرامون دریای سیاه می‌شود. در فلات ایران نیز دو بیشینه تأثیر افزایش ابرناکی در اثر برهمکنش فاز مثبت دو شاخص مشاهده می‌شود. یکی در سواحل غربی خزر و دیگری در استان‌های واقع در نیمه جنوبی و شرقی کشور از جمله یزد، فارس، کرمان، چهار محال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و جنوب خراسان جنوبی این مسئله قابل رویت است. در شکل (d) ترکیب فاز مثبت دو شاخص در آبان‌ماه (نوامبر) نمایش داده شده است. بیشینه تأثیر در شمال غرب ایران مشاهده می‌شود. در پاییز گردان گرمایی بین سطح دریا-هوا قوی است؛ با وجود NAO+ کاهش ابر بر اروپای غربی مشهود است اما نوار باریک افزایش ابر بر آلپ-بالکان ناشی از سیکلون‌های عبوری و صعود و هم‌گرایی رطوبت در پیشانی ناوه مدیترانه‌ای است. در شکل (e) ترکیب فاز مثبت نوسان اطلس شمالی و TNA منفی در آبان‌ماه (نوامبر) قابل مشاهده است. بیشینه تأثیر آفرین (حدی) در شمال غرب ایران و سواحل غربی، مرکزی تا تقریباً سواحل شرقی دریای خزر با مقدار آنومالی بزرگ‌تر از ۰/۰۴ بر طبق راهنمای نقشه قابل مشاهده است. نتیجه این برهمکنش افزایش ابر در بالکان-قفقاز تا دریای سیاه است و کاهش ابرناکی در مدیترانه مرکزی مشهود است. کاهش شار بخار سطح دریا در اطلس حاره‌ای شرقی نقش کاهنده بر تغذیه رطوبت در چرخنده‌های عبوری از مدیترانه دارد که تشدید

Beranová, R. (2025). A multi-dataset analysis of precipitation trends in Europe in the 21st century. *Journal of Hydrometeorology*, 26(7), 1313–1333. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-24-0114.1>

Bueso, D., Piles, M., & Camps-Valls, G. (2022). Let's consider more general nonlinear approaches to study teleconnections of climate variables. *arXiv preprint*, arXiv:2212.07635. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2212.07635>

Bueso, M.-C., Piles, M., & Camps-Valls, G. (2020). Nonlinear PCA: ROCK approach. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, arXiv 58(5), 3272–3284. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2020.2969813>

Cape, J. (2024). On varimax asymptotic in network models and spectral methods. *arXiv preprint*, arXiv:2403.05461. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2403.05461>

Caporaso, L., Duveiller, G., Giuliani, G., Giorgi, F., Stengel, M., Massaro, E., Piccardo, M., & Cescatti, A. (2024). Converging findings of climate models and satellite observations on global afforestation impacts on clouds. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2023JD039235. <https://doi.org/10.1029/2023JD039235>

Carvalho-Oliveira, J., Di Capua, G., Borchert, L. F., Donner, R. V., & Baehr, J. (2024). Causal relationships and predictability of the summer East Atlantic teleconnection. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 1561–1578. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1561-2024>

Chen, L., Zhong, X., Li, H., Wu, J., Lu, B., Chen, D., Xie, S.-P., Wu, L., Chao, Q., Lin, C., Hu, Z., & Qi, Y. (2024). A machine learning model that outperforms conventional numerical weather models at S2S timescales. *Nature Communications*, 15, 50714. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50714-1>

Cheng, S., Li, J., Zhang, P., & Zhang, R. (2024). Impact of summer North Atlantic Sea surface temperature on European precipitation. *Journal of Climate*, 37(19), —. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0072.1>

Chtirkova, B., Folini, D., Correa, L. F., & Wild, M. (2023). Internal variability of the climate system mirrored in decadal-scale trends of surface solar radiation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(12), e2023JD038573. <https://doi.org/10.1029/2023JD038573>

Dalelane, C., Paxian, A., Senande, M., Sanfiz, S., Rodríguez Guisado, E., Wandel, J., & Tyagi, A. (2025). Targeted teleconnections and their application to the postprocessing of climate predictions. *EGU sphere (preprint)*, —. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-3664>

Diodato, N., Seftigen, K., & Bellocchi, G. (2025). Millennium-scale Atlantic multidecadal oscillation and soil moisture in the Mediterranean. *Research*, 6, 606. <https://doi.org/10.34133/research.0606>

تفسیرپذیر—را یکپارچه می‌کند و بدین‌سان مؤلفه‌هایی همخوان با واقعیت‌های هواشناسی و سودمند در سطح عملیاتی را ارائه می‌دهد. از منظر محتوایی، این تحلیل پیوند میان دورپیوندی‌ها و ابرناکی بر فراز ایران را دقیق‌تر می‌سازد: شاخص TNA کنترل پایدار در مقیاس سالانه را اعمال می‌کند؛ NAO نقش مهمی در تغییرات فصلی را برعهده دارد؛ و الگوهای EP-NP و EA/WR از رهگذر جابه‌جایی جت و با تقویت مسیر توفان‌ها اهرم اثرگذار است و تأثیر خاصی را در منطقه ایجاد می‌کند. این یافته‌ها از به‌کارگیری هدفمند پیش‌بینی‌های شرطی‌شده به وضعیت دورپیوندی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی انرژی‌خورشیدی و پایش ریسک‌های اقلیمی پشتیبانی می‌کند. در ادامه، پیشنهاد می‌شود محصولات ماهواره‌ای ابر همسان‌سازی شوند، حساسیت نسبت به نوع کرنل و فرا پارامترها بررسی‌گردد، روش‌های کشف علی (مانند ROCK+) به کار گرفته شود، و برون‌داده‌های PCA در سامانه‌های پیش‌بینی زیر فصلی تا فصلی (S2S) و چارچوب‌های یادگیری ماشین ادغام گردد.

منابع

Ahmadi, F Mojard, M& Najafi. R. (2025). Analysis of the relationship between soil temperature sensors of meteorological stations in Kermanshah province and remote sensing patterns. *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8448.1085> [In Persian].

Akhtar-Danesh, N. (2023). Impact of factor rotation on Q-methodology analysis. *PLOS ONE*, 18(8), e0286587. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286587> [In Persian].

An, S.-I., Park, H. J., Kim, S. K., Cai, W., Santoso, A., Kim, D., & Kug, J.-S. (2023). Main drivers of Indian Ocean Dipole asymmetry revealed by a simple IOD model. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 93. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00422-2>

Atkins, J. R. C., Tinker, J., Graham, J. A., Scaife, A. A., & Halloran, P. R. (2024). Seasonal forecasting of the European North-West shelf seas. *Climate Dynamics*, 63, 1761–1777. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07439-0>

- Doiteau, B., Pantillon, F., Plu, M., Descamps, L., & Rieutord, T. (2024). Systematic evaluation of the predictability of different cyclone types over the Mediterranean. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 1409–1435. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1409-2024>
- Fang, K., Tao, Q., Lv, K., He, M., Huang, X., & Yang, J. (2024). Kernel PCA for out-of-distribution detection. *NeurIPS 2024 Proceedings, Proc. 38th NeurIPS*.
- Felsche, E., Böhnisch, A., Poschlod, B., & Ludwig, R. (2024). European hot and dry summers are projected to become more frequent and expand northwards. *Communications Earth & Environment*, 5, 410. <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01575-5>
- Foroozan, Z., Griebinger, J., Pourtahmasi, K., & Bräuning, A. (2020). 501 years of spring precipitation history for the semi-arid Northern Iran derived from tree-ring $\delta^{18}O$ data. *Atmosphere*, 11(9), 889. <https://doi.org/10.3390/atmos11090889> [In Persian].
- Fourotan, Z., Zainali, —., & Betul, —. (2023). The simultaneous effect of NAO and AMO cycle indices on the variability of temperature and precipitation in the neighboring cities of Sablan. *Environmental Science Studies*, 8(1), 5857–5868. <https://doi.org/10.22034/jess.2022.345519.1802> [In Persian].
- Galytska, E., Weigel, K., Handorf, D., Jaiser, R., Köhler, R., Runge, J., & Eyring, V. (2023). Evaluating causal Arctic–midlatitude teleconnections in CMIP6. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128, e2022JD037978. <https://doi.org/10.1029/2022JD037978>
- Geng, X., Kug, J.-S., & Kosaka, Y. (2024). Future changes in the wintertime ENSO–NAO teleconnection under greenhouse warming. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 81. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00627-z>
- Gutiérrez-Fernández, J., Miglietta, M. M., González-Alemán, J. J., & Gaertner, M. Á. (2024). A new refinement of Mediterranean tropical-like cyclones identification. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106429. <https://doi.org/10.1029/2023GL106429>
- Halifa-Marín, A., Woollings, T., Hernández-Carrascal, A., Barriopedro, D., & Vicente-Serrano, S. M. (2024). Too-stable North Atlantic climate system in CMIP6 models limits precipitation teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(753), 1193–1210. <https://doi.org/10.1002/qj.4999>
- Hajjarian, Ahmad. (2025). Drought risk monitoring and zoning using the random forest model (case study: Ardabil province). *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.8551.1093>. [In Persian].
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2024). The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150, 3392–3430. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>
- Hou, Y., Man, K., Yu, S., & Li, X. (2025). Record-high precipitation over Eastern Europe induced by atmospheric rivers in late fall 2023. *Geophysical Research Letters*, 52, e2024GL114309. <https://doi.org/10.1029/2024GL114309>
- Hussain, A., Cao, J., Hussain, I., Begum, S., Akhtar, M., Wu, X., Guan, Y., & Zhou, J. (2021). Observed trends and variability of temperature and precipitation and their global teleconnections in the Upper Indus Basin, Hindukush-Karakoram-Himalaya. *Atmosphere*, 12(8), 973. <https://doi.org/10.3390/atmos12080973>
- Ioniță, M., Vaideanu, P., & Nagavciuc, V. (2025). Breaking records under clear skies: The impact of sunshine duration and soil moisture on Eastern European heat in 2024. *npj Natural Hazards*, 1, 9. <https://doi.org/10.1038/s44304-025-00137-9>
- Javorskyj, I., Yuzefovych, R., Lychak, O., & Matsko, I. (2024). Hilbert transform for covariance analysis of periodically nonstationary random signals with high-frequency modulation. *ISA Transactions*, 144, 452–481. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2023.10.025>
- Jin, S., Yu, L., Cao, J., Zhang, L., Zhao, Y., Zhou, W., & Jiang, J. H. (2024). ENSO disrupts the effectiveness of the cloud-radiative-effect feedback perturbations on precipitation. *Journal of Climate*, 37(6), 2553–2572. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0282.1>
- Kambeizidis, H. D. (2024). Atmospheric Processes over the Broader Mediterranean Region: Effect of the El Niño–Southern Oscillation? *Atmosphere*, 15(3), 268. <https://doi.org/10.3390/atmos15030268>
- Liu, Y., Zhu, L., Yu, Z., Wang, Z., Sillmann, J., & Li, C. (2023). Opposing trends of cloud coverage over land and ocean under global warming. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23(10), 6559–6577. <https://doi.org/10.5194/acp-23-6559-2023>
- Llanes-Cárdenas, O., Norzagaray-Campos, M., Gaxiola, A., & González, G. E. G. (2020). Regional precipitation tele-connected with PDO–AMO–ENSO in northern Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 667–681. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03003-7>
- Luo, H., Quaas, J., & Han, Y. (2024). Diurnally asymmetric cloud cover trends amplify daytime warming and nighttime moistening. *Science Advances*, 10, eado5179. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado5179>

- Malik, A., Stenchikov, G., Mostamandi, S., Parajuli, S., Lelieveld, J., Zittis, G., Ahsan, M. S., Atique, L., & Usman, M. (2024). Accelerated historical and future warming in the Middle East and North Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(19), e2024JD041625. <https://doi.org/10.1029/2024JD041625>
- Marukatat, S. (2023). Tutorial on PCA and approximate kernel PCA. *Artificial Intelligence Review*, *56*, 5445–5477. <https://doi.org/10.1007/s10462-022-10297-z>
- Matsuki, A., Kori, H., & Kobayashi, R. (2023). An extended Hilbert transform method for reconstructing the phase from an oscillatory signal. *Scientific Reports*, *13*, 3535. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30405-5>
- Maycock, A. C. (2025). North Atlantic seasonal climate variability significantly modulates European windstorm hazards. *EGUsphere (preprint)*, *EGUsphere* 2025-1131. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-1131>
- Meidani, E., & Araghinejad, S. (2014). Long-lead streamflow forecasting in the southwest of Iran by sea surface temperature of the Mediterranean Sea. *Journal of Hydrologic Engineering*, *19*(8), 05014005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000965](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000965). [In Persian].
- Mitevski, I., Lee, S. H., Vecchi, G. A., Orbe, C., & Polvani, L. M. (2025). More positive and less variable North Atlantic Oscillation at higher CO₂ forcing. *npj Climate and Atmospheric Science*, *8*, 51. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01051-7>
- Molteni, F., Corti, S., & Ferranti, L. (2023). Early- and late-winter ENSO teleconnections to the Euro–Atlantic sector from C3S seasonal forecasts. *Climate Dynamics*, —. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06698-7>
- O'Reilly, C. H. (2025). Signal-to-noise errors in early winter Euro-Atlantic teleconnections. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *151*, e4952. <https://doi.org/10.1002/qj.4952>
- Park, M., Johnson, N. C., & Delworth, T. L. (2024). The driving of North American climate extremes by wave interference over the North Pacific. *Nature Communications*, *15*, 7455. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-51601-5>
- Pi, Y., Yu, Y., Zhang, Y., Xu, C., & Yu, R. (2020). Extreme temperature events during 1960–2017 in the arid region of Northwest China: *Spatiotemporal dynamics and associated large-scale atmospheric circulation*. *Sustainability*, *12*(3), 1198. <https://doi.org/10.3390/su12031198>
- Portal, A., Raveh-Rubin, S., Catto, J. L., Givon, Y., & Martius, O. (2024). Linking compound weather extremes to Mediterranean cyclone types. *Weather and Climate Dynamics*, *5*, 1043–1066. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1043-2024>
- Post, P., & Aun, M. (2024). Changes in cloudiness contribute to changing seasonality of marine climate variability. *Progress in Oceanography*, *217*, 103134. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2023.103134>
- Ramezani Edelali, Hadi, & Kouhi. (2024). Investigating the impact of climate change on drought in Iran using a population exposure approach. *Journal of Drought and Climate Change Research*. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079> [In Persian].
- Rantanen, M., Lindfors, A. V., Räisänen, P., & Laaksonen, A. (2025). Summer 2024 in northern Fennoscandia was very likely the warmest on record. *npj Climate and Atmospheric Science*, *8*, 46. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-01046-4>
- Rashedi, S., Sorooshian, A., Kazemi, Z., Karimi, N., & Namazi, M. (2024). On the characteristics and long-term trend of total cloud cover in Iran. *Acta Geophysica, Advance online publication*. <https://doi.org/10.1007/s11600-024-01351-1>. [In Persian].
- Rieger, N., Corral, Á., Olmedo, E., & Turiel, A. (2021). Lagged teleconnections of climate variables identified via complex rotated maximum covariance analysis. *Journal of Climate*, *34*(24), 9861–9878. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0244.1>
- Rivosecchi, A., Bollasina, M. A., & Colfescu, I. (2024). Future changes in the influence of the NAO on Mediterranean winter precipitation extremes in the EC-Earth3 large ensemble: *The prominent role of internal variability*. *SSRN Preprint, SSRN 4705279*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4705279>
- Rohe, K., & Zeng, M. (2023). Vintage factor analysis with Varimax performs statistical inference. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, *85*(4), 1037–1066. <https://doi.org/10.1093/jrsssb/qkad029>
- Sandler, D., Saaroni, H., Ziv, B., Tamarin-Brodsky, T., & Harnik, N. (2024). The connection between North Atlantic storm track regimes and eastern Mediterranean cyclonic activity. *Weather and Climate Dynamics*, *5*, 1103–1116. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-1103-2024>
- Schilliger, L., Bourgeois, Q., Correa, L. F., & Wild, M. (2024). An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *129*(18), e2024JD041101. <https://doi.org/10.1029/2024JD041101>
- Shaw, T. A., Baldwin, M., Barnes, E. A., Hassanzadeh, P., Li, C., O’Gorman, P. A., Simpson, I. R., Son, S.-W., Ting, M., & Voigt, A. (2024). Emerging climate-change signals in atmospheric circulation. *AGU Advances*, *5*(5), e2024AV001297. <https://doi.org/10.1029/2024AV001297>

- Spensberger, C. (2024). Teleconnections through weather rather than stationary waves. *Weather and Climate Dynamics*, 5, 659–669. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-659-2024>
- Strnad, F. M., Chen, Z., Tan, G., Wang, C., & Whitehouse, L. (2022). Teleconnection patterns of different El Niño types revealed by a large-ensemble full-field GCM experiment. *Geophysical Research Letters*, 49(17), e2022GL098571. <https://doi.org/10.1029/2022GL098571>
- Sundararajan, R. R. (2021). Principal component analysis using frequency components of multivariate time series. *Computational Statistics & Data Analysis*, 157, 107164. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2020.107164>
- Svennevik, H., Hicks, S. A., Riegler, M. A., Storelvmo, T., & Hammer, H. L. (2024). A dataset for predicting cloud cover over Europe. *Scientific Data*, 11, 245. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03062-0>
- Vázquez, M., Nieto, R., Drumond, A., & Gimeno, L. (2023). Influence of teleconnection patterns on global moisture transport. *International Journal of Climatology*, 43(18), 7855–7878. <https://doi.org/10.1002/joc.7843>
- consider in the development of climate fingerprints. *Journal of Climate*, 37(5), 1723–1735. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-23-0267.1>
- Yang, R., & Xing, B. (2022). Teleconnections of large-scale climate patterns to regional drought in mid-latitudes: A case study in Xinjiang, China. *Atmosphere*, 13(2), 230. <https://doi.org/10.3390/atmos13020230>
- Yu, L., Wu, B., Jiang, Z., & Li, J. (2024). Seasonal phase change of the North Atlantic triple drivers shaping European winter climate. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7, 73. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00882-0>
- Zhang, G., Rantanen, M., & Clancy, P. (2024). SCAND: An index for the Scandinavian pattern. *Weather and Climate Dynamics*, 5(3), 893–907. <https://doi.org/10.5194/wcd-5-893-2024>
- Wang, G., Yuan, X., Jing, C., Hamdi, R., Ochege, F. U., Dong, P., Shao, Y., & Qin, X. (2024). The decreased cloud cover dominated the rapid spring temperature rise in arid Central Asia over the period 1980–2014. *Geophysical Research Letters*, 51(2), e2023GL107523. <https://doi.org/10.1029/2023GL107523>
- Weylandt, M., & Swiler, L. P. (2024). Beyond PCA: Additional dimension reduction techniques to Zhang, R., Zhang, L., Wu, L., & Johns, W. E. (2019). Sensitivity of the Atlantic meridional overturning circulation to the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Nature*, 565(7739), 367–372. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0822-7>
- Zhu, Z., Piao, S., Xu, Y., Bastos, A., Ciais, P., & Peng, S. (2017). The effects of teleconnections on carbon fluxes of global terrestrial ecosystems. *Geophysical Research Letters*, 44(7), 3209–3218. <https://doi.org/10.1002/2016GL072296>
- Zohrabi, N., Bavani, A. M., Goodarzi, E., & Eslamian, S. (2014). Attribution of temperature and precipitation changes to greenhouse gases in northwest Iran. *Quaternary International*, 345, 130–137 (In Persian). <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.01.026> [In Persian].



Modeling the Effect of Temperature Increase on Maize Yield Components

Fateme Safari¹, Hadi Ramezani Etedali^{2,*}  Abbas Kaviani³, Leila Khosravi⁴

1. Ph.D. Student of Irrigation and Drainage, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

3. Associate Professor, Department of Water Sciences and Engineering, Agricultural and Natural Resources Faculty, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

4. M.Sc Graduated, Irrigation and Reclamation Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran.

*Corresponding Author: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

Keywords:

Maximum air temperature, Biomass, AquaCrop, Climate change.

Introduction

Challenges to global agriculture. Among the various climate-related factors, increased temperature and heat stress have been identified as major threats to crop productivity, particularly for crops that are sensitive to thermal fluctuations. Maize (*Zea mays* L.), a vital cereal crop cultivated worldwide for food, feed, and industrial purposes, is notably vulnerable to high temperatures during key phenological stages. As temperature rises above the physiological thresholds of the crop, adverse effects on photosynthesis, pollination, grain set, and ultimately yield become more pronounced.

Received:

15 May 2025

Revised:

18 June 2025

Accepted:

1 July 2025

In light of these concerns, this study was conducted to assess the effects of temperature stress on maize growth, specifically focusing on two temperature-related indicators: (1) average maximum temperature and (2) cumulative temperature above the thermal threshold. The overarching goal was to develop linear regression models that could quantify and predict the impact of these parameters on maize yield and biomass at both seasonal and phenological stage levels. Such models could be instrumental in climate risk assessments and adaptive management strategies for maize cultivation in semi-arid regions like Qazvin, Iran.

How to cite this article:

Safari, F., Ramezani Etedali, H., Kaviani, A. & Khosravi, L. (2026). Modeling the effect of temperature increase on Maize yield components. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 78-94. [10.22077/jdcr.2025.9396.1143](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9396.1143)



Materials and Methods

The study area comprised six maize fields within the Magsal Agro-Industrial Complex in Qazvin Province, characterized by a semi-arid climate. The single-cross maize hybrid SC 704 was selected due to its widespread cultivation in Iran and its known sensitivity to temperature stress during reproductive stages.

Field-level data on crop growth, soil characteristics, management practices, and daily weather variables were collected. The AquaCrop model (developed by FAO) was used to simulate crop development, yield, and biomass. Model calibration was performed using observed data for flowering and maturity dates, biomass accumulation, and final yield.

To quantify thermal stress, two key indicators were calculated: (1) the seasonal average of maximum daily temperature, and (2) the cumulative number of days with maximum temperature exceeding a defined threshold based on the physiological limits. Regression analyses were conducted to relate these indicators to observed yield and biomass, both at the full-season level and within four specific growth stages (vegetative, flowering, grain filling, and maturity). Model performance was evaluated using statistical metrics including RMSE (Root Mean Square Error), NRMSE, MBE (Mean Bias Error), R^2 , and adjusted R^2 . To further assess uncertainty, the F-factor and R-factor indices were applied.

Result and Discussion

Calibration of the AquaCrop model demonstrated reliable performance in simulating maize development, with RMSE values between 4.6 and 6.3 for flowering and maturity predictions. When regression models were developed using seasonal indicators, average maximum temperature was found to be a strong predictor of yield ($R^2 = 0.79$, RMSE = 0.84), while cumulative high-temperature days better explained biomass variation ($R^2 = 0.67$, RMSE = 0.72).

However, the stage-based models consistently outperformed seasonal models in accuracy. Yield prediction models that incorporated maximum temperature and cumulative thermal stress during specific stages had R^2 values of 0.90 and 0.88, with corresponding RMSE values of 0.57 and 0.68, respectively. Similarly, biomass was best predicted using maximum temperature during critical stages ($R^2 = 0.83$, RMSE = 0.52). All regression coefficients were negative, indicating that temperature was associated with reductions in both yield and biomass. The flowering stage was identified as the most temperature-sensitive period, with high temperatures disrupting pollen viability and grain set.

Simulated scenarios also showed that increased temperatures during sensitive stages could lead to a 13–25% reduction in final yield. Uncertainty analysis using F-factor (0.1602) and R-factor (0.1944) demonstrated strong agreement between the model outputs and observed data, affirming the robustness of the developed regression models.

Conclusion

This study highlights the detrimental effects of temperature stress on maize productivity, particularly during flowering and grain filling stages. It emphasizes the need for stage-specific modeling approaches rather than seasonal averages, as stage-wise models provided more accurate predictions of yield and biomass. The regression models developed in this research can be integrated into decision support systems for better climate risk management and crop planning.

Given the observed yield losses under projected temperature scenarios, adaptive strategies such as adjusting planting dates, selecting heat-tolerant hybrids, and modifying irrigation schedules should be prioritized. These findings also underscore the importance of integrating crop modeling tools such as AquaCrop with climate data to improve resilience and sustainability in maize production under future warming trends.



مدل‌سازی اثر افزایش دما بر اجزاء عملکرد ذرت

فاطمه صفری^۱، هادی رضائی اعتدالی^{۲*}، عباس کاویانی^۳، لیلا خسروی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۲- استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
- ۴- کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، کارشناس آزمایشگاه کیفیت آب، گروه آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، کرج، ایران.

*نویسنده مسئول: ramezani@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم با ایجاد نوسانات در پارامترهای هواشناسی مانند دما، بر فرایندهای محیط‌زیستی و کشاورزی اثر می‌گذارد. شناخت این پارامترها و تخمین عملکرد محصول پیش از برداشت، نقش مهمی در بهبود مدیریت تولید، درآمد کشاورزان و برنامه‌ریزی تأمین غذا دارد. چراکه تولید محصول نتیجه اثر متقابل فرایندهای گیاهی و پارامترهای آب و هوایی است. در این پژوهش، عملکرد و زیست‌توده ذرت با رقم سینگل کراس ۷۰۴، بر اساس دو پارامتر دمایی: متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه گیاه تخمین زده شد و معادلات مربوط به برآورد عملکرد و زیست‌توده به صورت فصلی و مرحله‌ای توسعه داده شد. هدف از انجام این پژوهش، بررسی اثر پارامترهای دمایی و پیش‌بینی مقدار اجزاء عملکرد در اثر تغییرات دمایی است. طبق نتایج به‌دست آمده در معادلات فصلی، معادله عملکرد بر اساس متوسط دمای حداکثر با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۷۹ و ۰/۸۴ و معادله زیست‌توده بر اساس مجموع دماهای بالای حد آستانه با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۶۷ و ۰/۷۲ برآورد خوبی داشتند. در توسعه مرحله‌ای معادلات، معادله عملکرد بر اساس هر دو پارامتر با مقادیر R^2 و RMSE به ترتیب: ۰/۹۰، ۰/۵۷، ۰/۸۸ و ۰/۶۸ و معادله زیست‌توده بر اساس متوسط دمای حداکثر با مقادیر R^2 و RMSE برابر ۰/۸۳ و ۰/۵۲ تخمین خوبی دادند.

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم، دمای حداکثر هوا، زیست‌توده، AquaCrop

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۲۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۳/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۴/۰۹

مقدمه

عملکرد گیاهان زراعی و سازگاری آنها، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. چنانچه روند این تغییرات سریع باشد، به خاطر آنکه گیاهان نسبت به سایر موجودات زنده امکان گریز از شرایط نامساعد را ندارند، بنابراین زیان بیشتری را متحمل خواهند شد. پس هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی به نوبه خود، منجر به تغییر در تولید محصولات کشاورزی می‌شود. کاهش میزان تولید محصولات کشاورزی در اثر سرمازدگی، تگرگ و گرمزدگی از جمله اثرات گرمایش جهانی در بخش کشاورزی است؛ بنابراین دمای هوا، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی به حساب می‌آید (Bayatani et al., 2020).

سطح زیر کشت، میزان تولید در هکتار و مقدار مصرف ذرت، در طی سال‌های اخیر در اغلب کشورهای جهان افزایش داشته، به طوری که در بین غلات، پس از گندم و برنج، در مقام سوم قرار دارد (Bazgir, 2016). ذرت در ایران به‌عنوان یکی از منابع اصلی تأمین انرژی در تغذیه دام و طیور بشمار می‌رود. به همین دلیل توسعه سطح زیر کشت و افزایش تولید این محصول از اولویت خاصی برخوردار می‌باشد. طبق آمارنامه کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۱-۱۴۰۲ وزارت کشاورزی، استان قزوین با سهم ذرت تولیدی ۸/۲۲ درصدی در رتبه چهارم تولید این محصول در سطح کشور قرار دارد. سطح زیر کشت استان ۲۲۳۲۳ هکتار و میزان تولید کل ذرت در استان ۴۹/۷۸۷ تن در هکتار است.

محدوده دمایی مطلوب برای رشد و دستیابی به عملکرد پتانسیل گیاه ذرت، ۳۰-۸ درجه سانتی‌گراد است (Steduto, 2012). پروتوپلاسم گیاهان، فقط در یک دامنه محدود از دما، می‌تواند به فعالیت‌های خود ادامه دهد (Alizadeh, 2010). در صورت قرارگیری گیاه در خارج از این محدوده دمایی، با تنش روبرو شده و ممکن است به

آن خسارت وارد شود. بنابراین برای افزایش میزان تولید محصول و سود کشاورز، لازم است از ارقام مقاوم به تنش‌های غیرزیستی همچون تنش دمایی استفاده شود. از طرفی افزایش تنها یک درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای فصلی، می‌تواند عملکرد اقتصادی ذرت را ۳ تا ۱۳ درصد کاهش دهد (Izaurrealde et al., 2011). تنش دمایی (دماهای بالا) اثر منفی‌ای بر زنده ماندن گرده‌ها و پذیرش کاکل‌ها دارد که منجر به کاهش قابل توجهی در تشکیل بذر و عملکرد اقتصادی می‌شود (Waqas et al., 2021). بر اساس بررسی‌های هاوتین و همکاران (Hawtin et al., 1996) چنانچه افزایش دما با کاهش رطوبت نسبی همراه باشد اثرات زیانباری بر دانه گرده ذرت خواهد داشت و در دمای ۳۵-۳۲ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی پایین، حدود ۳۰ درصد دانه‌های گرده بعد از رها شدن در مدت یک تا دو ساعت قدرت باروری خود را از دست می‌دهند.

گروه کشاورزی دولت آمریکا (USDA) در گزارش سال ۲۰۱۳ خود علت کاهش شدید عملکرد ذرت دانه‌ای در ایالت‌های اصلی کشت این محصول را، گرم بودن بیش از حد دمای هوا و همچنین کاهش شدید مقدار بارش در ماه جولای که همزمان با مرحله رشد زایشی ذرت بوده اعلام کرده بود. روت (Roth, 2015) در تحقیقات خود به این نتیجه رسید که، افزایش دما باعث افزایش ماده خشک ذرت علوفه‌ای شد، گرچه باید توجه داشت که این افزایش دما در مراحل پایانی رشد زایشی به دلیل افزایش تنفس در گیاه، سبب کاهش عملکرد دانه می‌گردد. همچنین به این نتیجه رسیدند که با افزایش تراکم گیاه، عملکرد نیز افزایش می‌یابد، ولی این افزایش کمیت در عملکرد، کاهش شکر و نشاسته در علوفه را به همراه خواهد داشت که در نهایت پایین بودن قابلیت هضم علوفه برای دام را بدنبال دارد. در پژوهشی که نیف و همکاران (Neiff et al., 2016) انجام دادند مشخص شد، دمای بالا بر میزان تبادل دی‌اکسید کربن در ذرت تأثیر داشته و اثر منفی آن بر

تغییر اقلیم در منطقه با افزایش GDD کاهش خواهد یافت و میزان زیست‌توده و عملکرد دانه با فرض ثابت ماندن تاریخ کشت کنونی و آبیاری کامل حدود یک تا دو تن در سناریوهای متفاوت افزایش خواهد یافت (Hajivandpaydari et al., 2023).

در تحقیقی که موکونن و هایسکانن (Muukkonen and Heiskanen, 2017) انجام دادند، نشان داده شد که تغییرات دما می‌تواند تأثیرات منفی بر عملکرد محصول در شرایط مختلف اقلیمی داشته باشد. همچنین، در مطالعه‌ای دیگر که بر روی داده‌های سنجش از دور، تأثیرات تغییرات دما بر زیست‌توده و رشد گیاهان انجام شد، نتایج مشابهی را در رابطه با تأثیر منفی دما بر رشد گیاهان کشاورزی مشاهده کردند (Dorigo et al., 2010).

این مطالعات به‌طور کلی نشان می‌دهند که مدیریت دمای محیطی و انتخاب مدل‌های مناسب برای پیش‌بینی تأثیرات آن بر عملکرد و زیست‌توده، نقش مهمی در بهبود تولیدات کشاورزی همچون ذرت ایفا می‌کند. در پژوهش‌های انجام شده در گذشته، اثر تغییرات دما بر روی میزان عملکرد محصول ذرت کاملاً اثبات شده است؛ بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی اثر دو پارامتر دمایی انتخابی (متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه تحمل گیاه) بر میزان عملکرد و زیست‌توده ذرت است که به دو صورت فصلی و مرحله‌ای، روابط مربوطه توسعه داده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای انجام این پژوهش، اطلاعات ۶ مزرعه از کشت و صنعت مگسال واقع در بخش آبیگ استان قزوین تهیه شد. اطلاعات دریافتی در قالب جدول ۱ ارائه شده است. موقعیت مکانی مزارع مطابق شکل ۱ است.

میزان رشد گیاه، تعداد دانه و عملکرد نهایی دانه قابل مشاهده است.

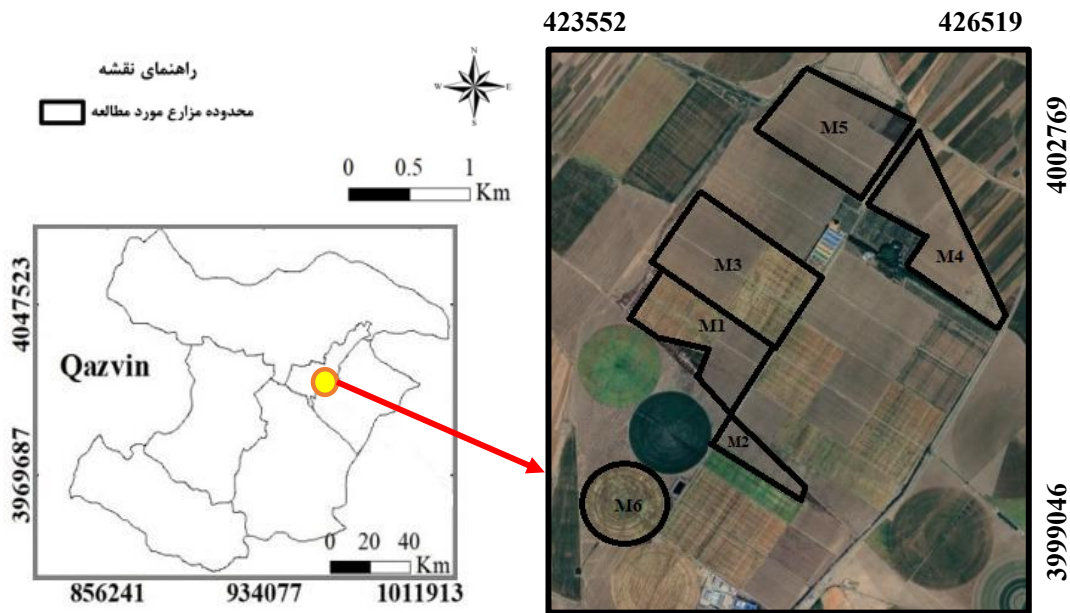
تنش حرارتی در مرحله پرشدن دانه، به‌ویژه در شرایط خشک و با افزایش دما، باعث کاهش قابل توجه در میزان پرشدن دانه و به تبع آن کاهش ۱۰ درصدی عملکرد ذرت می‌شود (Qi et al., 2022). در پژوهش فوکار و همکاران (Fokar et al., 1998)، در طول دوره پر شدن دانه، یک تیمار از ۱۹ تا ۲۸ درجه و تیمار بعدی را ۳۱ تا ۴۲ درجه اعمال کردند که تنش دمایی موجب کاهش وزن نهایی دانه شد. در مطالعه‌ای اثرات تغییر اقلیم بر رشد، زیست‌توده و عملکرد دانه ذرت در شرایط تغییر اقلیم در شمال استان خوزستان شبیه‌سازی شد.

در سال‌های اخیر مدل‌های گیاهی متعددی برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان در شرایط زراعی ارائه شده است. مدل AquaCrop یک مدل فراگیر و پرکاربرد است که برای محدوده وسیعی از محصولات زراعی کاربرد دارد (Ramezani etedali & Safari, 2023). این مدل باید برای هر محصول و در هر منطقه خاص واسنجی و ارزیابی شود. مزیت آن نسبت به سایر مدل‌های گیاهی آنست که تعداد پارامترهای ثابت آن بیشتر بوده و واسنجی مدل با داده‌های کمتری انجام می‌گیرد (Ramezani etedali & Safari, 2023). از این مدل در پژوهش‌های بسیاری در ایران و جهان استفاده شده است از جمله، برای شبیه‌سازی عملکرد و رشد گیاه از مدل AquaCrop و از داده‌های تولیدی بارش، دمای حداقل و حداکثر و ساعت آفتابی با استفاده از مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای انتشار A2 و B1 در دوره‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ استفاده شد. طبق نتایج، در سناریوهای انتشار A2 پیش‌بینی مناسبی برای پارامترهای اقلیمی و شبیه‌سازی فصل رشد آینده وجود داشت و در دمای حداقل و حداکثر و بارش افزایش دیده شد. طول دوره رشد برای هر ایستگاه با توجه به

جدول ۱. اطلاعات مزارع.

Table 1. Field data.

بافت خاک (۹۰ سانتی‌متر) Soil texture (90 cm)	بافت خاک (۶۰ سانتی‌متر) Soil texture (60 cm)	بافت خاک (۳۰ سانتی‌متر) Soil texture (30 cm)	روش آبیاری Irrigation method	نوع رقم Cultivar type	تاریخ برداشت Harvest date	تاریخ کاشت Planting date	شماره مزرعه Farm No.
			Tape تیپ		1401/06/27	1401/03/20	1
			Tape تیپ		1401/06/28	1401/03/31	2
Loam لوم	Clay Loam لومی رسی	Clay Loam لومی رسی	Linear خطی	Single cross-704	1401/06/25	1401/03/23	3
			Tape تیپ	سینگل کراس- ۷۰۴	1401/07/04	1401/03/21	4
			Tape تیپ		1401/06/26	1401/03/17	5
			Center- pivot سنتر پویوت		1401/07/29	1401/04/23	6



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی مزارع کشت و صنعت مگسال.

Fig 1. Geographical location of Magsal agro-industrial farms.

برداشت، نوع رقم، تراکم بذر، طول چرخه محصول و سایر اطلاعات مربوط به روند رشد گیاه، داده‌های خاک (نوع بافت خاک، ظرفیت زراعی و نقطه پژمردگی دائم)، داده‌های مدیریتی (روش آبیاری، نوع کود مصرفی، مقدار کود در هکتار، عملیات خاک‌ورزی و اقدامات قبل از کاشت) از

با توجه به داده‌های ورودی موردنیاز برای شبیه‌سازی در مدل AquaCrop، یک بانک اطلاعاتی شامل: داده‌های اقلیمی (دمای حداکثر و حداقل، بارش، ساعت آفتابی و رطوبت نسبی) (داده‌های اقلیمی برای سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ دریافت شد)، داده‌های گیاهی (تاریخ کاشت و

$$Y=B \times HI \quad (2)$$

مدل از داده‌های حداکثر و حداقل دمای روزانه برای محاسبه درجه-روز-رشد به‌منظور تعدیل عملکرد و زیست-توده بر اثر خسارات ناشی از سرما، استفاده می‌کند. داده‌های دمای روزانه، مقدار بارندگی روزانه و همه اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه ET_0 از اطلاعات آماری سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۳ ایستگاه هواشناسی قزوین استفاده شد. پارامترهای زیست‌توده و عملکرد از طریق روابط زیر مدل‌سازی شدند.

در این رابطه صرفاً تأثیر متغیرهای متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه در نظر گرفته شد و سایر عوامل مؤثر، ثابت نگه داشته شد. روابط مربوط به توسعه معادلات بر اساس داده‌های فصل رشد گیاه و داده‌های مراحل چهارگانه رشد گیاه مطابق جدول زیر است.

جدول ۲. روابط مربوط به توسعه معادلات.

Table 2. Relationships used for equation development.

روابط Relationships	داده‌های مورد استفاده Data used	شماره رابطه Relationship No.
$Biomass=A_1(\bar{T}_{max,seasonal})+A_5$		3
$Biomass=A_1(\bar{S}_{max,seasonal})+A_5$	داده‌های فصل رشد گیاه	4
$Yield=A_1(\bar{T}_{max,seasonal})+A_5$	Crop growing season data	5
$Yield=A_1(\bar{S}_{max,seasonal})+A_5$		6
$Biomass=A_1(\bar{T}_{max,1})+A_2(\bar{T}_{max,2})+A_3(\bar{T}_{max,3})+A_4(\bar{T}_{max,4})+A_5$	داده‌های مراحل	7
$Biomass = A_1(\bar{S}_{max,1}) + A_2(\bar{S}_{max,2}) + A_3(\bar{S}_{max,3}) + A_4(\bar{S}_{max,4}) + A_5$	چهارگانه رشد گیاه	8
$Yield=A_1(\bar{T}_{max,1})+A_2(\bar{T}_{max,2})+A_3(\bar{T}_{max,3})+A_4(\bar{T}_{max,4})+A_5$	Data for the Four Phenological Stages of the Crop	9
$Yield=A_1(\bar{S}_{max,1})+A_2(\bar{S}_{max,2})+A_3(\bar{S}_{max,3})+A_4(\bar{S}_{max,4})+A_5$		10

دماهای بالای حد آستانه در مرحله i ام از رشد گیاه و A_5 : بردار ثابت سایر عوامل مؤثر بر عملکرد و زیست توده است. در نرم‌افزار SPSS، ضرایب توابع تولید برآورد شد.

منطقه جمع‌آوری گردید. با استفاده از این اطلاعات، فایل-های اقلیمی، گیاهی و مدیریتی مورد نیاز در مدل AquaCrop، به‌منظور واسنجی و شبیه‌سازی عملکرد و زیست‌توده تهیه و مورد استفاده قرار گرفت.

مدل AquaCrop از تبخیر-تعرق محاسبه شده با فرض تفکیک آن استفاده می‌کند. تفکیک این مؤلفه به دو جزء تبخیر و تعرق سبب حذف مصرف غیرتولیدی آب از معادلات می‌شود. با تعیین تعرق و تبخیر-تعرق مقدار زیست‌توده طبق رابطه زیر برآورد می‌شود (Safari and Kaviani, 2022):

$$B=WP \left[\frac{Tr_i}{ET_{0,i}} \right] \quad (1)$$

در این رابطه، Tr مقدار کل تعرق روزانه در طول فصل زراعی، WP بهره‌وری آب، ET_0 تبخیر-تعرق گیاه مرجع و B زیست‌توده است. مقدار عملکرد (Y) نیز بر اساس زیست‌توده و شاخص برداشت (HI) از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Safari and Kaviani, 2022):

$\bar{T}_{max,seasonal}$: متوسط دمای حداکثر در طول فصل رشد، $\bar{S}_{max,seasonal}$: متوسط مجموع دماهای بالای حد آستانه در طول فصل رشد، $\bar{T}_{max,i}$: متوسط دمای حداکثر در مرحله i ام از رشد گیاه، $\bar{S}_{max,i}$: متوسط مجموع

استفاده شد. هر تابعی که آماره RMSE، NRMSE و MBE آن حداقل بوده و یا آماره‌های R^2 و R^2_{adj} آن نزدیک به یک بود، به‌عنوان تابع با کارایی بهتر در تخمین عملکرد و زیست‌توده انتخاب گردید (جدول ۳).

در ادامه برای بررسی آماری از شاخص‌های میانگین ریشه دوم خطا (RMSE)، ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین خطای اریب (MBE)، ضریب تبیین (R^2) و ضریب تبیین تعدیل شده (R^2_{adj})

جدول ۳. شاخص‌های آماری مورد استفاده به‌منظور ارزیابی نتایج.

Table 3. Statistical indices used for evaluating the results.

شاخص Index	نحوه برآورد Estimation Method
RMSE	$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n} \right]^{0.5}$
NRMSE	$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$
MBE	$MBE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n} \right]$
R^2	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2)}}$
R^2_{adj}	$R^2_{adj} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - P - 1}$

مدل عملکرد خوبی در برآورد هر سه پارامتر دارد. بر اساس شاخص MBE در مقادیر شبیه‌سازی شده زمان گلدهی و زیست‌توده کمی کم برآوردی و در زمان رسیدگی شبیه‌سازی شده کمی بیش برآوردی رخ داده؛ ولی قابل قبول است.

در روابط مذکور، n ، O_i ، P_i ، \bar{O} ، \bar{P} و P به ترتیب؛ تعداد داده‌ها، مقدار داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی، متوسط داده‌های پیش‌بینی شده و مشاهداتی و تعداد متغیرهای پیش‌بین بود.

نتایج و بحث

واسنجی مدل گیاهی AquaCrop

طبق تحقیقی که سیاحی و همکاران (Sayyahi et al., 2020) بر روی ارزیابی کارایی مدل AquaCrop و WOFOST انجام دادند به این نتیجه رسیدند که مدل AquaCrop دقت بهتری نسبت به WOFOST داشته و میزان خطای شبیه‌سازی عملکرد توسط AquaCrop کمتر بود.

در این پژوهش، واسنجی مدل AquaCrop با هدف ایجاد کمترین اختلاف بین مقادیر زمان گلدهی، زمان رسیدگی و میزان زیست‌توده شبیه‌سازی شده با مقدار واقعی انجام شد.

اکثر محققان برای این مدل دقت خوبی را گزارش کرده‌اند (Stone, Liu et al., 2013; Alishiri et al., 2014) از آن به‌عنوان ابزاری مطمئن در برنامه‌ریزی برای کشت ذرت استفاده کرد.

نتایج آماری در جدول ۴ آورده شده است. طبق مقادیر جدول، میانگین خطای شبیه‌سازی هر سه پارامتر (RMSE)، از ۴/۶۲ تا ۶/۳۲ درصد متغیر بود. مقدار خطای نرمال شده (NRMSE) در محدوده ۰-۱۰ قرار داشت و این یعنی خطای مدل نسبت به مقدار مشاهده‌ای کم و

جدول ۴. شاخص‌های آماری برای ارزیابی مدل AquaCrop.

Table 4. Statistical indicators used for the evaluation of the AquaCrop model.

شاخص	زمان گلدهی	زمان رسیدگی	زیست‌توده
Index	Flowering	Maturity	Biomass
مشاهده شده Observed	72	99	25.12
شبیه‌سازی شده Simulated	76	90	21.1
MBE	-4.67	6	-4.69
NRMSE	0.33	0.09	0.19
RMSE	4.62	6.32	4.92

مدل‌سازی رابطه عملکرد و زیست‌توده با متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه

به‌منظور برآورد مقادیر عملکرد و زیست‌توده بر اساس دو پارامتر اثرگذار، متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه، رابطه تجربی (به‌عنوان مدل) بین آنها برآزش داده شد. در این پژوهش، تابع خطی به‌عنوان مدل رگرسیونی انتخاب شده و با برآزش آن بین داده‌های متوسط دمای حداکثر و مجموع دماهای بالای حد آستانه، قابلیت آن برای تعیین مقادیر عملکرد و زیست‌توده ارزیابی شد. محدودیت این مدل به شرایط خاص مکانی و اقلیمی منطقه مورد مطالعه بستگی داشته؛ اما نسبت به سایر روش‌های مدل‌سازی تئوری و تجربی که بر پایه فرضیات متعددی هستند، ترجیح داده شد. مدل-سازی به دو صورت انجام شد: الف) بر اساس داده‌های فصل رشد و ب) بر اساس داده‌های مراحل چهارگانه رشد گیاه.

پس از برآزش تابع مذکور در نرم‌افزار SPSS، ضرایب ثابت هرکدام از توابع طبق جدول ۵ برای داده‌های ۴۴ ساله برآورد شد. بنابراین ابتدا با استفاده از توابع بدست آمده مقادیر عملکرد و زیست‌توده برآورد شد و سپس اعتبار توابع از طریق روابط آماری اشاره شده ارزیابی شد. هر تابعی که مقدار آماره RMSE، NRMSE و MBE آن حداقل بوده و یا آماره‌های R^2 و R^2_{adj} آن نزدیک به یک

باشد، تابع تخمین خوبی از مقادیر عملکرد و زیست‌توده می‌دهد.

از نظر تمام آماره‌ها در حالت توسعه توابع بر اساس داده‌های فصل رشد گیاه، توابع خطی مربوط به تخمین عملکرد با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه و زیست‌توده با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر، عملکرد خوبی برای تخمین نداشتند. توابع خطی مربوط به عملکرد با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر و زیست-توده با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه، با توجه به مقادیر هر پنج آماره مورد بررسی تخمین مناسب‌تری از پارامترهای عملکرد و زیست‌توده می‌دهد (جدول ۶).

در حالت توسعه توابع بر اساس داده‌های مراحل مختلف رشد گیاه، تمام آماره‌ها عملکرد خوبی را برای هر چهار تابع نشان می‌دهند. از نظر آماره R^2 و R^2_{adj} پارامتر عملکرد تخمین بهتر و از نظر آماره NRMSE تابع تخمین زیست‌توده عملکرد عالی داشته است. با توجه به اینکه مقدار آماره MBE در تمامی توابع به‌جز توابع تخمین عملکرد با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه و زیست‌توده با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر منفی شده، بیانگر کم برآوردی و حداقل شدن و نزدیکی این آماره به صفر، نشان‌دهنده کارایی خوب توابع است (جدول ۶).

علوفه‌ای تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم ارزیابی کردند و نشان دادند که این تغییرات می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد ذرت داشته باشند که این امر با نتایج تحقیق حاضر همخوانی دارد.

در مطالعه دیگر، تأثیر تغییرات دما بر عملکرد ذرت در استان خوزستان ایران بررسی شد و نشان داده شد که دمای بالا در مراحل مختلف رشد می‌تواند به‌ویژه در مرحله گلدهی باعث کاهش عملکرد ذرت شود که مشابه با نتایج این تحقیق است که در آن اثرات منفی دما بر عملکرد و زیست‌توده در مرحله گلدهی تأکید شده است (Ghorbani et al., 2021). همچنین، نتایج حاصله از مطالعه‌ای که به پیش‌بینی عملکرد ذرت در شرایط تغییر اقلیم پرداخته شد، نشان داد که دما و بارش تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد ذرت دارند. این یافته‌ها نیز به‌طور کلی با نتایج تحقیق حاضر هم‌راستا است، زیرا این تحقیق نیز به تحلیل تأثیر تغییرات دما بر عملکرد و زیست‌توده ذرت پرداخته است (Yazdani et al., 2022). در مطالعه‌ای بر پاسخ عملکرد ذرت به تنش آبی در مراحل مختلف رشد، تابع خطی بین شدت تنش و کاهش عملکرد برای مراحل رشد رویشی و زایشی گزارش شد (Jin et al., 2020). در مطالعه‌ای دیگر با هدف پیش‌بینی عملکرد ذرت، استفاده از مدل داده‌محور نشان داد که میزان تجمع تنش در مراحل رشد اولیه همبستگی خطی بالایی با کاهش عملکرد دارد (Deng et al., 2023). این هم‌راستایی در نتایج، به‌ویژه در رابطه با اثرات منفی دما در مراحل مختلف رشد گیاه و اثرات آن بر عملکرد ذرت، نشان‌دهنده اعتبار بالای مدل‌های رگرسیونی توسعه‌یافته در این تحقیق برای پیش‌بینی دقیق‌تر عملکرد و زیست‌توده ذرت در مواجهه با تغییرات اقلیمی است.

به گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، میانگین دمای سطح زمین در دهه ۲۰۱۱-۲۰۲۰ نسبت به دوره

طبق نتایج آورده شده در جدول ۵، تمامی ضرایب مربوط به توابع تولید منفی شده که علت آن، جود رابطه منفی و معکوس بین دما با عملکرد و زیست‌توده است. این منفی شدن اثر کاهنده دما، بعنوان یک عامل محیطی را بر فنولوژی و فیزیولوژی گیاه ذرت نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که، تنش دمایی در ذرت می‌تواند منجر به کاهش هر دو عامل عملکرد و زیست‌توده شود اما میزان و نحوه تأثیر آن بر هر کدام به شدت دما، مرحله رشد گیاه و مدت زمان قرارگیری در معرض تنش بستگی دارد.

بر اساس نتایج، دمای بالا در زمان گلدهی (مرحله سوم رشد) باعث کاهش تولید و کیفیت گرده، اختلال در تلقیح و تشکیل دانه و کاهش تعداد دانه‌های تشکیل شده می‌شود که در نهایت منجر به کاهش وزن نهایی دانه‌ها و عملکرد اقتصادی گیاه می‌گردد. این موضوع به‌خوبی در جدول ضرایب توابع مشخص است. مقدار ضرایب به‌دست‌آمده در مرحله گلدهی (ضریب A_3) منفی‌تر شده و اثر کاهشی بر روی عملکرد و زیست‌توده را به‌خوبی نمایش می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که میزان تنش دمایی بر عملکرد محصول رابطه مستقیمی با مراحل وقوع تنش دارد. مورد دیگری که نتایج تحقیقات به آن اشاره دارد و حائز اهمیت است، افزایش یک درجه‌ای متوسط دمای فصلی می‌تواند منجر به کاهش ۱۳-۳ درصدی در عملکرد اقتصادی ذرت شود (Waqas et al., 2021).

نتایج این تحقیق در راستای مطالعات پیشین که تأثیرات تغییرات دما بر عملکرد و زیست‌توده ذرت را بررسی کرده‌اند، قرار دارد. به طور خاص، بررسی‌ها نشان داده‌اند که افزایش دما در طول فصل رشد تأثیرات منفی بر عملکرد محصول ذرت دارد. محمدی‌نژاد و همکاران (Mohammadnejad et al., 2021) در مطالعه خود تأثیر تغییرات دما و بارش را در بهره‌وری آب و عملکرد ذرت

تحت تاثیر قرار می‌دهد. طبق نتایج بررسی انجام شده در پژوهش حاضر، از تاثیرگذاری افزایش دما بر مقدار عملکرد، مشخص شد که افزایش ۴ درجه‌ای در میزان دمای حداکثر روزانه، تأثیر قابل توجهی بر کاهش عملکرد ذرت علوفه‌ای در منطقه قزوین دارد. مقایسه عملکرد پایه (در شرایط دمای معمول) با عملکرد ثبت شده پس از افزایش دما نشان داد که درصد کاهش عملکرد در بازه‌ای بین ۱۳ تا ۲۵ درصد متغیر است. این میزان کاهش می‌تواند ناشی از هم‌زمانی افزایش دما با مراحل حساس رشد گیاه مانند گلدهی یا پر شدن دانه، و نیز تنش‌های محیطی هم‌زمان مانند تنش خشکی باشد.

پیش‌اصنعتی (۱۸۵۰-۱۹۰۰) حدود ۱/۰۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (IPCC, 2021). همچنین گزارش شده که دمای سطح زمین تا پایان قرن ۲۱، ۱/۵ تا ۴ درجه سانتی‌گراد، نسبت به دوره پایه (۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ میلادی) افزایش خواهد داشت و این افزایش دما بعد از ۲۱۰۰ نیز ادامه دارد (IPCC, 2013). در پژوهشی که فخری (Fakhri, 2024) به منظور بررسی وضعیت تغییرات دمایی کشور انجام داد، تحلیل روند دمایی نشان داد که دمای میانگین، حداقل و حداکثر در دهه‌های اخیر افزایش یافته و موجب تشدید تنش‌های حرارتی در بخش کشاورزی ایران شده و در نهایت عملکرد محصولات را

جدول ۵. ضرایب توابع رگرسیونی برای برآورد عملکرد و زیست‌توده.

Table 5. Regression coefficients for estimating yield and biomass.

ضرایب Coefficients					متغیر وابسته Dependent variable	متغیر مستقل Independent variable
A ₅	A ₄	A ₃	A ₂	A ₁		
41.828	-	-	-	-1.104	عملکرد Yield	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature
13.12	-	-	-	-0.078	فصل رشد Growing Season	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold
35.781	-	-	-	-0.478	زیست‌توده Biomass	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature
22.749	-	-	-	-0.028		مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold
46.733	0	-1.163	-0.067	0	عملکرد Yield	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature
12.21	-0.002	-0.13	0	0	مراحل چهارگانه رشد Four stages of growth	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold
34.573	-0.211	-0.1	-0.133	0	زیست‌توده Biomass	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature
22.07	-0.023	-0.003	-0.003	-0.005		مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold

جدول ۶. پارامترهای آماری برای ارزیابی اعتبار توابع.

Table 6. Statistical parameters used for function validation.

آماره‌ها					متغیر	
Statistical Measures					متغیر مستقل	وابسته
R ² _{adj}	R ²	MBE	NRMSE	RMSE	Independent variable	Dependent variable
0.69	0.79	-0.44	0.23	0.84	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
0.07	0.38	18.53	4.39	18.69	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.49	0.66	32.34	1.62	32.36	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست توده Biomass
0.51	0.67	-0.61	0.03	0.72	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.85	0.90	-0.19	0.14	0.57	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	عملکرد Yield
0.82	0.88	-0.081	0.16	0.68	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	
0.74	0.83	-0.44	0.026	0.52	متوسط دمای حداکثر Average maximum temperature	زیست توده Biomass
0.58	0.72	-0.47	0.03	0.60	مجموع دماهای بالای حد آستانه Cumulative temperature above threshold	

فصل رشد
Growing season

مراحل
چهارگانه
رشد

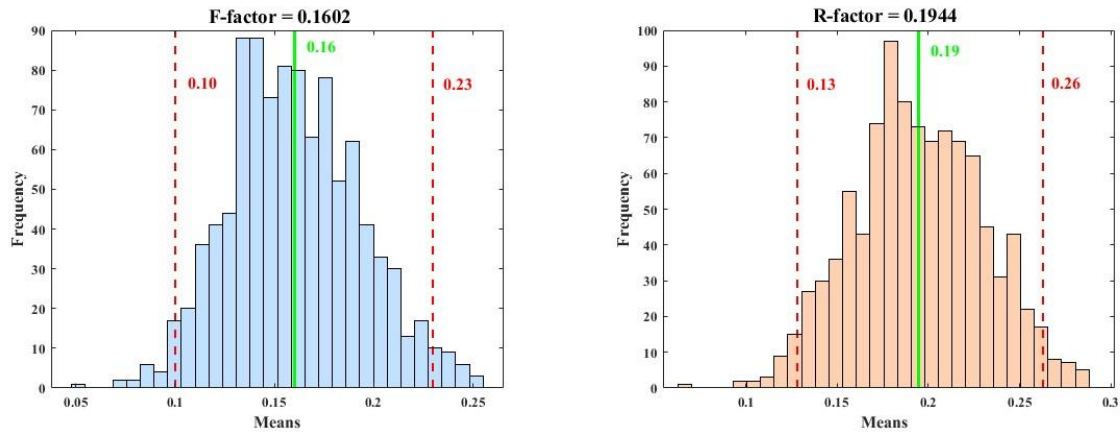
Four stages
of growth

با اندازه‌گیری زمینی برای دو سال ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ که داده‌برداری از ۶ مزرعه مورد مطالعه صورت گرفته، استفاده شد. مقدار $R\text{-factor}=0/1944$ و $F\text{-factor}=0/1602$ بدست آمد (شکل ۲).

با توجه به اینکه مقادیر هر دو شاخص کمتر از ۰/۲ است، می‌توان نتیجه گرفت که عدم قطعیت بین داده‌های مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده در سطح قابل قبول و پایین قرار دارد.

مقایسه عملکرد پایه (در شرایط دمای معمول) با عملکرد ثبت شده پس از افزایش دما نشان داد که درصد کاهش عملکرد در بازه‌ای بین ۱۳ تا ۲۵ درصد متغیر است. این میزان کاهش می‌تواند ناشی از هم‌زمانی افزایش دما با مراحل حساس رشد گیاه مانند گلدهی یا پر شدن دانه، و نیز تنش‌های محیطی هم‌زمان مانند تنش خشکی باشد.

شاخص‌های $R\text{-factor}$ و $F\text{-factor}$ برای بررسی میزان تطابق برآورد زیست توده از داده‌های رابطه مدل‌سازی شده



شکل ۲. عدم قطعیت زیست‌توده حاصل از رابطه مدل‌سازی با داده‌های زمینی

Fig 2. Biomass uncertainty resulting from the relationship between modeling and ground-based data

نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه، ذرت جزو گیاهان زراعی استراتژیک به شمار می‌آید، اگر بتوان با توجه به نیازمندی‌های دمایی این گیاه مناطق مساعد کشت را شناسایی نموده و محدودیت‌ها یا توانمندی‌هایی که اقلیم در محیط ایجاد کرده را شناسایی کرد، قطعاً می‌توان به عملکرد بیشتری در واحد سطح دست یافت که این امر خود موجب بهبود شرایط اقتصادی کشاورزان و سطح درآمد کشور از کشاورزی خواهد شد. مطالعات متنوعی در سراسر جهان بر روی رابطه بین اقلیم، رشد و نمو و عملکرد گیاهان صورت گرفته است. طبق نتایج پژوهش حاضر و پژوهش‌های پیشین، مدل AquaCrop در شبیه‌سازی مقدار عملکرد و زیست‌توده کارایی خوب و مناسبی دارد.

در بررسی اثر دما، طبق نتایج مشخص شد که متوسط دمای حداکثر بر روی مراحل مختلف رشد ذرت اثر منفی داشته و این اثر در مرحله گلدهی بیشتر است. با توجه به منفی شدن مقدار ضرایب توابع تولید (برآورد عملکرد و زیست‌توده)، اثر کاهشی بر روی میزان زیست‌توده و عملکرد کاملاً مشهود است. اما با استفاده از مدیریت مناسب مانند تغییر تاریخ کاشت و استفاده از هیبرید مقاوم به دما می‌توان تا حدی اثرات منفی دمای حداکثر را

در مطالعات مشابه نیز از این شاخص‌ها برای ارزیابی کیفیت مدل‌سازی استفاده شده است. دوریگو و همکاران (Albergel et al., 2010) و آلبرژل و همکاران (Dorigo et al., 2012) از شاخص‌های F و R برای بررسی میزان تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهدات زمینی در ارزیابی رطوبت خاک استفاده کردند. آن‌ها نیز مقادیر کمتر از ۰/۲ را به‌عنوان شاخصی از تطابق خوب و عدم قطعیت پایین تفسیر کردند. محققان در پژوهشی در آلاسکا، به ارزیابی عدم قطعیت تخمین زیست‌توده جنگلی با تلفیق داده‌های لیدار (LiDAR¹)، تصاویر ماهواره‌ای و مشاهدات میدانی به‌منظور برآورد عدم قطعیت در مدل‌های زیست‌توده پرداختند. طبق نتایج این پژوهش، ترکیب داده‌های چند منبعی و استفاده از شاخص‌های آماری دقیق می‌تواند در کاهش عدم قطعیت مدل‌های برآورد زیست‌توده مؤثر باشد (Muukkonen and Heiskanen, 2017). در مجموع، نتایج این مطالعه با یافته‌های تحقیقات مشابه سازگار بوده و نشان می‌دهد که رویکرد مورد استفاده برای ارزیابی تطابق مدل، از دقت و اعتبار کافی برخوردار است.

¹ Light Detection and Ranging

quality of satellite-derived soil moisture products using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 118(1), 386–398. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.017>

Fakhri, M. (2024). Investigating the Condition of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard Period. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(3), 17–32. [doi: 10.22077/jdcr.2024.7392.1062](https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7392.1062)

Fokar, M., Blum, A., & Nguyen, T. (1998). Heat tolerance in spring wheat II. Grain filling. *Euphytica*, 104, 9–15.

Ghorbani, M., Jafari, A., & Azadi, H. (2021). Heat stress risk assessment in maize under climate change scenarios in Khuzestan Province, Iran. *Agricultural Water Management*, 256, 107114. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107114>

Hajivandpaydari, S., Yazdanpanah, H., & Andarzian, S. B. (2023). Investigating the impact of climate change on the growth and yield of seed corn in the north of Khuzestan province using the AquaCrop model. *Journal of Agricultural Meteorology*, 11(2), 40–50. <https://doi.org/10.22125/agmj.2023.330985.1132> [In Persian]

Hawtin, G., Wanage, M., & Hodykin, L. (1996). Genetic responses in breeding for adaptation. *Euphytica*, 92, 255–266.

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2013: Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

Izaurrealde, R. C., Thomson, A. M., Morgan, J., Fay, P., Polley, H., & Hatfield, J. L. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for forage and rangeland production. *Agronomy Journal*, 103(1), 371–381.

Jin, N., He, J., Wang, Y., & Liu, Y. (2020). Yield response of maize to water stress at different growth stages in semi-arid regions. *International Journal of Plant Production*, 14(2), 255–265.

Liu, Z., Hubbard, K. G., Lin, X., & Yang, X. (2013). Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by changing the sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Global Change Biology*, 19(11), 3481–3492.

Mohammadnejad, H., Hosseini, S. M., & Mehrabi, M. (2021). Effect of climate change on the potential yield and water productivity of forage maize in Iran under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. *Agricultural Systems*, 191, 103150. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103150>

Muukkonen, P., & Heiskanen, J. (2017). Reducing the uncertainty of forest biomass estimates using a limited number of field plots. *arXiv preprint*, arXiv:1702.06650. <https://arxiv.org/abs/1702.06650>

کاهش داد. طبق نتایج حاصل از توسعه توابع تولید، توابع خطی ای که بر اساس داده‌های فصل رشد توسعه یافت، عملکرد با متغیر مستقل متوسط دمای حداکثر و زیست-توده با متغیر مستقل مجموع دماهای بالای حد آستانه تخمین مناسبی داشتند. در مورد توابع بر اساس داده‌های مرحله رشد، هر چهار تابع تخمین خوب و دقیقی از مقادیر عملکرد و زیست‌توده دادند. در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که بررسی مرحله‌ای بهتر و دقیق‌تر از بررسی بر اساس فصل رشد است.

منابع

Albergel, C., Dorigo, W., Reichle, R., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L.,... & Wagner, W. (2012). Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.017>

Alishiri, R., Paknejad, F., & Aghayari, F. (2014). Simulation of sugar beet growth under different water regimes and nitrogen levels by AquaCrop [In Persian]. *Bioscience*, 4(4), 1–9. <https://doi.org/10.12692/ijb/4.4.1-9>

Alizadeh, A. (2010). *Climate and meteorological agriculture*. Mashhad: Imam Reza University Press. First Edition, 502p. [In Persian]

Bayatani, F., Fallah Ghalhar, G. A., Karami, M., & Taei Semiromi, J. (2020). The effects of climate change on the risk of cold stress in autumn crop patterns (Case study: Tropical and subtropical areas of Kerman province). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 9(24), 63–78. <https://doi.org/10.22111/jneh.2019.29471.1507> [In Persian]

Bazgir, S. (2016). Corn yield estimation using Agroclimatic Indices in the West and Southwest regions of Iran. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 15(39), 7–32. <http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3568-fa.html> [In Persian]


Deng, Y., Ye, Q., Yu, J., Djanaguiraman, M., & Jin, Y. (2023). A hybrid data-driven and process-based model predicts maize yield with high accuracy under varying environmental conditions. *Communications Biology*, 6, 932. <https://doi.org/10.1038/s42003-023-05268-3>

Dorigo, W. A., Scipal, K., Parinussa, R. M., Liu, Y. Y., Wagner, W., de Jeu, R. A., & Fernández-Prieto, D. (2010). A new methodology for assessing the

- Neiff, N., Trachsel, S., Valentinuz, O. R., Balbi, C. N., & Andrade, F. H. (2016). High temperatures around flowering in maize: Effects on photosynthesis and grain yield in three genotypes. *Crop Science*, 56(6), 2702–2712.
- Qi, Y., Zhang, Q., Hu, S., Wang, R., Wang, H., Zhao, H., Ren, S., Yang, Y., & Chen, F. (2022). Effects of high temperature and drought stresses on growth and yield of summer maize during grain filling in North China. *Agriculture*, 12(11), 1948. <https://doi.org/10.3390/agriculture12111948>
- Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the influence of different ETo estimation methods in the simulation of wheat actual evapotranspiration and biomass by the AquaCrop model. *Water and Soil*, 37(1), 1–14. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171> [In Persian]
- Ramezani Etedali, H., & Safari, F. (2023). Evaluation of the effect of some temperature and radiation methods for estimation of reference evapotranspiration (ET_o) on maize actual evapotranspiration and biomass. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 17(1), 1–13. <https://doi.org/10.22067/jsw.2022.76839.1171> [In Persian]
- Roth, G. (2015). Weather Effects on Corn Silage. http://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/Weather_Effects_on_Corn_Silage.htm
- Safari, F., & Kaviani, A. (2022). Crop yield response to water. Qazvin: Imam Khomeini International University Publications. [In Persian]
- Sarkohaki, A., Egdernezhad, A., & Minaei, S. (2021). Determining the accuracy and efficiency of water-driven and carbon-driven crop models to simulate the yield, biomass, and water use efficiency of corn. *Journal of Water and Soil Science*, 25(1), 141–156. <http://jstnar.iut.ac.ir/article-1-4038-en.html> [In Persian]
- Sayyahi, H., Egdernezhad, A., & Ebrahimipak, N. A. (2020). Evaluation of AquaCrop and WOFOST for simulation of sugar beet yield and water productivity under different irrigation intervals and fertilizer stress. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(10), 2593–2605. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2020.300418.668568> [In Persian]
- Steduto, P., Hsiao, T. C., Fereres, E., & Raes, D. (2012). *Crop yield response to water (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66)*. FAO, Rome.
- Stone, P. (2000). The effects of heat stress on cereal yield and quality. In A. S. Basra (Ed.), *Crop Responses and Adaptations to Temperature Stress* (pp. 243–291). Food Products Press.
- USDA. (2013). Weather effects on expected corn and soybean yields. *Economic Research Service Report FDS-13g-01*. https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/45014/39389_fds13g01.pdf
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Nawaz, M. A., & Farooq, M. (2021). Thermal stresses in maize: Effects and management strategies. *Plants*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/plants10020293>
- Yazdani, M., Zehtabian, G. H., & Salehi, H. (2022). Predicting maize yield under climate change conditions using regression models. *Field Crops Research*, 275, 108302. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108302>



Application Of Integrated Drought Index In Multivariate Analysis Based On Vine-Copula

Fateme Teimouri¹, Ommolbanin Bazrafshan^{2,*} , Hamid Gholami², Marzieh Shekari³, Hossein Zamani³

1. Ph.D., Student, Department of Natural Resources Engineering and Statistics, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.
2. Professor, Department of Natural Resources Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran .
3. Department of Mathematics, Faculty of Science, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

*Corresponding Author: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

Keywords:

Drought, Drought Index (IDI), Vine copula, Conditional return period, Characteristics of drought.

Received:

12 August 2025

Revised:

05 September 2025

Accepted:

08 October 2025

Introduction

Drought is a multivariate phenomenon whose effects are manifested in characteristics such as duration, magnitude, and intensity. Analyzing drought using only one variable (e.g., precipitation) is insufficient because drought is influenced by various variables such as precipitation, runoff, and soil moisture. Univariate or bivariate indices typically represent only one type of drought (meteorological, hydrological, agricultural, or socio-economic). Since different types of droughts may occur simultaneously, composite indices have been proposed to simultaneously reflect multiple variables and the complex relationships among them. One such method is the vine copula, which, by decomposing the problem into a hierarchy of bivariate pair-copulas, enables precise modeling of multivariate dependencies in high dimensions. The aim of this study is to develop a multivariate drought index based on vine copulas that can model nonlinear correlations among four key drought variables (precipitation, runoff, evapotranspiration, and soil moisture) across different time scales. Additionally, the performance of this new index is compared with univariate and linear composite indices, and its ability to identify historical and compound droughts is evaluated.

How to cite this article:

Teimouri, F., Bazrafshan, O., Gholami, H., Shekari, M. & Zamani, H.(2026). Application of integrated drought index in multivariate analysis based on Vine-Copula. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 95-118. [10.22077/jdcr.2025.9917.1161](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9917.1161)



Another objective of this research is to analyze the risk of concurrent meteorological, hydrological, and agricultural droughts using a conditional vine copula approach and to provide practical management strategies to mitigate drought impacts in vulnerable areas.

Materials and Methods

In this study, to analyze and assess drought over a 20-year period (2000–2020) in the Minab watershed, four drought monitoring indices were used: SPI (Standardized Precipitation Index), SRI (Standardized Runoff Index), SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), and SMDI (Soil Moisture Deficit Index). Subsequently, based on the three indices SPI, SRI, and SMDI, which exhibited the highest mutual correlation, an integrated drought index (IDI) was constructed using the vine copula method. This approach enables for the independent selection of dependency functions for each pair of variables and is particularly effective in modeling hydrological phenomena such as drought, which involves variables like precipitation, runoff, and soil moisture. Vine copula preserves the complex relationships among variables while reducing computational complexity, providing an efficient solution for analyzing high-dimensional problems. Finally, using drought characteristics (intensity, duration, magnitude, and peak) derived from the integrated drought index (IDI), the conditional return period was calculated.

Result and Discussion


The results showed that the Frank copula function with parameters 4.8 and 7.1 is the most suitable dependency model for the SPI-SRI and SRI-SMDI pairs, respectively. This selection was made based on Kendall's tau values (0.441 and 0.567), indicating a moderate to strong dependency between the variables. Among the four drought indices, the three indices SPI, SRI, and SMDI, which had the highest correlation, were analyzed. The results indicate that in the C-vine structure, the SRI drought variable is positioned at the root node of the first tree and connects with the two other drought variables, reflecting the strong dependency of SRI with the other variables. Furthermore, given the correlation coefficient of 0.82 between the SPI and SRI drought indices, the highest among the pairs, they were selected as the first suitable index pair and the first edge for constructing the multivariate drought index using the vine copula method. The developed IDI index demonstrated superior ability in identifying compound droughts compared to univariate indices. Return period analysis showed that in the multivariate case, the $M \mid SDP$ scenario at a probability of 0.99 reaches a return period of 225337 years, indicating the rarity of high-magnitude drought events along with other features. The examination of relationships among drought characteristics also revealed a strong correlation (0.95) between drought intensity and duration. Additionally, drought persistence conditional on intensity, magnitude, and peak ($D \mid MSP$) at the same 0.99 probability yielded a return period of 11,388 years, which is lower than the first case but still considered extremely large.

Conclusion

This comprehensive study examined the characteristics of drought in the Minab watershed using advanced statistical methods. The results showed that SRI acts as the central variable in the tree structure, with the highest correlation observed between SPI and SRI. The analysis of drought characteristics revealed the strongest correlation (0.95) between drought intensity and duration. Examination of conditional probability functions indicated that at low drought magnitudes, the likelihood of short-term droughts increases. Additionally, long-term droughts generally have moderate magnitudes and less frequently reach critical levels. This study demonstrated that using composite methods such as vine copulas can provide a better understanding of drought phenomena and their features. The findings suggest that multivariate drought analysis can be a powerful tool for water resource management and drought risk assessment. The observed differences in return periods and relationships among variables emphasize the importance of regional drought analysis and caution against directly generalizing results to other areas. These results can serve as a solid scientific basis for management decisions in confronting drought events.



کاربرد شاخص یکپارچه خشکسالی در تحلیل چندمتغیره ریسک براساس واین کاپولا

فاطمه تیموری^۱، ام‌البنین بذرافشان^{۲*} , حمید غلامی^۲، مرضیه شکاری^۲، حسین زمانی^۲

- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
- ۲- استاد، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.
- ۳- استادیار، گروه آمار، دانشکده علوم، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

*نویسنده مسئول: o.bazrafshan@hormozgan.ac.ir

چکیده

این مطالعه به توسعه و ارزیابی شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI) با استفاده از روش مفصل واین در حوضه آبخیز میناب پرداخته است. با توجه به ماهیت چندبعدی خشکسالی و محدودیت‌های شاخص‌های تک‌متغیره، این تحقیق رویکردی نوین برای ترکیب چهار شاخص کلیدی خشکسالی (SRI، SPI، SPEI و SMDI) ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد تابع مفصل فرانک با پارامترهای وابستگی ۴/۸ و ۷/۱ به ترتیب برای جفت‌های SPI-SRI و SRI-SMDI مناسب‌ترین مدل وابستگی است. ساختار سلسله‌مراتبی مفصل واین مشخص کرد که شاخص SRI به عنوان متغیر محوری عمل می‌کند و بیشترین همبستگی (۰/۸۲) بین SPI و SRI مشاهده شد. شاخص IDI توسعه یافته در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره، توانایی بالاتری در شناسایی خشکسالی‌های مرکب نشان داد. تحلیل دوره بازگشت نشان داد در حالت چندمتغیره، سناریوی SDP | M در احتمال ۰/۹۹ به دوره بازگشت ۲۲۵۳۲۷ سال می‌رسد که نشان‌دهنده نادر بودن رویدادهای خشکسالی با بزرگی بالا در کنار سایر ویژگی‌هاست. بررسی روابط بین مشخصه‌های خشکسالی نیز حاکی از همبستگی قوی (۰/۹۵) بین شدت و مدت خشکسالی بود. این مطالعه ثابت کرد روش مفصل واین با مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای خشکسالی، ابزار قدرتمندی برای ارزیابی جامع ریسک خشکسالی فراهم می‌کند. یافته‌ها می‌تواند مبنای علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد، هرچند پیچیدگی محاسباتی و نیاز به داده‌های با کیفیت از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شوند.

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی، شاخص (IDI)، مفصل واین، مشخصه‌های خشکسالی، دوره بازگشت شرطی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۵/۲۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۶/۱۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۱۷

مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای چندمتغیره است که با مشخصه‌هایی مانند مدت، بزرگی و شدت خشکسالی توصیف می‌شود. ارزیابی ریسک تک‌متغیره خشکسالی تنها یک ویژگی را در نظر می‌گیرد و قادر به بازتاب پیچیدگی‌های این پدیده نیست؛ بنابراین برای شناسایی دقیق خشکسالی نیاز به شاخص خشکسالی قابل اعتماد است (Maity et al., 2016). شاخص‌های خشکسالی به سه دسته‌ی تک‌متغیره (مانند SPI برای خشکسالی هواشناسی)، چندمتغیره (در نظر گرفتن چند متغیر مانند بارش و رطوبت خاک) و ترکیبی^۴ (ادغام چند شاخص برای نمایش جامع‌تر خشکسالی) تقسیم می‌شوند (Xu et al., 2015). تحلیل خشکسالی با یک متغیر (مثلاً فقط بارش) کافی نیست، چرا که خشکسالی با متغیرهای مختلفی مانند بارش، رواناب و رطوبت خاک مرتبط است. شاخص‌های تک‌متغیره یا دو متغیره معمولاً فقط یک نوع خشکسالی (هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی یا اجتماعی-اقتصادی) را نشان می‌دهند (Cammalleri et al., 2015). از آن‌جا که انواع خشکسالی ممکن است همزمان رخ دهند، شاخص‌های ترکیبی برای انعکاس همزمان متغیرهای چندگانه و روابط پیچیده بین آن‌ها پیشنهاد شده‌اند.

شاخص‌های ترکیبی خشکسالی مبتنی بر روش‌های خطی (ترکیب خطی، PCA^۵ و وزن آنتروپی) قادر به مدلسازی روابط غیرخطی بین متغیرهای خشکسالی نیستند. این محدودیت منجر به توسعه روش‌های مبتنی بر توابع مفصل شده است که امکان مدلسازی وابستگی‌های پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای چندگانه را فراهم می‌کنند. مفصل‌ها با جداسازی توزیع‌های حاشیه‌ای از ساختار وابستگی، انعطاف‌پذیری بالایی در

عملکرد گیاهان زراعی و سازگاری آنها، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. چنانچه روند این تغییرات سریع باشد، به‌خاطر آنکه گیاهان نسبت به سایر موجودات زنده امکان گریز از شرایط نامساعد را ندارند، بنابراین زیان بیشتری را متحمل خواهند شد. پس هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی به نوبه خود، منجر به تغییر در تولید محصولات کشاورزی می‌شود. کاهش میزان تولید محصولات کشاورزی در اثر سرمازدگی، تگرگ و گرمزدگی از جمله اثرات گرمایش جهانی در بخش کشاورزی است؛ بنابراین دمای هوا، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی به حساب می‌آید (Bayatani et al., 2020).

خشکسالی به عنوان یک مخاطره طبیعی با کمبود طولانی‌مدت آب تعریف می‌شود و به چهار دسته‌ی هواشناسی (کمبود بارش)، کشاورزی (کاهش رطوبت خاک)، هیدرولوژیکی (کمبود جریان رودخانه و آب زیرزمینی) و اجتماعی-اقتصادی تقسیم می‌گردد (Heim, 2002). پایش این پدیده با شاخص‌هایی مانند SPI^۱ و SPEI^۲ (به دلیل سادگی و انعطاف زمانی) و همچنین داده‌های رطوبت خاک (نماینده خشکسالی کشاورزی) انجام می‌شود. سیستم GLDAS-SMDI^۳ به عنوان ابزاری معتبر برای تحلیل رطوبت خاک و خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفته است (Das et al., 2020). درک روابط بین انواع خشکسالی و الگوهای مکانی-زمانی آن‌ها برای مدیریت مؤثر این بحران ضروری است (Mishra & Singh, 2010).

¹ Standardized Precipitation Index

² Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index

³ Soil Moisture-based Drought Index

⁴ Combined Drought Index

⁵ Principal component analysis

تحلیل بارش، دقت بالای مدل D-vine را در برآورد کمبود بارش تأیید کردند، به ویژه برای شرایطی که بارش کمتر از میانگین بلندمدت باشد. در مطالعه بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2021) بر روی حوضه کرخه مشخص شد که دوره بازگشت خشکسالی در حالت AND (همزمانی شاخص‌ها) بسیار محافظه کارانه‌تر از حالت OR عمل می‌کند. آچیت و همکاران (Achite et al., 2022) با توسعه شاخص ترکیبی JDHMI^۲ امکان پایش همزمان خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی را در مقیاس‌های زمانی مختلف فراهم کردند، در پژوهشی دیگر موسوی و همکاران (Musavi et al., 2024) در مدل‌سازی سیلاب، برتری ساختار C-vine نسبت به D-vine را از نظر معیارهای آماری تأیید نمودند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) با به کارگیری مفصل واین، روشی نوین (VCBFA)^۳ برای تحلیل ریسک انتشار خشکسالی ارائه کردند. کاربرد مفصل واین در این مطالعه، مدل‌سازی سلسله‌مراتبی روابط غیرخطی بین خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی بود که امکان تفکیک و ترکیب وابستگی‌های دوجه‌دو را فراهم ساخت. نتایج نشان داد این روش قادر به کمی‌سازی دقیق تأثیر تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی بر تشدید خشکسالی است.

این مطالعه با استفاده از تابع مفصل واین، یک شاخص خشکسالی چهارمتغیره یکپارچه توسعه داده است که نوآوری اصلی آن در ترکیب غیرخطی چهار متغیر کلیدی خشکسالی (بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک) با دقت بالاتر نسبت به روش‌های خطی سنتی مانند وزن‌دهی آنتروپی یا PCA است. این شاخص قادر است

مدلسازی روابط چندمتغیره ارائه می‌دهند (Hao and Singh, 2015). از انواع مفصل‌ها می‌توان به مفصل ارشیمیدی تو در تو^۱ اشاره کرد که از دو بخش ساختار درختی ریشه‌دار و مجموعه‌ای از توابع مولد تشکیل شده است. این ساختار امکان انعطاف‌پذیری بیش‌تر در مدل‌سازی وابستگی‌ها در فضای چندبعدی فراهم می‌کند، در حالی که در موارد ساده‌تر به مفصل آرشیمیدی معمولی تقلیل می‌یابد (Uyttendaele., 2018). همچنین در ابعاد بالا، مفصل‌های کلاسیک با چالش‌هایی مواجه می‌شوند که مفصل‌های واین به عنوان راه‌حلی کارآمد برای این مشکل مطرح شده‌اند. مفصل واین دارای ساختار چند بعدی است که فقط از جفت مفصل (مفصل دو متغیره) تشکیل شده است. برتری مفصل واین نسبت به مفصل‌های قبلی این است که دارای انعطاف‌پذیری بالایی در مدل‌سازی است و هم‌چنین آزادی کامل برای انتخاب مفصل دو متغیره در هر مرحله از ساختار سلسله‌مراتبی را فراهم می‌نماید. این روش با حفظ انعطاف‌پذیری و امکان انتخاب بهینه توابع وابستگی برای هر جفت متغیر، مزیت قابل توجهی نسبت به روش‌های سنتی دارد (Salvadori et al., 2007). این ویژگی‌ها، مفصل واین را به ابزاری قدرتمند برای توسعه شاخص‌های ترکیبی خشکسالی تبدیل کرده است.

در زمینه‌ی کاربرد مفصل واین در تحلیل خشکسالی مطالعات متعددی صورت پذیرفته است. دایال و همکاران (Dayal et al., 2020) با استفاده از مفصل واین، مدل پیش‌بینی خشکسالی مبتنی بر شاخص SPEI را توسعه دادند و نشان دادند مدل‌های مفصلی قابلیت بالایی در پیش‌بینی مشخصه‌های خشکسالی دارند ناظری تهرودی و همکاران (Nazeri Tahroudi et al., 2021) در

² Joint drought hydrometeorological index

³ Vine-Copula-Bayesian Factorial Analysis

¹ Nested Archimedean copulas

تولیدات کشاورزی و حتی تنش‌های اجتماعی-اقتصادی را به دنبال داشته باشد.

از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی و افزایش دما در سال‌های اخیر، احتمال وقوع خشکسالی‌های مرکب (ترکیبی از خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی) را در این حوضه افزایش داده است (Bahari Meimandi et al., 2023).

تعیین شاخص‌های خشکسالی و مشخصه‌های آن

در این پژوهش برای تحلیل و ارزیابی خشکسالی از چهار شاخص پایش خشکسالی (شاخص بارش استاندارد شده)^۱ SRI (شاخص رواناب سطحی استاندارد)، SPEI (شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده) و SMDI^۲ (شاخص کمبود رطوبت خاک) استفاده گردید (جدول ۱). شاخص SPI نمایه‌ای است که بستگی به احتمال بارش برای هر زمان و مقیاس داشته و برای مقیاس‌های زمانی گوناگون قابل محاسبه است. این روش به وسیله مک کی و همکاران (۱۹۹۳) با توجه به بررسی تأثیرات متفاوت کمبود بارش بر آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه توسعه داده شد. شاخص رواناب سطحی استاندارد توسط شوکلا و ود (۲۰۰۸) ارائه شد. این شاخص بر پایه SPI استوار است. لذا جهت محاسبات این شاخص، دقیقاً همان روند محاسبات در شاخص SPI تکرار می‌شود؛ فقط با این تفاوت که به جای داده‌های بارش از داده‌های رواناب سطحی به عنوان داده ورودی استفاده می‌شود. SPEI توسط ویسنته-سیرانو و همکاران (Vicente-Serrano et al., 2010) تهیه شده است و در مطالعات متعدد مورد استفاده قرار گرفته است.

به‌صورت همزمان خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی را پایش کند و رویدادهای خشکسالی مرکب را شناسایی نماید. خشکسالی مرکب به شرایطی اشاره دارد که در آن‌ها خشکسالی هواشناسی (کمبود بارش)، خشکسالی هیدرولوژیکی (کاهش منابع آبی مانند رواناب و آب‌های زیرزمینی)، خشکسالی کشاورزی (کمبود رطوبت خاک و تأثیر بر محصولات) و حتی خشکسالی با تأثیر بر منابع اقتصادی-اجتماعی به‌طور همزمان یا زنجیره‌ای اتفاق می‌افتند (Azhdari et al., 2021). هدف از تحقیق حاضر، توسعه یک شاخص خشکسالی چندمتغیره مبتنی بر مفصل‌واین است که بتواند همبستگی غیرخطی بین چهار متغیر کلیدی خشکسالی (بارش، رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک) را در مقیاس‌های زمانی مختلف مدل‌سازی کند. همچنین، عملکرد این شاخص جدید با شاخص‌های تک‌متغیره و ترکیبی خطی مقایسه شده و توانایی آن در شناسایی خشکسالی‌های تاریخی و مرکب ارزیابی می‌شود. از دیگر اهداف این تحقیق، تحلیل ریسک خشکسالی‌های همزمان هواشناسی، هیدرولوژیکی و کشاورزی با استفاده از رویکرد شرطی مفصل‌واین و ارائه راهکارهای مدیریتی عملی برای کاهش پیامدهای خشکسالی در مناطق مستعد است.

مواد و روش‌ها

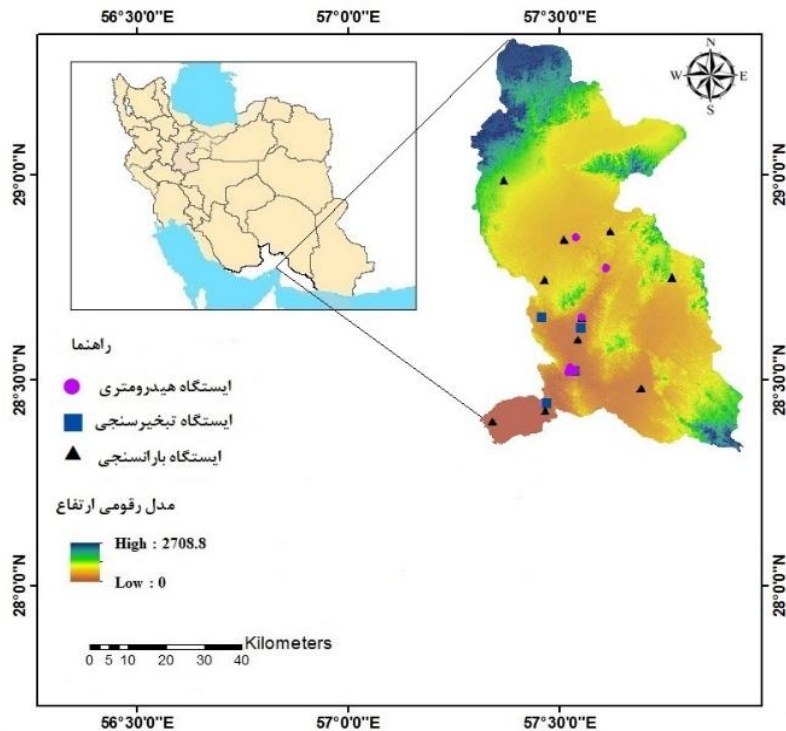
منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز رودخانه میناب با مساحتی معادل ۱۰۵۱۹۰۰ هکتار از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوزه‌های آبخیز سواحل دریای عمان و خلیج فارس در استان هرمزگان است (شکل ۱).

این منطقه با اقلیم نیمه‌خشک و بارش‌های نامنظم، همواره در معرض خطر خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت قرار دارد که می‌تواند پیامدهای جدی مانند کاهش ذخیره سد، افت سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش

¹ Standard Runoff index

² Soil Moisture Deficit Index



شکل ۱. موقعیت ایستگاه های هیدرومتری، تبخیرسنجی و بارانسنجی منطقه ی مورد مطالعه

Fig 1. Location of hydrometric, evapometric, and rain gauge stations in the study area

جدول ۱. انواع شاخص های خشکسالی

Table 1. Type of drought index

فرمول ها (Formulas)	شاخص های خشکسالی (drought index)
$SPI, SRI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$	شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و
$SPI, SRI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$	شاخص رواناب سطحی استاندارد (SRI)
$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3}$	شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI)
$GLDAS - SMDI_{i,m} = \frac{\frac{1}{IP} \int_{j=0}^{IP-1} SM_{i,(m-j)}}{\frac{1}{(n \times IP)} \sum_{k=1}^n [\sum_{j=0}^{IP-1} SM_{i,(m-j)}^*]} \times \sqrt{\frac{RL_{m,i}^{(SM^*)}}{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RL_{m,k}^{(SM^*)}}}$	شاخص کمبود رطوبت خاک (SMDI)

مدل جهانی تلفیق اطلاعات زمینی (GLADS)، به طور مشترک توسط دانشمندان سازمان ملی هوانوردی و فضا (NASA)، و مرکز پرواز فضایی گودارد (GSFC)، سازمان ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) و مرکز ملی پیش بینی محیط زیست (NCEP) در برخی زمینه ها توسعه داده شده است (Rodell et al., 2004).

روش محاسبه SPEI شامل تعادل آب و هوا است و نقش درجه حرارت در ارزیابی خشکسالی را در نظر می گیرد. SPEI براساس تغییرات در تفاضل از بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (P-PET) می باشد. شاخص SMDI با استفاده از داده های رطوبت خاک حاصل از سیستم جهانی تلفیق اطلاعات زمینی محاسبه می گردد.

توابع مفصل واین^۱

در مدل‌سازی چندمتغیره برای ابعاد سه‌گانه و بالاتر، ایجاد توزیع‌های مشترک که بتوانند وابستگی‌های پیچیده بین متغیرها را به طور دقیق مدل کنند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های کلاسیک مانند توزیع نرمال چندمتغیره اغلب در مدل‌سازی وابستگی‌های غیرخطی و رفتار دنباله‌ای داده‌ها محدودیت دارند (Hao and Singh, 2015). در این زمینه، مفصل‌ها با جداسازی ساختار وابستگی از توزیع‌های حاشیه‌ای، چارچوب مناسبی ارائه می‌دهند. برای ساخت مفصل چندمتغیره، دو روش اصلی تودرتو (Nested) و واین (Vine) وجود دارد. روش تودرتو مبتنی بر ترکیب سلسله‌مراتبی مفصل‌های دوتایی است که با افزایش ابعاد، پیچیدگی محاسباتی آن به سرعت افزایش یافته و انعطاف‌پذیری محدودی دارد. در مقابل، روش واین با تجزیه توزیع مشترک به دنباله‌ای از مفصل دوتایی شرطی، انعطاف‌پذیری بالایی در مدل‌سازی وابستگی‌های غیرخطی و نامتقارن ارائه می‌دهد (Uyttendaele., 2018). روش واین به دلایل متعددی برای مدل‌سازی چندمتغیره برتر است. اول، این روش این امکان را می‌دهد برای هر جفت متغیر، متناسب با نوع وابستگی، مفصل‌های دوتایی بهینه انتخاب شود که این انعطاف‌پذیری منجر به دقت بالاتر در روابط پیچیده متغیرها می‌شود. دوم، ساختار مدولار واین مفصل‌ها امکان گسترش به ابعاد بالاتر را بدون از دست دادن دقت فراهم می‌کند. سوم، این روش به ویژه در بررسی وابستگی‌های شرطی و رفتار دنباله‌ای داده‌ها که در پدیده‌های طبیعی مانند خشکسالی بسیار حائز اهمیت است، عملکرد برتری دارد (Salvadori et al., 2007). با در نظر گیری این مزایا، انتخاب روش واین در این مطالعه با هدف دستیابی به بالاترین دقت در مدل‌سازی وابستگی‌های

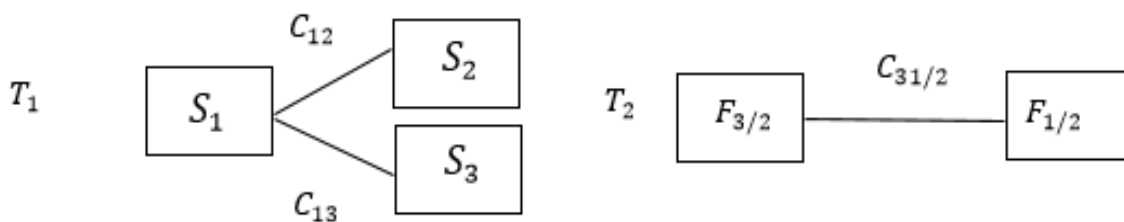
بین متغیرهای خشکسالی و ارائه نتایج قابل اعتماد برای مدیریت ریسک صورت گرفته است.

به طور کلی مفصل واین یک روش ریاضی (آماري) انعطاف‌پذیر است که مجموعه‌ای از توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای تک متغیره را به یکدیگر متصل و یک تابع احتمال تجمعی چند متغیره را ایجاد می‌کند. ویژگی مهم توابع مفصل، ترکیب هر شکلی از توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای است. بدین ترتیب که برای ساخت یک تابع احتمال تجمعی چند متغیره، توابع احتمال تجمعی حاشیه‌ای می‌تواند به طور جداگانه انتخاب شوند و نیازی نیست از توزیع یکسانی تبعیت کنند.

مجموعه‌ای از درخت‌های متصل به هم به منظور اتصال بین جفت-مفصل‌ها مورد استفاده قرار گرفت که واین نرمال نامیده می‌شود (Bedford and Cooke, 2001, 2002). مدل‌های واین شامل دنباله‌ای از درخت‌ها با حداکثر N متغیر و حداکثر $N-1$ لبه می‌باشند. هر لبه نشان‌دهنده یک مفصل دو بعدی در فضای $[0, 1]^2$ می‌باشد. در هر درخت، متغیرها با استفاده از مفصل‌هایی که بعنوان لبه شناخته می‌شوند، توزیع توأمی را تشکیل می‌دهند که همان جفت-مفصل می‌باشد (Czado, 2010). شایان ذکر است که جفت-مفصل‌ها دو بعدی می‌باشند. به نظر می‌رسد مدل‌های گرافیکی (درخت‌های متصل بهم) مدل‌های مناسبی برای ارائه توزیع‌های احتمالاتی توأم با ابعاد بالاتر از دو باشند، بطوری که این مدل‌ها، بطور تصویری به توصیف وابستگی‌های موجود در توزیع‌های توأم می‌پردازند. واین به سه نوع سی-واین (C-vine)، دی-واین (D-vine) و آر-واین (R-Vine) تقسیم‌بندی می‌شوند. ساختار دی-واین شامل درخت‌های با ساختار خطی و ساختار سی-واین شامل درخت‌های با ساختار ستاره‌ای می‌باشند، بطوری که هر یک از درخت‌های ساختار سی-واین دارای یک متغیر مرکزی است. شیوه تجزیه تابع

¹ Vine copula

واین، متغیر مرکزی حداقل به دو متغیر دیگر متصل می باشد و سایر متغیرها حداکثر به یک متغیر مرکزی اتصال دارند. به عنوان مثال با توجه به شکل در ساختار سی- واین سه بعدی، درخت اول T_1 از سه متغیر (گره) S_1 ، S_2 و S_3 و لبه‌های غیر شرطی C_{12} و C_{13} تشکیل شده است. لیکن همانطور که در شکل نمایش داده شده است، گره های درخت T_2 شامل توابع توزیعی شرطی $F_{3/2}$ و $F_{1/2}$ می‌باشند.



شکل ۲. نمایش شماتیک درخت های ساختار سی- واین سه بعدی

Fig 2. Graphical representation of C-vine copula

معیار قادر است یک تعادل میان دقت مدل با پیچیدگی آن برقرار کند که با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$AIC = -2\ln ML + 2K \quad (5)$$

که در آن $\ln ML$ بیانگر لگاریتم مقدار حداکثر تابع درست‌نمایی و K نیز برابر است با تعداد پارامترهای تابع مفصل. با توجه به داده‌ها ممکن است رتبه‌بندی چندین مدل با این معیار صورت گیرد و در نهایت مدلی که کمترین AIC را به خود اختصاص داده است، به عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب می‌گردد.

معیار اطلاعاتی بیزی (BIC)

معیار اطلاعات بیزی توسط گیدون (Gideon, 1978) معرفی گردید که به عنوان یک ابزار مفید در محاسبات آماری جهت انتخاب مناسب ترین مدل بین تعداد محدودی از مدل ها بکار گرفته می شود. محاسبه این

چگالی توزیع سه بعدی توسط ساختار سی-واین در شکل (2) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ساختارهای واین از گره‌ها و لبه‌ها تشکیل شده‌اند که به ترتیب برای نمایش دادن متغیرها و جفت-مفصل بکار برده می‌شوند. مطابق شکل وجه تمایز درخت T_1 و درخت T_2 در غیرشرطی بودن گره‌های درخت اول می‌باشد، در حالی که درخت دوم شامل گره‌های شرطی می‌باشند. علاوه بر این در ساختار گرافیکی درخت‌های مدل سی-

توسعه شاخص یکپارچه IDI با استفاده از مفصل واین

در این پژوهش به منظور ساخت شاخص یکپارچه‌ی خشکسالی (IDI) از بین ۴ شاخص خشکسالی بارش، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق و کمبود رطوبت خاک، ۳ شاخص خشکسالی SPI، SRI و SMDI که بیش‌ترین میزان همبستگی را دارا بودند استفاده گردید. برای ارزیابی همبستگی بین آن‌ها روش گرافیکی استفاده شد. برای بررسی گرافیکی همبستگی متغیرها از نمودار پراکنندگی و خطی و همچنین کای پلات و کندال پلات استفاده شد. عملیات ساخت شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI) در نرم‌افزار R و با استفاده از پکیج VineCopula اجرا شد.

معیارهای ارزیابی تابع مفصل‌ها

معیار اطلاعات آکائیک (AIC)

این معیار که بر مبنای مفهوم آنتروپی استوار است، توسط هیروتوگو آکائیک (Akaike, 1973) ارائه گردید. این

محاسبه مشخصه‌های خشکسالی

هر پدیده خشکسالی با چندین مشخصه شناسایی می‌شود که عبارتند از: شدت، مدت، بزرگی و پیک خشکسالی. در این پژوهش این مشخصه‌ها براساس تئوری ران که یکی از روش‌های رایج تحلیل خشکسالی می‌باشد، محاسبه گردید جدول (۲) (Dracup et al., 1987).

معیار نیز بر اساس تابع درست نمایی و حجم نمونه بوده که با معیار ارزیابی آکائیک ارتباط نزدیکی دارد. هرگاه داده های مشاهداتی دارای تعدادی بیش تر از تعداد پارامترها بود، استفاده از این معیار پیشنهاد می گردد که در قالب رابطه زیر قابل تعریف است.

$$BIC = -2L(\theta) + 2Ln(n)k \quad (۶)$$

که در آن $L(\theta)$ معرف لگاریتم-درست نمایی، k برابر تعداد پارامترها و n نیز تعداد داده ها است (Nagler et al., 2020).

جدول ۲. انواع مشخصه‌های خشکسالی

Table 2. Type of Characteristics of drought

فرمول‌ها (Formulas)	مشخصه‌های خشکسالی (Characteristics of drought)
$DS = \sum_{t=1}^{dt} x_0 - x_t $	شدت (Severity) (۷)
$DL = t_f - t_i + 1$	مدت (Duration) (۸)
$DM = \frac{DS}{DL}$	بزرگی (Magnitude) (۹)
$DP = \min[IDI_{i,j}]$	پیک (Peak) (۱۰)

$$T_{Y/X \geq x} = \frac{T(X)}{E(L)} = \frac{1}{[1 - F_X(x)] \cdot [1 - F_X(x) - F_Y(y) - C(F_X(x) \cdot F_Y(y))]} \quad (۱۲)$$

که در آن $T_{Y/X \geq x}$ معرف دوره‌ی بازگشت شرطی متغیر Y برای حالتی است که متغیر X از حد آستانه تعیین شده (X) تجاوز کرده باشد.

نتایج و بحث

برازش تابع توزیع حاشیه‌ای بر متغیرهای مورد بررسی

نتایج حاصل از برازش توابع توزیع حاشیه‌ای بر متغیرهای مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است. براساس نتایج بر بارش و رواناب تابع لوجستیک، بر تفاضل بارش و تبخیر تعرق و رطوبت خاک بترتیب لوگ

دوره بازگشت شرطی

توابع چگالی جفت-مفصل C شرطی بصورت تابعی از توابع توزیع شرطی می‌باشند. لازم بذکر است که توابع توزیع حاشیه‌ای شرطی با استفاده از مشتق جزئی تابع جفت-مفصل دو بعدی قابل محاسبه می‌باشند. دوره بازگشت‌های شرطی را می‌توان براساس توابع مفصل دو متغیره، در قالب روابط (۱۱) و (۱۲) برای دو حالت شرطی تعریف کرد (Shiau, 2006).

$$T_{X/Y \geq y} = \frac{T(Y)}{E(L)} = \frac{1}{[1 - F_Y(y)] \cdot [1 - F_X(x) - F_Y(y) - C(F_X(x) \cdot F_Y(y))]} \quad (۱۱)$$

که در آن $T_{X/Y \geq y}$ معرف دوره‌ی بازگشت شرطی متغیر X برای حالتی است که متغیر Y از حد آستانه تعیین شده (Y) تجاوز کرده باشد.

برای جفت متغیرهای SPI12-SRI12 و SPI12-SMDI12، تابع مفصل فرانک به عنوان بهترین مدل انتخاب شده است که به ترتیب با پارامترهای $4/8$ و $7/1$ برآورد شده‌اند. این انتخاب با توجه به مقادیر تاوکنندال ($0/441$ و $0/567$) که نشان‌دهنده شدت وابستگی متوسط تا قوی بین متغیرهاست، صورت گرفته است. در مقابل، برای جفت متغیر SPI12-SMDI12، تابع مفصل گوسین با پارامتر $0/05$ و تاوکنندال $0/032$ انتخاب شده که نشان‌دهنده وابستگی بسیار ضعیف بین این دو متغیر می‌باشد.

لجستیک و نرمال بهترین برازش را دارد. در حالی که SPI، SRI، SPEI و SMDI با توزیع نرمال برازش بهتری دارند. معیارهای ارزیابی AIC و BIC نیز تأیید می‌کنند که مدل‌های انتخاب شده از کارایی مناسبی برخوردارند. کمترین مقدار AIC مربوط به رواناب ($563/363$) و کمترین BIC مربوط به SRI ($562/028$) است که نشان‌دهنده برازش بهتر مدل برای این متغیرها می‌باشد. شکل ۳ برازش تابع نرمال را بر شاخص‌های مورد بررسی نشان می‌دهد.

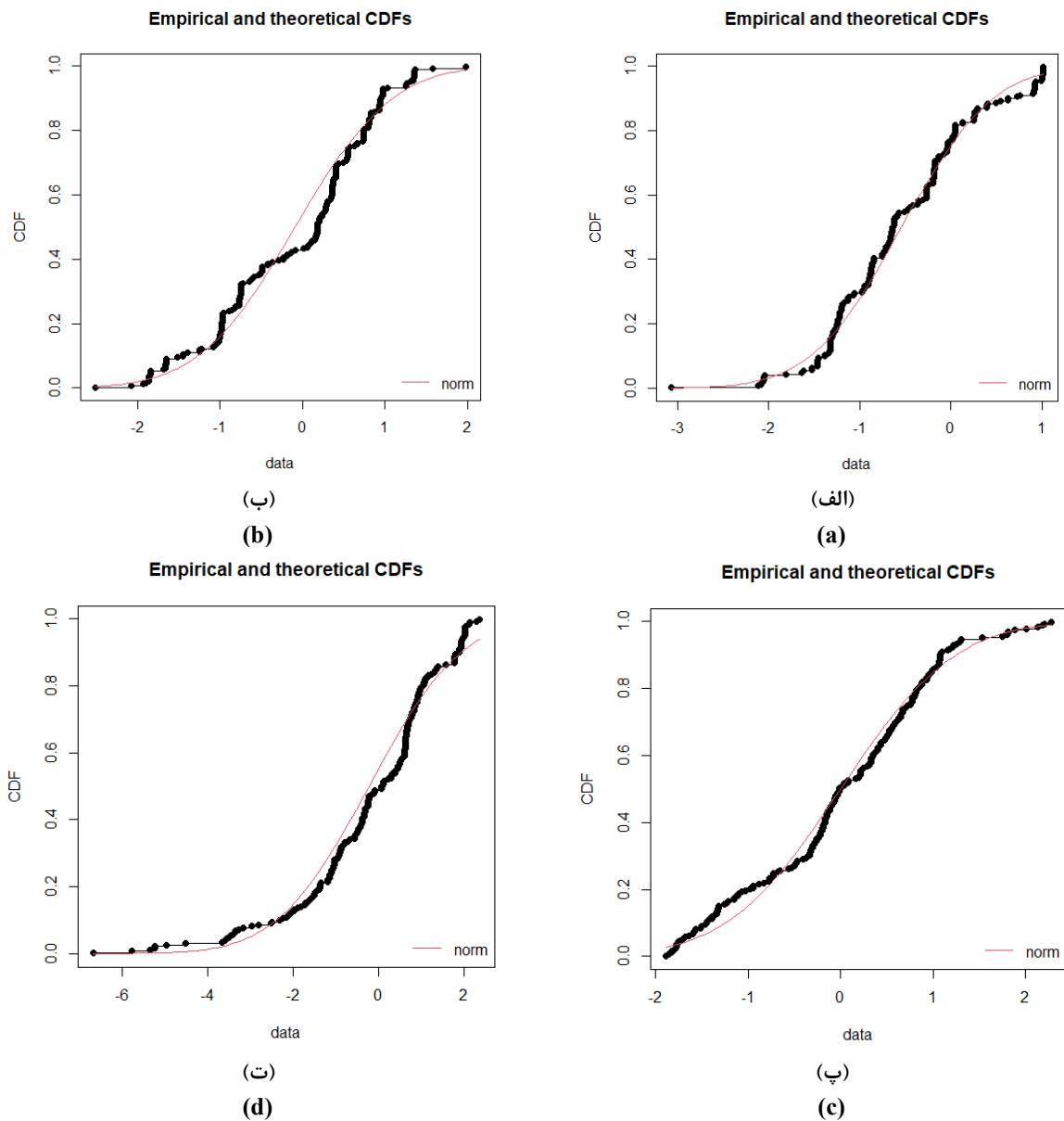
انتخاب مناسب‌ترین تابع مفصل

نتایج جدول ۴ نشان‌دهنده توابع مفصل منتخب برای مدل‌سازی وابستگی‌های دو به دو متغیرهای هیدرولوژیکی است.

جدول ۳. نتایج آزمون نکویی برازش برای تعیین بهترین مدل برازش شده بر متغیرهای مورد بررسی (در سطح معنی داری ۵ درصد)

Table 3. The results of goodness of fit test on the variables under study (at a significance level of 5 percent)

شاخص ارزیابی Evaluation index	پارامتر Parameter	K-S	تابع Function	نام متغیر Variable name
AIC= 630.94;BIC=637.48	$\mu=-0.036$; $\sigma=0.54$	0.30	لجستیک (Logistics)	بارش (Precipitation)
AIC= 563.363;BIC=556.48	$\mu=-0.562$; $\sigma=0.45$	0.58	لجستیک (Logistics)	رواناب (Runoff)
AIC= 768.32;BIC=761.52	$\mu=-0.06$; $\sigma=0.92$	0.23	لوگ لجستیک (Logistic) (Log)	تفاضل بارش و تبخیر-تعرق (Precipitation and evapotranspiration difference)
AIC= 636.07;BIC=642.87	$\mu=0.029$; $\sigma=0.56$	0.61	نرمال (Normal)	رطوبت خاک (Soil moisture)
AIC= 617.23;BIC=624.03	$\mu=0.088$; $\sigma=0.92$	0.33	نرمال (Normal)	SPI
AIC= 555.22;BIC=562.02	$\mu=-0.540$; $\sigma=0.78$	0.34	نرمال (Normal)	SRI
AIC= 749.526;BIC=756.34	$\mu=-0.226$; $\sigma=1.68$	0.36	نرمال (Normal)	SPEI
AIC= 621.67;BIC=628.47	$\mu=1.85$; $\sigma=9.71$	0.67	نرمال (Normal)	SMDI



شکل ۳. نمودار CDF تابع توزیع تجمعی شاخص‌های خشکسالی به ترتیب (الف) SRI، (ب) SPI، (پ) SMDI و (ت) SPEI
Fig 3. CDF diagram of the cumulative distribution function of drought indices, respectively (a) SRI, (b) SPI, (c) SMDI, and (d) SPEI

انتخاب مناسب‌ترین تابع مفصل

نتایج جدول ۴ نشان‌دهنده توابع مفصل منتخب برای مدل‌سازی وابستگی‌های دو به دو متغیرهای هیدرولوژیکی است. برای جفت متغیرهای SPI12-SRI12 و SMDI12-SRI12، تابع مفصل فرانک به عنوان بهترین مدل انتخاب شده است که به ترتیب با پارامترهای ۴/۸ و ۷/۱ برآورد شده‌اند. این انتخاب با توجه به مقادیر

تاوکندال (۰/۴۴۱ و ۰/۵۶۷) که نشان‌دهنده شدت وابستگی متوسط تا قوی بین متغیرهاست، صورت گرفته است. در مقابل، برای جفت متغیر SPI12-SMDI12، تابع مفصل گوسین با پارامتر ۰/۰۵ و تاوکندال ۰/۰۳۲ انتخاب شده که نشان‌دهنده وابستگی بسیار ضعیف بین این دو متغیر می‌باشد.

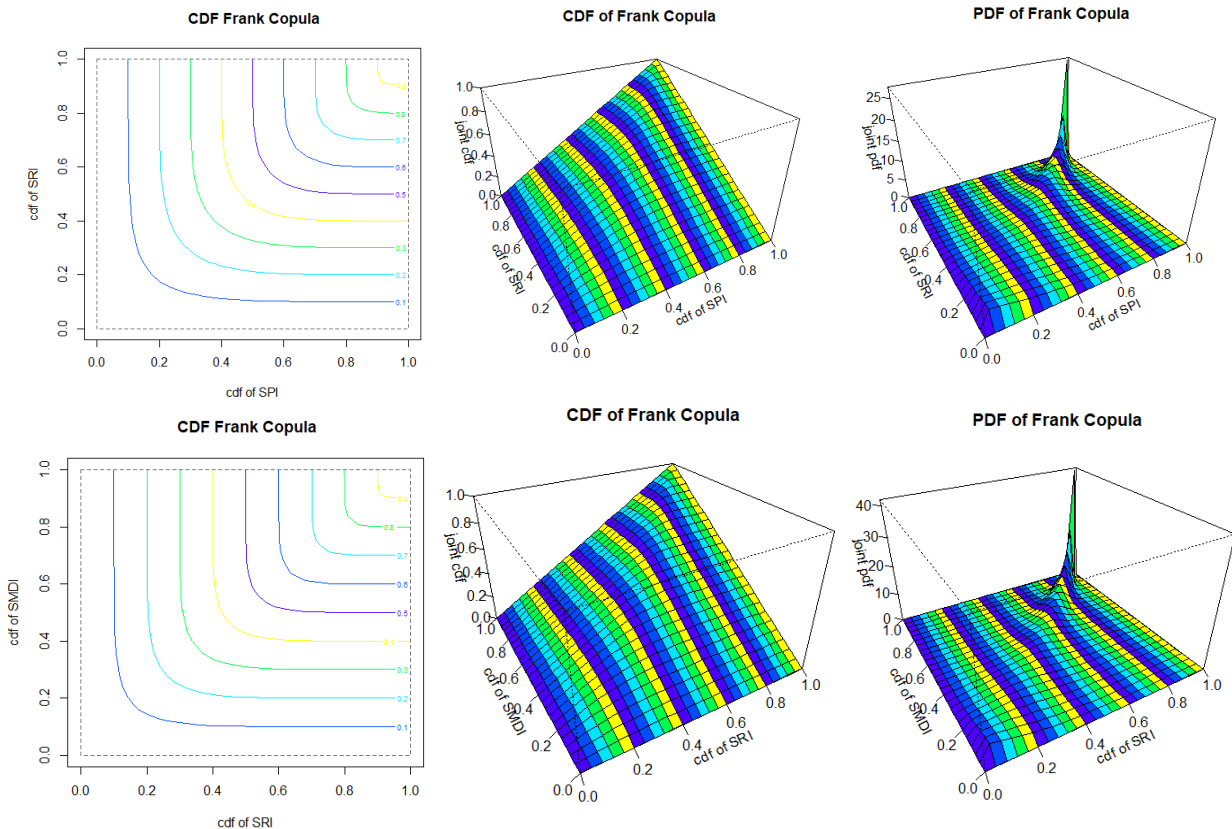
مقادیر آکائیکه و بیزی که برای مدل‌های فرانک به مراتب کمتر از مدل گوسین است، مجدداً برتری این توابع مفصل را در مدل‌سازی وابستگی بین متغیرهای مربوطه تأیید می‌کند. این نتایج برای تحلیل‌های بعدی مانند ارزیابی ریسک خشکسالی‌های مرکب بسیار حائز اهمیت خواهد بود. شکل ۴ نمودار جفت متغیرها بر توابع مفصل منتخب را نشان می‌دهد.

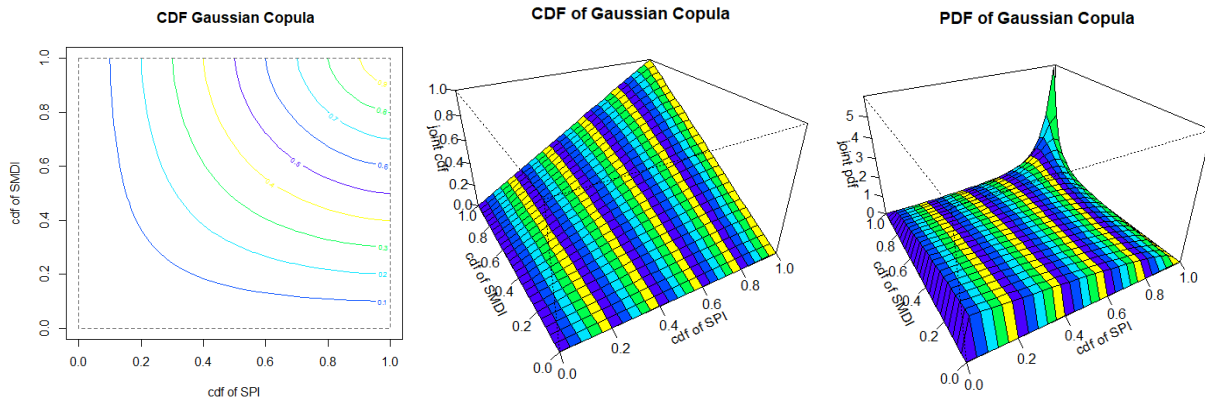
معیارهای ارزیابی شامل لگاریتم تابع درست‌نمایی، آکائیکه و بیزی نیز تأییدکننده مناسب بودن انتخاب‌ها هستند. مقادیر لگاریتم تابع درست‌نمایی برای جفت‌های SPI12-SRI12 و SRI12-SMDI12 به ترتیب ۷۴/۰۶ و ۳۶/۶ بوده که نسبت به مقدار ۰/۳۴ برای SPI12-SMDI12 به وضوح بالاتر است و نشان‌دهنده برازش بهتر مدل‌های فرانک برای این جفت‌متغیرها می‌باشد. همچنین

جدول ۴. توابع مفصل منتخب برای هر یک از جفت متغیرها

Table 4. Selected copula functions for each pair of variables

معیار بیزی (Bayesian)	معیار آکائیکه (Akaike)	لگاریتم تابع درست‌نمایی (Log-likelihood)	ضریب همبستگی تاوکندال (T-Kendall)	پارامتر (Parameter)	مفصل (Copula)	جفت متغیر (variable paired)
202.387	211.089	74.06	0.441	4.8	فرانک (Frank)	SPI12-SRI12
205.86	216.02	36.6	0.567	7.1	فرانک (Frank)	SRI12-SMDI12
204.69	214.21	0.34	0.032	0.05	گوسین (Gaussian)	SPI12-SMDI12





شکل ۴. نمودار CDF و PDF تابع مفصل منتخب جفت متغیرهای مفصل واین
Fig 4. CDF and PDF plot of selected joint function pairs of Vine copula variables

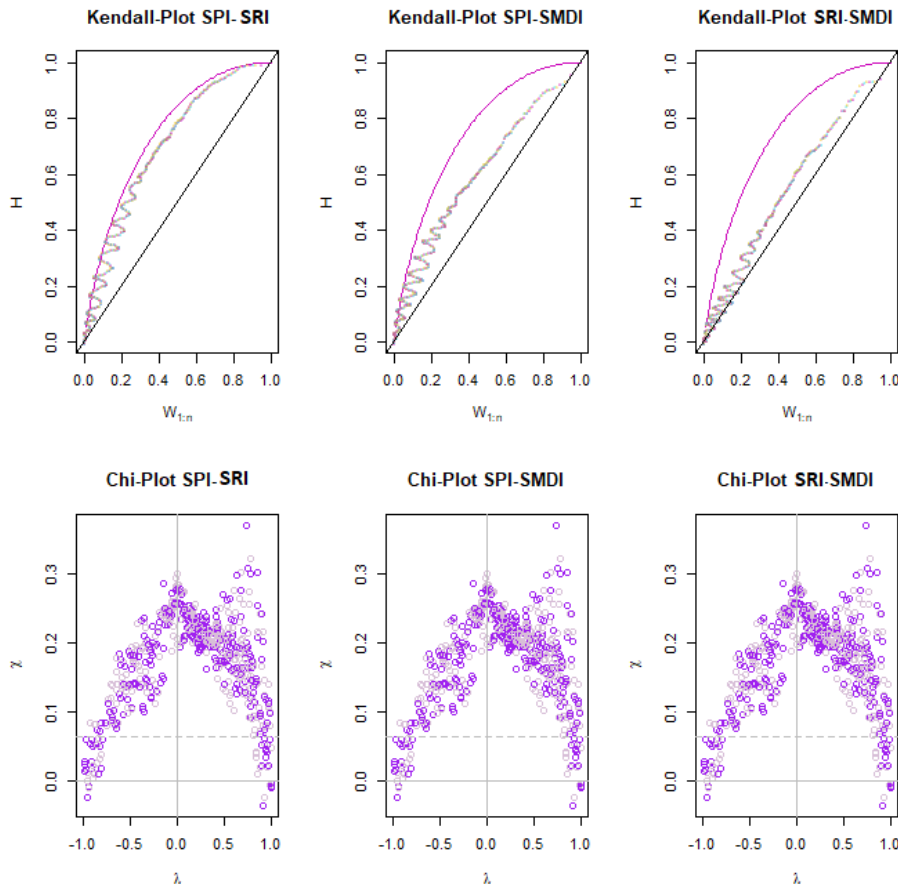
از باند اطمینان برای شاخص‌های خشکسالی مشاهده گردید و بیش از ۹۵ درصد داده‌های دور از محدوده اطمینان کای پلات قرار دارند، لذا همبستگی قابل قبولی بین شاخص‌ها وجود دارد و می‌توان در تحلیل سه متغیره استفاده نمود.

در نهایت از بین چهار شاخص خشکسالی به ترتیب سه شاخص خشکسالی SPI، SRI و SMDI که بیشترین میزان همبستگی را باهم داشتند با استفاده از پیکج Vine copula و ساختار سی-واین در نرم افزار R مورد بررسی قرار گرفتند. با توجه به نتایج بدست آمده در شکل (۶) و جدول (۳) در ساختار سی-واین در درخت اول متغیر خشکسالی SRI در گره ریشه قرار گرفته و با دو متغیر خشکسالی دیگر پیوند برقرار می‌کند و این نشان از وابستگی زیاد متغیر SRI با سایر متغیرها است. و در درخت دوم تنها یک پیوند بین متغیرهای SPI و SRI مشروط بر متغیر SMDI برقرار شده است. از طرفی با توجه به ضریب همبستگی دو شاخص خشکسالی SPI و SRI که دارای بیشترین همبستگی با مقدار ۰/۸۲ بودند به عنوان اولین جفت شاخص مناسب و اولین لبه برای ساخت شاخص خشکسالی چندمتغیره با استفاده از روش مفصل واین انتخاب گردیدند.

توسعه شاخص یکپارچه IDI با استفاده از مفصل واین

در این مطالعه برای ساخت IDI^۱ سه بعدی، $n - 1$ درخت یعنی دو درخت انتخاب شدند. بکارگیری انواع واین به جهت گیری وابستگی در بین متغیرها بستگی دارد. متغیرها بر اساس وابستگی بینشان مرتب می‌شوند، یعنی هر درخت انتخاب شده باید حداکثر همبستگی را داشته باشد. در این مرحله پس از انتخاب سه شاخص خشکسالی بارش، رواناب و رطوبت خاک باید همبستگی بین متغیرها مشخص شود. برای ارزیابی همبستگی بین آن‌ها روش گرافیکی استفاده شد. برای بررسی گرافیکی همبستگی متغیرها از نمودار پراکندگی و خطی و همچنین کای پلات و کندال پلات استفاده شد. این سه گراف ابزاری برای بررسی ساختار همبستگی بین دو متغیر هستند. کای پلات و کندال پلات (شکل ۵) برای شاخص‌های خشکسالی در حوضه آبخیز میناب ارائه شده است. در کندال پلات، زمانی همبستگی دارند که داده‌ها از خط مورب دور شوند. نقاط بالای خط مورب نشان دهنده همبستگی مثبت و نقاط زیر خط مورب نشان دهنده همبستگی منفی است. در کای پلات، خط چین حدود اطمینان ۹۵ درصد است. براساس شکل (۵)، انحراف قوی

¹ Integrated Drought index



شکل ۵. نمودارهای K-Plot و chi-plot متغیرهای خشکسالی

Fig 5. K-Plot and chi-plot diagrams of drought variables

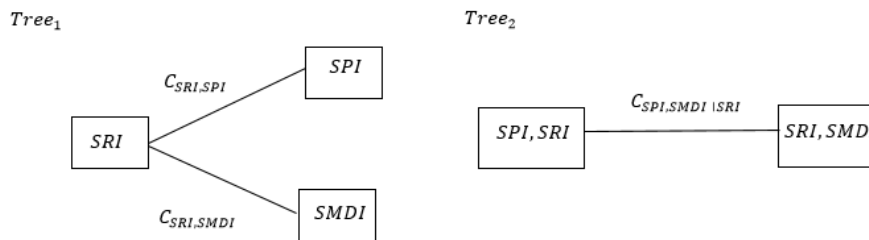
این مطالعه با کارهای پیشین در تأکید ویژه بر نقش محوری شاخص SRI در تحلیل روابط بین شاخص‌هاست. در حالی که برخی مطالعات مانند کار وانگ و همکاران (Wang et al., 2024) بیشتر بر شاخص‌های هواشناسی تمرکز داشتند، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در مناطق با شرایط هیدرولوژیکی حساس، شاخص‌های مبتنی بر جریان رودخانه می‌توانند اطلاعات کلیدی‌تری ارائه دهند.

این یافته برای مدیریت منابع آب در مناطق نیمه‌خشک که جریان‌های سطحی نقش حیاتی در تأمین آب دارند، اهمیت ویژه‌ای دارد.

مطالعه حاضر همچنین نشان می‌دهد که ساختار و این انتخاب شده، با در نظر گرفتن وابستگی‌های شرطی بین شاخص‌ها (مانند رابطه SPI و SRI مشروط بر SMDI در درخت دوم)، توانسته است روابط پیچیده بین متغیرهای خشکسالی را به خوبی مدل کند. این نتیجه با میرعباسی و همکاران (Mirabbasi et al., 2021) که بر مزایای روش مفصل و این در شناسایی روابط غیرخطی و چندسطحی بین شاخص‌های خشکسالی تأکید داشتند، مطابقت دارد. انتخاب این ساختار بهینه، همانطور که در مطالعات دیگر نیز مشاهده شده، منجر به ایجاد شاخص ترکیبی دقیق‌تری شده است که می‌تواند جنبه‌های مختلف خشکسالی را به صورت همزمان پوشش دهد. تفاوت اصلی

جدول ۵. نتایج ساختار سی-واین در شاخص‌های خشکسالی
Table 5. Results of the C-Vine structure on drought indices

پارامتر وابستگی (Parameter)	مفصل (Copula)	لبه (edge)	درخت (Tree)
4.8	فرانک (Frank)	2,1	درخت ۱ (Tree1)
7.1	فرانک (Frank)	2,3	درخت ۲ (Tree2)
7.1	فرانک (Frank)	3,1 2	درخت ۲ (Tree2)



شکل ۶. نمودار ساختار سی-واین متغیرهای شاخص IDI
Fig 6. C-Vine structure diagram of IDI index variables

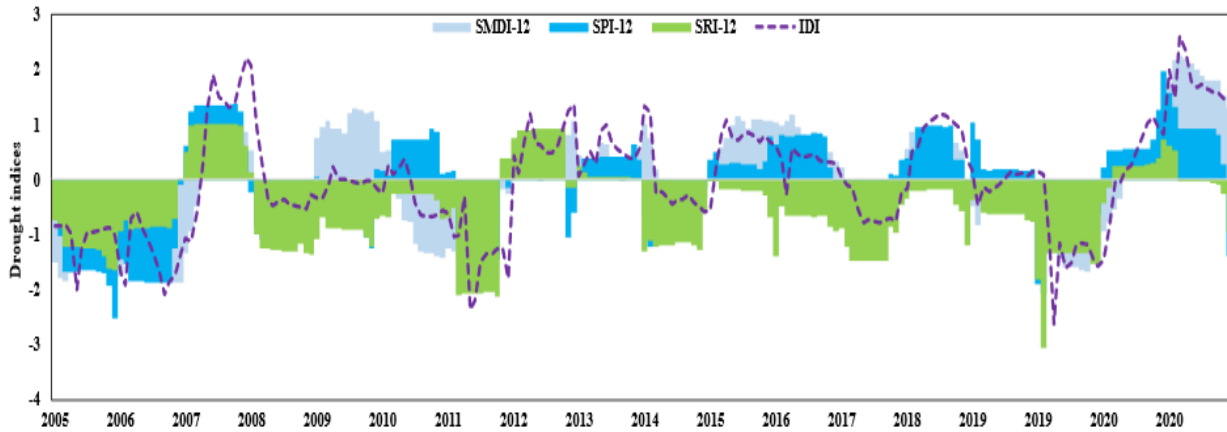
کامل تری از شرایط خشکسالی ارائه می‌دهد که این امر در مدیریت و برنامه‌ریزی منابع آب در برابر خشکسالی‌های پیچیده بسیار حائز اهمیت است.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که شاخص‌های یکپارچه خشکسالی مبتنی بر مفصل واین با مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرهای خشکسالی، برتری قابل توجهی نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره سنتی دارند. تحقیقات ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2025) نشان داد این روش دقت شناسایی خشکسالی‌های مرکب را تا ۲۴٪ بهبود بخشیده است. وو و همکاران (Wu et al., 2021) نیز تأکید کردند این شاخص با ترکیب هوشمندانه چندین شاخص، از خطا در تخمین شدت و تداوم خشکسالی جلوگیری می‌کند. مطالعه میرعباسی و همکاران (Mirabbasi et al., 2021) نشان داد شاخص‌های ترکیبی مانند IDI در مقایسه با SPI یا SRI که ممکن است خشکسالی‌های کاذب گزارش دهند، تصویر واقع‌بینانه‌تری از خطر خشکسالی ارائه می‌دهند. این مزایا باعث شده سازمان‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک، این شاخص‌ها را برای پیش‌بینی بلندمدت خشکسالی و برنامه‌ریزی اقلیمی ترجیح دهند. دلایل اصلی تأیید این روش توسط

مقایسه شاخص یکپارچه خشکسالی IDI و شاخص‌های SPI-12، SRI-12 و SMDI-12
 شکل ۷ مقایسه شاخص یکپارچه خشکسالی IDI و شاخص‌های SPI-12، SRI-12 و SMDI-12 را نشان می‌دهد. بر پایه نتایج این تحلیل جامع، مشخص گردید که قوی‌ترین و پایدارترین رابطه همبستگی بین متغیرهای مورد مطالعه در مقیاس دوازده‌ماهه وجود دارد. از آنجایی که هدف این پژوهش شناسایی روابط ساختاریافته و با ثبات‌ترین الگوها بود، این مقیاس به عنوان مبنا انتخاب گردید. شاخص یکپارچه خشکسالی IDI که با استفاده از مفصل واین توسعه یافته است، در مقایسه با شاخص‌های تک‌متغیره SPI-12 و SRI-12 و SMDI-12، توانایی بالاتری در شناسایی و پیش‌بینی خشکسالی‌های مرکب از خود نشان می‌دهد. به‌ویژه در دو واقعه خشکسالی سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴، شاخص IDI با در نظر گرفتن روابط غیرخطی بین متغیرهای مختلف، شامل شدت و تداوم، بزرگی و پیک (جدول ۶) خشکسالی را به‌صورت جامع‌تر و دقیق‌تری منعکس کرده است. در حالی که شاخص‌های تک‌متغیره تنها بخشی از ابعاد خشکسالی را پوشش می‌دهند، IDI با ترکیب همزمان چندین شاخص، تصویر

مدیریتی است. به طور کلی، جامعه علمی این روش را به دلیل جامعیت، دقت و سازگاری با شرایط اقلیمی مختلف مورد تأیید قرار داده‌اند.

محققان شامل پوشش چندبعدی خشکسالی، کاهش خطاهای شناسایی، انعطاف‌پذیری در مدل‌سازی روابط پیچیده و قابلیت اطمینان بیشتر برای تصمیم‌گیری‌های



شکل ۷. مقایسه شاخص یکپارچه خشکسالی IDI و شاخص‌های SPI-12، SSI-12 و SMDI-12

Fig 7. Comparison of the Integrated Drought Index (IDI) and the SPI-12, SSI-12, and SMDI-12 indices

نتایج نشان می‌دهد IDI توانایی بهتری در انعکاس شرایط واقعی حوضه دارد.

ب: تعادل بین حساسیت و ثبات: شاخص IDI موفق به تعدیل مقادیر افراطی شده است. حداکثر شدت خشکسالی در IDI (۳۱/۸۶) به طور معناداری کمتر از مقادیر مربوط به SRI (۶۹/۹۸) و SPI (۳۸/۵۹) است. همچنین حداکثر مدت خشکسالی در IDI (۲۷ ماه) در مقایسه با SRI (۸۶ ماه) کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد. این تعدیل‌گری حاکی از پایداری بیشتر شاخص توسعه‌یافته در برابر داده‌های افراطی است.

پ: ایجاد تصویر جامع و بدون تناقض: شاخص IDI با شناسایی ۱۰۷ رویداد خشکسالی، تعادل مناسبی بین شاخص‌های مختلف برقرار کرده است. این تعداد بین مقادیر SPI (۹۳ رویداد) و SMDI (۱۰۹ رویداد) قرار دارد و از اغراق SRI (۱۶۶ رویداد) اجتناب می‌کند. همچنین مقادیر میانگین شدت خشکسالی در IDI (۹/۲۹) بین مقادیر SPI (۹/۲۶) و SMDI (۱۰/۶۸) قرار گرفته که نشان‌دهنده ایجاد توازن بین ابعاد مختلف خشکسالی است.

بررسی مشخصه‌های خشکسالی بر اساس شاخص یکپارچه خشکسالی IDI

در مطالعه حاضر چهار متغیر شدت، مدت، بزرگی و پیک شاخص یکپارچه خشکسالی IDI در حوزه‌ی آبخیز میناب استخراج گردید. جدول (۶) ویژگی‌های آمار توصیفی متغیرهای فوق را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد شاخص یکپارچه خشکسالی (IDI) در مقایسه با شاخص‌های انفرادی بر اساس داده‌های جدول ۶ نشان‌دهنده برتری چشمگیر شاخص ترکیبی توسعه‌یافته است. این برتری در سه محور اصلی قابل تبیین است:

الف: تطابق با واقعیت‌های فیزیکی حوضه: شاخص IDI با میانگین مدت خشکسالی ۱۰/۹ ماه، نمای واقع‌بینانه‌تری از شرایط هیدروکلیماتولوژیکی حوضه ارائه می‌دهد. در مقابل، شاخص SRI-12 با میانگین مدت ۳۳/۲ ماه (نزدیک به سه سال) خشکسالی‌های غیرواقعی طولانی مدتی را نشان می‌دهد که با رفتار هیدرولوژیکی رودخانه‌های فصلی حوضه میناب سازگاری ندارد. این

روش‌های ترکیبی مبتنی بر مفصل تأکید داشته‌اند، هرچند چالش‌هایی مانند پیچیدگی محاسباتی و وابستگی به کیفیت داده‌های ورودی همچنان به قوت خود باقی است. براساس نتایج Liu و همکاران (۲۰۲۰) مقایسه با روش‌های جایگزین مانند تکنیک‌های وزن‌دهی ساده نشان می‌دهد که رویکرد مفصل و این‌علی‌رغم نیاز به محاسبات پیچیده‌تر، از پایداری و انعطاف‌پذیری بیشتری در شناسایی خشکسالی برخوردار است.

در مجموع، شاخص IDI با بهره‌گیری از روش واین کاپولا، توانسته است با مدل‌سازی وابستگی‌های غیرخطی بین شاخص‌های مختلف، تصویر متعادل‌تر و واقع‌بینانه‌تری از پدیده خشکسالی ارائه دهد که به واقعیت‌های فیزیکی حوضه نزدیک‌تر است. مطالعات مشابه در مناطق مختلف از جمله پژوهش‌های ژانگ (Zhang et al., 2025) در چین و ریبیرو (Ribeiro et al., 2020) در منطقه مدیترانه نیز بر مزایای

جدول ۶. آمار توصیفی مشخصه‌های خشکسالی به دست آمده از شاخص IDI در حوضه مورد مطالعه

Table 6. Descriptive statistics of drought characteristics obtained from the IDI index in the study basin

IDI	SMDI-12	SRI-12	SPI-12	شاخص	آمار توصیفی
				(Index)	(Descriptive statistics)
107	109	166	93	(Number of droughts)	تعداد خشکسالی
31.86	39.27	69.98	38.59	ماکزیمم شدت خشکسالی	(Maximum drought severity)
27	29	86	24	ماکزیمم مدت خشکسالی	(Maximum drought duration)
1.2	1.454	1.255	1.607	ماکزیمم بزرگی خشکسالی	(Maximum magnitude of drought)
2.607	1.882	3.068	2.5102	ماکزیمم پیک خشکسالی	(Maximum drought peak)
9.29	10.68	28.63	9.26	میانگین شدت خشکسالی	(Average drought severity)
10.9	13.62	33.2	9.4	میانگین مدت خشکسالی	(Average drought duration)
0.61	0.487	0.642	0.818	میانگین بزرگی خشکسالی	(Average drought magnitude)
1.1037	0.823	1.946	2.2108	میانگین پیک خشکسالی	(Average peak drought)
0.28	0.0114	0.275	0.147	مینیمم شدت خشکسالی	(Minimum drought severity)
1	1	2	1	مینیمم مدت خشکسالی	(Minimum drought duration)
0.07	0.0114	0.137	0.147	مینیمم بزرگی خشکسالی	(Minimum drought magnitude)
0.0236	0.011	0.959	0.147	مینیمم پیک خشکسالی	(Minimum drought peak)

می‌کند و این نشان از وابستگی زیاد متغیر مدت با سایر متغیرها است. و در درخت دوم دو سناریوی پیک و بزرگی به شرط مدت و همچنین شدت و بزرگی به شرط مدت برقرار بوده است. در نهایت درخت سوم شدت و پیک به شرط مدت و بزرگی می‌باشد.

برازش مفصل و این بر مشخصه های خشکسالی
قبل از محاسبه دوره بازگشت خشکسالی، بایستی مفصل و این بر مشخصه‌های خشکسالی برازش یابد. با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۷) در ساختار سی- و این در درخت اول متغیر خشکسالی مدت در گره ریشه قرار گرفته و با سه متغیر خشکسالی دیگر پیوند برقرار

جدول ۷. نتایج ساختار سی-و این مشخصه های خشکسالی

Table 7. Results of the C-Vine structure of drought characteristics

پارامتر (Parameter)	مفصل (Copula)	لبه (edge)	درخت (Tree)
0.86	گوسین (Gaussian)	3,1	درخت ۱ (Tree1)
3	کلایتون (Clayton)	2,1	
2.4	کلایتون (Clayton)	1,4	
2, 2.81	t	3,2 1	درخت ۲ (Tree2)
7, 0.55, 0.35	tawn	2,4 1	
0.94, 2.38	bb8	3,4 2,1	درخت ۳ (Tree3)

مشخصه‌های خشکسالی تحت شرایط خاص محاسبه شده است. دو سناریوی اصلی بررسی شده‌اند: بزرگی خشکسالی به شرط شدت، مدت و پیک خشکسالی ($M | SDP$): در احتمال ۰/۹۹، دوره بازگشت به ۲۲۵۳۳۷ سال می‌رسد که بسیار بزرگ است و نشان می‌دهد وقوع همزمان خشکسالی با این ویژگی‌ها بسیار نادر است. تداوم خشکسالی به شرط شدت، بزرگی و پیک ($D | MSP$): در همان احتمال ۰/۹۹، دوره بازگشت ۱۱۳۸۸ سال است که نسبت به حالت اول کمتر است اما همچنان عدد بسیار بزرگی محسوب می‌شود. دوره بازگشت در سناریوی $M | SDP$ بسیار بیشتر از $D | MSP$ است، که نشان می‌دهد ترکیب بزرگی با دیگر ویژگی‌های خشکسالی، نسبت به ترکیب مدت با همان ویژگی‌ها، وقوع کم‌تری دارد. این تفاوت به این معنی است که خشکسالی‌های با بزرگی بالا در کنار شدت، مدت و پیک مشخص، نسبت به خشکسالی‌های با مدت طولانی در همان شرایط، بسیار غیرمتمثل‌تر هستند. بر اساس

دوره بازگشت شرطی مشخصه‌های خشکسالی
در جدول (۸)، مقادیر دوره بازگشت برای مشخصه‌های خشکسالی (شدت S، مدت D، بزرگی M، و پیک P) در سطوح مختلف احتمال تجمعی (از ۰/۵ تا ۰/۹۹) به دو صورت تک‌متغیره و چندمتغیره شرطی محاسبه شده است. در حالت تک‌متغیره، با افزایش احتمال تجمعی، دوره بازگشت برای همه مشخصه‌ها افزایش می‌یابد. برای مثال، در مورد شدت (S)، دوره بازگشت از ۵/۴۱۲ سال در احتمال ۰/۵ به ۶۰/۵۷۱ سال در احتمال ۰/۹۹ می‌رسد. این روند برای مدت (D)، بزرگی (M) و پیک (P) نیز مشاهده می‌شود، اما مقادیر دوره بازگشت در مشخصه‌های مختلف متفاوت است. به‌طور خاص، بزرگی (M) و پیک (P) دوره‌های بازگشت کوتاه‌تری نسبت به شدت (S) و مدت (D) دارند، که نشان می‌دهد وقوع خشکسالی‌های با بزرگی و پیک بالا نسبت به خشکسالی‌های با شدت و مدت طولانی‌تر محتمل‌تر است. در حالت چندمتغیره، دوره بازگشت برای ترکیب

کوتاه‌مدت به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. این امر بیانگر آن است که در سطوح پایین بزرگی خشکسالی، معمولاً با دوره‌های خشکسالی محدود و گذرا مواجه می‌باشد. از سوی دیگر، هنگامی که مدت خشکسالی (D) به ۱/۱۵۷ می‌رسد در حالی که شدت در ۰/۳۲۲ و پیک در ۰/۳۶۱ ثابت مانده‌اند، مقادیر بزرگی خشکسالی عمدتاً در محدوده متوسط (بین ۰/۱ تا ۰/۴) قرار می‌گیرند. این نتایج حاکی از آن است که خشکسالی‌های با مدت طولانی‌تر معمولاً از نظر بزرگی در حد متوسط باقی می‌مانند و کمتر به سطوح بحرانی می‌رسند. مقایسه این دو سناریو نشان می‌دهد که با افزایش مدت خشکسالی از حدود ۰/۳ به ۱/۱، مقدار میانگین بزرگی خشکسالی از حدود ۰/۰۶ به ۰/۲ افزایش می‌یابد، اما به ندرت از ۰/۴ فراتر می‌رود. این الگو تأیید می‌کند که اگرچه رابطه مثبتی بین مدت و بزرگی خشکسالی وجود دارد، اما این رابطه خطی نبوده و پس از رسیدن به حد معینی، بزرگی خشکسالی با نرخ کمتری افزایش می‌یابد. از دیدگاه مدیریت منابع آب، این یافته حائز اهمیت است چرا که نشان می‌دهد خشکسالی‌های طولانی‌مدت، حتی اگر از نظر بزرگی در سطوح بسیار بحرانی قرار نگیرند، به دلیل تداوم اثراتشان نیازمند توجه ویژه هستند. در مقابل، خشکسالی‌های کوتاه‌مدت با مقادیر پایین‌تر بزرگی (در حدود ۰/۰۶) اگرچه ممکن است اثرات فوری کمتری داشته باشند، اما تکرار آن‌ها می‌تواند تأثیر تجمعی قابل ملاحظه‌ای بر منابع آب وارد کند.

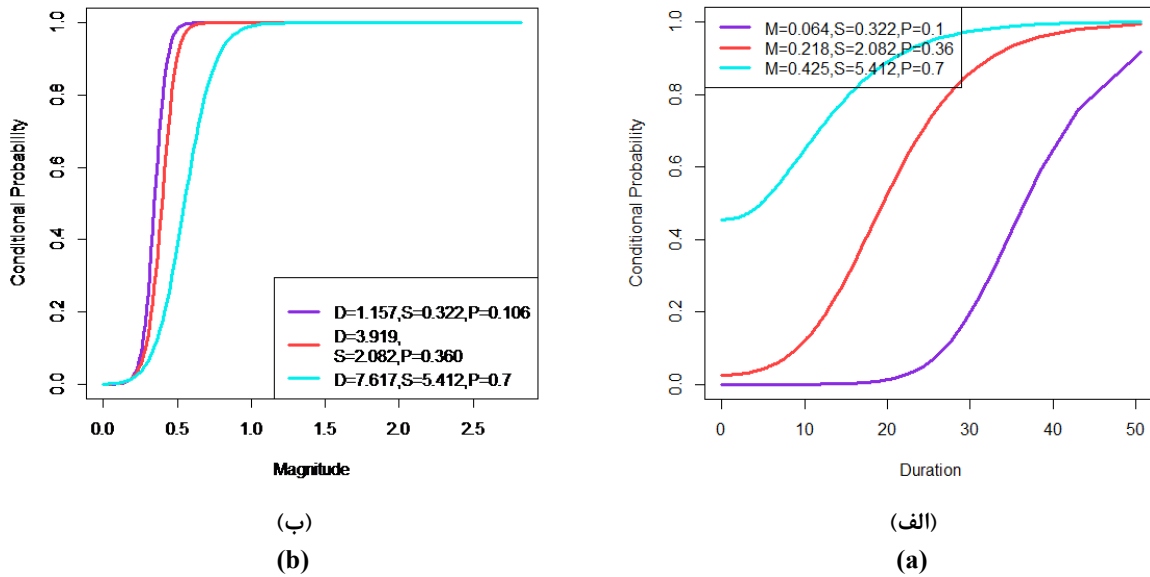
اصل رابطه معکوس بین دوره بازگشت و احتمال وقوع، هرچه دوره بازگشت بزرگ‌تر باشد، احتمال وقوع رویداد کمتر و در نتیجه ریسک آن پایین‌تر است.

بنابراین، در سناریوی $M | SDP$ که دوره بازگشت بسیار بزرگ است (۲۲۵۳۳۷ سال)، ریسک وقوع چنین خشکسالی‌ای بسیار کم است. در مقابل، در سناریوی $D | MSP$ که دوره بازگشت کوچک‌تر است (۱۱۳۸۸ سال)، احتمال وقوع و در نتیجه ریسک آن بالاتر است، هرچند باز هم در مقایسه با رویدادهای متداول، یک پدیده نادر محسوب می‌شود. این مطالعه نشان می‌دهد که تحلیل چندمتغیره خشکسالی، برآوردهای محتاطانه‌تری از دوره بازگشت رویدادهای خشکسالی ارائه می‌دهد و دوره‌های بازگشت طولانی‌تری را نسبت به روش‌های تک‌متغیره نشان می‌دهد. مقایسه با مطالعات ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) (Zhang et al., 2013) و لیو (۲۰۲۲) (Liu, 2022) نشان می‌دهد اگرچه تمام پژوهش‌ها بر افزایش چشمگیر دوره بازگشت در تحلیل‌های چندمتغیره تأکید دارند، اما ویژگی کلیدی مؤثر (بزرگی، مدت یا پیک) و مقادیر دقیق دوره بازگشت بسته به منطقه مطالعه و روش‌شناسی متفاوت است. این یافته‌ها اهمیت در نظر گرفتن وابستگی بین مشخصه‌های خشکسالی و تفاوت‌های منطقه‌ای را در ارزیابی ریسک خشکسالی برجسته می‌کند. شکل (۸) نشان می‌دهد در شرایطی که بزرگی خشکسالی (M) برابر ۰/۰۶۴، شدت (S) معادل ۰/۳۲۲ و پیک (P) در سطح ۰/۳۸۱ قرار دارد، احتمال وقوع خشکسالی‌های

جدول ۸. مقادیر دوره بازگشت‌های تک و چهارمتغیره خشکسالی در آبخیز میناب با استفاده از مفصل واین

Table 8. Values of univariate and quadrivariate drought return periods in the Minab watershed using Vine copula

0.99	0.98	0.95	0.9	0.8	0.5	احتمال تجمعی
60.571	50.0271	36.363	26.343	16.756	5.412	S
50.606	42.989	32.92	25.303	17.686	7.617	D
2.825	2.4	1.837	1.412	0.987	0.425	M
4.196	3.965	1.714	1.563	0.862	0.326	P
225337.313	20892.354	990.314	128.3548	22.541	2.523	(M SDP)
11388.296	2318.182	255.825	50.632	14.357	2.911	(D MSP)



شکل ۸. تابع توزیع احتمال شرطی $P = (D \leq d | MSP)$ (الف) به ازای $m=0.064$ ، $s=0.322$ و $p=0.106$ و احتمال شرطی $P = (M \leq m | DSP)$ (ب) به ازای $d=1.157$ ، $s=0.322$ و $p=0.106$

Fig 8. Conditional probability distribution function $P = (D \leq d | MSP)$ (a) for $m=0.064$, $s=0.322$, and $p=0.106$ and conditional probability $P = (M \leq m | DSP)$ for $d=1.157$, $s=0.322$, and $p=0.106$

خشکسالی (IDI) با استفاده از روش مفصل و این انجام شد. نتایج نشان داد SRI به عنوان متغیر محوری در ساختار درختی عمل می‌کند و بیشترین همبستگی (۰/۸۲) بین SPI و SRI مشاهده شد. این شاخص ترکیبی توانست خشکسالی‌های مرکب را به‌طور مؤثرتری نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره شناسایی کند. بررسی مشخصه‌های خشکسالی مستخرج از شاخص IDI نشان داد که بین شدت و مدت خشکسالی بیشترین همبستگی (۰/۹۵) وجود دارد. توزیع گاما برای شدت، نمایی برای مدت و بزرگی، و لجستیک برای پیک خشکسالی بهترین برازش را نشان دادند.

بر اساس مقادیر دوره بازگشت تک‌متغیره، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که ویژگی‌های مختلف خشکسالی الگوهای بازگشت کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهند. دوره بازگشت برای شدت (S) و مدت (D) خشکسالی به‌طور قابل توجهی طولانی‌تر از دوره بازگشت برای بزرگی (M) و پیک (P) است. به‌طور مشخص، در احتمال تجمعی ۰/۹۹

نتیجه‌گیری

این مطالعه جامع به بررسی مشخصه‌های خشکسالی در حوضه آبخیز میناب با استفاده از روش‌های پیشرفته آماری پرداخته است. یافته‌های کلیدی تحقیق را می‌توان در چند محور اصلی خلاصه کرد. نتایج نشان داد که توابع توزیع مختلف برای متغیرهای خشکسالی برازش متفاوتی دارند. تابع لجستیک برای بارش و رواناب، لوگ لجستیک و نرمال برای تفاضل بارش و تبخیر تعرق و رطوبت خاک، و توزیع نرمال برای شاخص‌های SPI، SRI، SPEI و SMDI بهترین برازش را نشان دادند. مقادیر AIC و BIC این انتخاب‌ها را تأیید کردند. در بررسی وابستگی بین شاخص‌های خشکسالی، تابع مفصل فرانک برای جفت‌های SPI12-SRI12 و SMDI12-SRI12 با پارامترهای به ترتیب ۴/۸ و ۷/۱ مناسب تشخیص داده شد. این در حالی بود که برای جفت SPI12-SMDI12، تابع گوسین با همبستگی ۰/۰۳۴ انتخاب شد که نشان‌دهنده وابستگی ضعیف بین این دو متغیر است. ساخت شاخص یکپارچه

Aas, K., C. Czado, A. Frigessi and H. Bakken. (2009). Pair-copula constructions of multiple dependence. *Journal of Mathematics and Economics*, 44(2), 182-198. <https://doi.org/10.1016/j.insmathco.2007.02.001>.

Azhdari Z, Bazrafshan O, Bazrafshan J, Shekari M, Zamani H. (2021). Meteorological drought monitoring based on multivariate statistical and probability indices in Hormozgan province. *Journal of Arid Biome* 10(2), 1-17. <https://doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2021.15258.1821>.

Bahari Meimandi, J., Bazrafshan, O., Esmaelpour, Y., Shekari, M., & Zamani, H. (2023). Study the effect of natural and anthropogenic factors on the ground water falling in the Minab plain. *Desert Management*, 11(1), 1-18. <https://doi.org/10.22034/jdmal.2023.2000814.1412>.

Bazrafshan, O., Shekari, M., Zamani, H., Dehghanpir, S., & Singh, V. P. (2021). Assessing hydrologic drought risk using multi-dimensional copulas: case study in Karkheh River basin. *Environmental Earth Sciences*, 80(17), 1-22. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09870-6>.

Bedford, T. and R. Cooke. (2001). Probability density decomposition for conditionally dependent random variables, *Annals of mathematics and Artificial*, 32(1-4), 245-268. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1016725902970>

Bedford, T. and R. Cooke. (2002). Vines – A new graphical model for dependent random variables, *Annals of Ann. Statist.* 30(4), 1031-1068. <https://doi.org/10.1214/aos/1031689016>.

Cammalleri, C., Micale, F., Vogt, J. (2015). A novel soil moisture-based drought severity index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency. *Hydrology Process.* 30(2), 289-301. <https://doi.org/10.1002/hyp.10578>.

Czado, C. (2010). *Pair-Copula Constructions of Multivariate Copulas*. In: Jaworski, P., Durante, F., Härdle, W., Rychlik, T. (eds) *Copula Theory and Its Applications*. Lecture Notes in Statistics, vol 198. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12465-5_4.

Das, P. K., Chandra, S., Das, D. K., Midya, S. K., Paul, A., Bandyopadhyay, S., & Dadhwal, V. K. (2020). Understanding the interactions between meteorological and soil moisture drought over Indian region. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01460-7>.

Dayal, K. S., Deo, R. C., & Apan, A. A. (2020). *Development of copula-statistical drought prediction model using the standardized precipitation-evapotranspiration index*. In *Handbook of Probabilistic Models*. Butterworth-Heinemann. 141-178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816514-0.00006-0>.

دوره بازگشت شدت و مدت به ترتیب به ۵۰.۶ و ۶۰.۵۷ سال می‌رسد، در حالی که این مقدار برای بزرگی و پیک تنها ۲/۸ و ۴/۲ سال است. این نتایج نشان می‌دهد که رویدادهای شدید از نظر شدت و مدت خشکسالی‌های منطقه مطالعه نادرتر هستند، در حالی که خشکسالی‌های با بزرگی و پیک بالا با تواتر بیشتری رخ می‌دهند. در تحلیل چندمتغیره، سناریوی $M | SDP$ با مقادیر آستانه‌های شدت ۶۰.۵، مدت ۵۰/۶ ماه، بزرگی ۲/۸ و پیک ۴/۲ در احتمال ۰/۹۹ به دوره بازگشت ۲۲۵۳۳۷ سال رسید که نشان‌دهنده نادر بودن چنین رویدادی است. بررسی توابع احتمال شرطی نشان داد که در سطوح پایین بزرگی خشکسالی، احتمال وقوع خشکسالی‌های کوتاه‌مدت افزایش می‌یابد. همچنین، خشکسالی‌های طولانی‌مدت معمولاً بزرگی متوسطی دارند و کمتر به سطوح بحرانی می‌رسند.

این مطالعه نشان داد که استفاده از روش‌های ترکیبی مانند مفصل و این می‌تواند درک بهتری از پدیده خشکسالی و ویژگی‌های آن ارائه دهد. یافته‌ها حاکی از آن است که تحلیل چندمتغیره خشکسالی می‌تواند ابزار قدرتمندی برای مدیریت منابع آب و ارزیابی ریسک خشکسالی باشد. تفاوت‌های مشاهده شده در دوره‌های بازگشت و روابط بین متغیرها بر اهمیت بررسی منطقه‌های خشکسالی و عدم تعمیم مستقیم نتایج به سایر مناطق تأکید دارد. این نتایج می‌تواند مبنای علمی مناسبی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در مواجهه با پدیده خشکسالی باشد.

منابع

Albergel, C., Dorigo, W., Reichle, R., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L.,... & Wagner, W. (2012). Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118, 215–226. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.017>

- Dracup, J. A., Lee, K. S., & Paulson Jr, E. G. (1980). On the statistical characteristics of drought events. *Water resources research*, 16(2), 289-296. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00289>.
- Hao, Z., Singh, V.P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: a review. *Journal of Hydrology*. 527, 668–678. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.031>
- Heim, R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bull. Am. Meteorological Society*, 83, 1149–1165. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
- Jaworski, P., Durante, F., Karl Härdle, W and Rychlik T. (2010) *Copula Theory and Its Applications*. Lecture Notes in Statistics, vol 198. Springer, Berlin, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12465-5>
- Joe, H. (1996). Families of m-Variate Distributions with Given Margins and $m(m-1)/2$ Bivariate Dependence Parameters. *Lecture Notes-Monograph Series*, 28, 120–141. <http://www.jstor.org/stable/4355888>
- Liu, H., Wang, X., Tan, G., & He, X. (2020). System reliability evaluation of a bridge structure based on multivariate copulas and the AHP–EW method that considers multiple failure criteria. *Applied Sciences*, 10(4), 1399. <https://doi.org/10.3390/app10041399>
- Liu, Z., Zhang, J., Wen, T., & Cheng, J. (2022). Uncertainty quantification of rainfall-runoff simulations using the copula-based bayesian processor: Impacts of seasonality, copula selection and correlation coefficient. *Water Resources Management*, 36(13), 4981-4993. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03287-x>.
- Maity, R., Suman, M., Verma, N.K. (2016). Drought prediction using a wavelet-based approach to model the temporal consequences of different types of droughts. *Journal of Hydrology*, 539, 417-428. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.042>.
- Mirabbasi, R., Klöve, B., & Torabi Haghighi, A. (2024). Multivariate Frequency Analysis of Drought Characteristics in Finland Using Vine Copulas. *International Journal of Climatology*, 44(16), 5986-6013. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.8679>
- Mishra, A. K., and V. P. Singh. (2010). A review of drought concepts, *Journal of Hydrology*, 391(1-2): 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Nagler, T., Krüger, D., & Min, A. (2022). Stationary vine copula models for multivariate time series. *Journal of Econometrics*, 227(2), 305-324. <https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2021.11.015>.
- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C., & Mirabbasi, R. (2022). Multivariate analysis of rainfall and its deficiency signatures using vine copulas. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2005-2018. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.7349>
- Ribeiro, A. F. S., Russo, A., Gouveia, C. M., Páscoa, P., & Zscheischler, J. (2020). Risk of crop failure due to compound dry and hot extremes estimated with nested copulas. *Biogeosciences Discussions*, 2020, 1-21. <http://dx.doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-674>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological society*, 85(3), 381-394. <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>.
- Rueschendorf, L. Schweizer, B and Taylor M. D (1996), Distributions with fixed marginal and related topics. *Hayward: Institute of Mathematical Statistics*. 28, 120-141. <https://doi.org/10.1214/lnms/1215452598>
- Salvadori, G., De Michele, C., Kottegoda, N.T. and Rosso, R. (2007). Extremes in nature: an approach using copulas, Springer, Dordrecht. *Statistics*, 30 (4), 1031–1068. <https://doi.org/10.1007/1-4020-4415-1>.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2), 461–464. <http://www.jstor.org/stable/2958889>
- Uyttendaele, N. (2014). *Nested Archimedean copulas: a new class of nonparametric tree structure estimators*. arXiv preprint arXiv:1407.0230. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1407.0230>
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, LópezMoreno J I. (2010) A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23, 1696-1718. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- Wang, H., Li, Y. P., Huang, G. H., Zhang, Q., Ma, Y., & Li, Y. F. (2024). Quantifying multidimensional drought propagation risks under climate change: A vine-copula Bayesian factorial analysis method. *Journal of Hydrology*, 637, 131396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131396>.
- Wang, H., Li, Y. P., Huang, G. H., Zhang, Q., Ma, Y., & Li, Y. F. (2024). Quantifying multidimensional drought propagation risks under climate change: A vine-copula Bayesian factorial analysis method. *Journal of Hydrology*, 637, 131396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131396>.
- Wu, H., Su, X., Singh, V. P., Feng, K., & Niu, J. (2021). Agricultural drought prediction based on conditional distributions of vine copulas. *Water Resources Research*, 57(8), <http://dx.doi.org/10.1029/2021WR029562>.

- Xu, K., Yang, D., Xu, X., Lei, H. (2015). Copula based drought frequency analysis considering the spatio-temporal variability in Southwest China. *Journal of Hydrology*, 527, 630-640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.030>.
- Zhang, Q., Li, J., Singh, V. P., & Xu, C. Y. (2013). Copula-based spatio-temporal patterns of precipitation extremes in China. *international Journal of Climatology*, 33(5), 1140-1152. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.030>.
- Zhang, X., Li, J., Dong, Q., Gao, C., & Chen, H. (2025). A copula-based framework for emergent constraints using MCMC simulations. *Journal of Climate*. <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-24-0591>.

Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)



Winter 2025, Vol. 3, Spatial Issue, pp 119-136

doi [10.22077/jdcr.2024.8306.1080](https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8306.1080)

Examining Specific Social and Spiritual Factors of Drought in Light of the Quran and Narrations

Mohammad Akbari^{1,*} 

1. Assistant, University of Qur'anic Sciences and Education, Qom, Iran.

*Corresponding Author: akbari@quran.ac.ir

Keywords:

Drought, Spiritual factors, Enjoining good and forbidding wrong, Unjust judgment, Indifference to the leadership.

Introduction

Since the beginning of creation, God Almighty has established a relationship between blessings and calamities with the actions of servants, based on God's wise law. One of these natural disasters is the phenomenon of drought, which, according to the Imams of Immaculate Imams (AS), is related to the performance of individuals, people, and rulers. The most important drought mentioned in verses and traditions before Islam is the drought in Egypt, which was managed by Prophet Yusuf (pbuh). The Holy Quran and the traditions of the Imams (AS) are the best sources for introducing these laws and the connection between actions and rain, and preventing drought. By reflecting on its factors in the Holy Quran and traditions, it can be said that the factors of drought are not limited to natural factors, but from the perspective of the Holy Quran and traditions, they are spiritual factors that can be divided into two categories, individual and social, which can be seen and measured. Natural and Material factors are not considered. Dealing with this issue (spiritual and social factors of drought) and making people aware of this issue can partially prevent the occurrence of drought. Therefore, considering the importance of this matter to the author in the present research, an investigation was conducted on the specific socio-spiritual factors of drought from the perspective of the Quran and Hadiths. According to the research done by the author, no independent research has been conducted on the topic of the current research. Some authors have partially mentioned the effect of spiritual factors on drought in their works. For example.

Received:

19 October 2024

Revised:

31 October 2024

Accepted:

12 November 2024

How to cite this article:

Akbari, M.(2026). Examining Specific Social and Spiritual Factors of Drought in Light of the Quran and Narrations. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 119-136. [10.22077/jdcr.2024.8306.1080](https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8306.1080)



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

- 1- Khajepour, Mohammad (2014), an article entitled “Alam al-Shab and how it is influenced in the Quran”.
 - 2- Tarkhan, Qasim (2020), an article entitled “The role and effect of supernatural causes and factors in natural disasters”.
 - 3- Naderi, Mahmoud (2003): a book entitled “Philosophy of Natural Disasters and Sufferings and Ways of Prevention from the Perspective of Verses and Traditions”.
 - 4- Mirsemiei, Seyed Mohammad (2015): A book entitled “Events and Disasters in the Qur'an and Hadiths”.
- Examining the results of each of the mentioned research studies indicates that their authors have partially addressed the individual spiritual factors of drought. However, in the upcoming article, the author has focused on specific social and spiritual factors of drought, which include enjoining good and forbidding evil, unjust judgments, and neglecting the community

Materials and Methods

In this article, the methodology is descriptive-analytical alongside a library approach. First, extracting the verses and traditions related to the subject, then using interpretations and other relevant sources, to explore the implications of those verses and traditions on the socio-spiritual factors of the discussed drought will be reviewed. The statistical population of the current research includes all the verses of the Holy Quran (6236 verses) and 121601 narrations from the hadith books (Kanz al-Amal, Ayun al-Akhbar, Al-Amali, Bihar al-Anwar, Man Lay Hazra al-Faqih, Al-Kafi, and Maani al-Akhbar). The author has extracted verses related to the subject from among 6236 verses. Subsequently, based on these verses, relevant narrations have been selected from the pool of 121601 narrations to address the social and spiritual factors of drought.

Result and Discussion


The specific social factors of drought from the perspective of the Holy Quran and Hadiths are the factors that people neglect and disregard (enjoining good, forbidding evil, and neglecting the community) and the wrongful behavior of certain officials (unjust judgments by judges) serves as the grounds for divine punishment (drought) in society. The factors mentioned in the Holy Quran and Hadiths indicate that drought is essentially a form of worldly social affliction brought about by human actions. The most significant outcome of this research is that the cause of the drought phenomenon is not solely natural factors; the influence of spiritual factors is no less significant than natural and material factors. Given that some individuals attribute, drought solely to natural causes, viewing it as an event disconnected from human behavior and others, due to incomplete understanding of verses and traditions, apply it to the conduct of specific groups, leading to suspicion and discord among different segments of society, it is recommended that experts thoroughly analyze the potential ramifications of this phenomenon, devise management strategies and seek solutions to mitigate its impact. They should draw relevant information from reputable texts, publications, and theses that have addressed the issue of drought comprehensively and impartially, devoid of any particular political agenda. Through meticulous planning and execution, this phenomenon can be addressed to the best of human ability.

Conclusion

The findings of this study affirm that drought transcends mere natural phenomena, encompassing profound socio-spiritual dimensions as elucidated in the Quran and Hadiths. Key factors such as neglecting enjoining good and forbidding evil, unjust judgments by authorities, and societal indifference to communal responsibilities precipitate divine retribution in the form of drought. This underscores the imperative for collective moral reform to avert such calamities. Policymakers and religious scholars should integrate these Quranic and narrational insights into drought management strategies, fostering awareness and ethical governance to harmonize human actions with divine laws, thereby mitigating spiritual causes alongside material interventions. Future research may explore practical implementations of these principles in contemporary drought-prone regions.



بررسی عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی از منظر قرآن و روایات

محمد اکبری^{۱*} 

۱- استادیار، دانشگاه علوم و معارف قرآن کریم، قم، ایران.

*نویسنده مسئول: akbari@quran.ac.ir

چکیده

زندگی روزمره انسان، همواره وابسته به آب است و پدیده خشک‌سالی اثرات منفی بسیاری بر منابع آب و محیط‌های مرتبط به این منابع می‌گذارد؛ و کم‌آبی عموماً در سال‌های اخیر خسارات جبران‌ناپذیری را سبب شده است. بررسی علل و عوامل خشک‌سالی، برای پیشگیری از آن لازم و ضروری است، با این وجود عوامل معنوی اجتماعی به دلیل اینکه قابل رؤیت و اندازه‌گیری طبیعی و مادی نیستند اهمیت بیشتری دارند؛ لذا نگارنده در مقاله حاضر با روش کتابخانه‌ای و با رویکرد توصیفی-تحلیلی بررسی عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی از منظر قرآن و روایات را مورد بحث و بررسی قرار داده است و نتایج تحقیق حاکی از آن است که نادیده‌انگاری، بی‌اعتنایی به امر به معروف و نهی از منکر، ولایت و قضاوت ظالمانه از مجموعه عوامل اجتماعی معنوی خشک‌سالی از منظر قرآن کریم و روایات است و در واقع این نوع خشک‌سالی یک نوع عذاب الهی است که به سبب رفتارها و باورهای نادرست اجتماعی انسان‌ها گریبان‌گیر آن‌ها شده است. آیات و روایات ناظر بر عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی بر انواع خشک‌سالی مطرح در عصر حاضر که عبارتند از: خشک‌سالی کشاورزی، خشک‌سالی اقتصادی-اجتماعی، خشک‌سالی آب و هوایی و خشک‌سالی هیدرولوژیکی دلالت دارد، در واقع اعمال انسان‌ها (اعم از مادی و معنوی) موجب قطع باران و در نتیجه خشک‌سالی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی:

خشک‌سالی، عوامل معنوی، امر به معروف و نهی از منکر، قضاوت ظالمانه، بی‌اعتنایی به ولایت.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۷/۲۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۸/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۸/۲۲

مقدمه

از ابتدای خلقت خداوند متعال بین نزول برکات و بلایا با اعمال بندگان رابطه برقرار کرده است و این بر اساس قانون حکیمانه خداوند صورت می‌گیرد. یکی از این بلاهای طبیعی پدیده خشک‌سالی است که به گفته ائمه معصومین (ع) به عملکرد فرد، مردم و حاکمان مربوط می‌شود. مهم‌ترین خشک‌سالی که قبل از اسلام در آیات و روایات به آن اشاره شده، خشک‌سالی در مصر است که حضرت یوسف (ع) آن را مدیریت نمودند. قرآن کریم و روایات ائمه معصومین (ع) بهترین منبع برای معرفی این قوانین و ارتباط بین اعمال و نزول باران و دفع خشک‌سالی می‌باشد. با تأمل در عوامل آن در قرآن کریم و روایات می‌توان گفت که عوامل خشک‌سالی محدود به عوامل طبیعی نبوده بلکه از منظر قرآن کریم و روایات عوامل معنوی که آنها را می‌توان به دو دسته فردی و اجتماعی تقسیم نمود، که قابل رؤیت و اندازه‌گیری طبیعی و مادی نمی‌باشند، پرداختن به این موضوع (عوامل معنوی اجتماعی خشک‌سالی) و آگاه‌سازی مردم از این مسئله تا حدی می‌تواند از بروز پدیده خشک‌سالی جلوگیری نماید، لذا با توجه به اهمیت مذکور نگارنده در تحقیق حاضر درصدد بررسی عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی از منظر قرآن و روایات است. با جست‌و جویی که نگارنده انجام داده در خصوص موضوع تحقیق حاضر تاکنون تحقیق مستقلی انجام نشده، برخی از نویسندگان در آثار خود به صورت جزئی به موضوع تأثیر عوامل معنوی بر خشک‌سالی اشاره نموده‌اند به عنوان مثال:

خواجه پور، محمد مهدی، در مقاله «عالم اسباب و چگونگی تأثیرپذیری آن در قرآن» اشاره جزئی به عوامل معنوی برخی از بلاهای طبیعی از جمله خشک‌سالی پرداخته و در این خصوص چنین آورده است: «به‌طور کلی عوامل زیادی بر خشک‌سالی تأثیرگذار هستند. از جمله عوامل مؤثر بر این مسئله اعمال و رفتار انسان‌ها می‌باشد.

در تحلیل قرآن ارتباط تنگاتنگی میان عمل و باورهای انسان و وقایع طبیعی دیده می‌شود و از آن جا که اسلام دین جامع و کاملی است و برای اداره زندگی انسان‌ها برنامه‌های مدون و مشخصی دارد که در قالب حلال و حرام و توصیه‌های اخلاقی بیان نموده است که با عمل به آن توصیه‌ها، می‌توان از بلاهای طبیعی پیشگیری نمود (Khajepour, 2015).

ترخان، قاسم، در مقاله نقش و تأثیر علل و عوامل فرامادی در بلاهای طبیعی پیدایی برخی از بلاهای طبیعت را بررسی نموده و معتقد است که پیدایی برخی بلاهای طبیعی بر اثر گناهان است، برای مثال انجام گناه غنا موجب حبس باران و خشک‌سالی می‌شود و همچنین یاری مظلوم، عدم غفلت از همسایگان، احسان به خویشاوندان و صلح رحم از اسباب جلوگیری از قحطی، حبس باران و خشک‌سالی می‌باشد (Tarkhan, 2020).

نادری، محمود (۱۳۸۲) در کتاب فلسفه بلاهای طبیعی و مصائب و راه‌های پیشگیری از منظر آیات و روایات به عوامل خشک‌سالی پرداخته و در این خصوص چنین آورده است: با توجه به آنچه بیان شد یکی از عوامل معنوی غیرصریح که می‌تواند باعث ایجاد خشک‌سالی گردد ترک یاری مظلوم است، اگر مردم در برابر ظلم دیگران ساکت باشند و از مظلوم حمایت نکنند، خداوند نیز رحمت و نعمت خود را از جمله نعمت باران را از ایشان سلب نموده و آنها مستحق بلای خشک‌سالی خواهند شد (Naderi, 2003).

میرسمیعی، سید محمد (۱۳۹۴) در کتاب حوادث و بلایا در قرآن و روایات، اشاره جزئی به عوامل معنوی خشک‌سالی نموده و از این بحث چنین نتیجه گرفته است: رفتارها و گناهان اجتماعی هم مثل اعمال و گناهان فردی، آثار مادی و معنوی و همچنین دنیوی و اخروی دارند. خداوند ارتکاب گناهان را موجب آسیب‌های مختلفی به جامعه دانسته و در موارد بسیاری هشدار می‌دهد که

روایت، روایات مرتبط با موضوع را استخراج و به دلالت آن به عوامل اجتماعی معنوی خشک‌سالی می‌پردازد.

روش تحقیق

روش تحقیق در مقاله حاضر، به روش توصیفی - تحلیلی و با رویکرد کتابخانه‌ای است. ابتدا آیات و روایات ناظر بر موضوع استخراج، سپس با استفاده از تفاسیر و سایر منابع مربوطه، دلالت آن آیات و روایات، بر عوامل اجتماعی معنوی خشک‌سالی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

مفهوم خشک‌سالی

خشک‌سالی در لغت به معنای حالت خشک‌سالی، قحط، وضع خشک‌سالی، مجاعه، جذب، بی‌بارانی و بدون بارندگی است (Dehkoda, 2010). سال قحطی، سالی است که در آن باران نبارد و با کلمات تنگسالی، جذب، غلا، قحط و قحطی مترادف و ضد ترسالی است (Mo'in, 2007). اگر در سالی باران نبود و یا کم باریده باشد، آن سال را خشک‌سالی می‌گویند که از این عنوان به مناسبت در باب‌های صلوات، تجارت و حدود سخن گفته شده است. در قرآن و روایات در این مدخل از واژه‌های «جذب»، «قحط»، «سنین» و آیه‌هایی مانند «فِي يَوْمٍ ذِي مَسْجَبَةٍ» (بلد / ۱۴) که به طور غیر صریح بر خشک‌سالی و قحطی دلالت می‌کنند، استفاده شده است. که در ذیل بدان می‌پردازد:

جذب

در لسان العرب آمده است: «الْجَدْبُ: الْمَحَلُّ نَقِيضُ الْخَصْبِ» (Ibn Manzur, 1997) خشکی: محل نقیض باروری» نزدیک به همین معنا در مصباح المنیر آمده است: «الْجَدْبُ: هُوَ الْمَحَلُّ وَزناً و معنى و هو انْقِطَاعُ الْمَطَرِ وَبُيْسَ الْأَرْضِ» (Fayoumi, 1993) «جذب: به معنای کمبود باران و خشکی زمین است.»

چگونه جوامع بشری به سبب ارتکاب بعضی از اعمال و گناهان دچار حران‌های شدید و قحطی و خشک‌سالی می‌شود (Mirsemiei, 2015). بررسی نتایج هر یک از پژوهش‌های مذکور، حاکی از آن است که نگارندگان آن‌ها به صورت جزئی به عوامل معنوی فردی خشک‌سالی پرداخته‌اند؛ در صورتی که نگارنده در مقاله پیش‌رو به عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی که عبارتند از: امر به معروف و نهی از منکر، قضاوت ظالمانه و بی‌اعتنایی به ولایت می‌پردازد. مهم‌ترین سؤالاتی که در این خصوص مطرح است و نگارنده در این مقاله درصدد پاسخ به آن است عبارتند از: عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی از منظر قرآن کریم و روایات کدامند؟ عوامل خاص اجتماعی تا چه اندازه بر وقوع خشک‌سالی مؤثر است؟ نگارنده برای پاسخ به سؤالات مذکور و اثبات این فرضیه که: ترک امر به معروف و نهی از منکر، بی‌اعتنایی به ولایت و قضاوت ظالمانه عوامل اجتماعی مؤثر بر وقوع خشک‌سالی است، ابتدا آیات و روایات ناظر بر عوامل موضوع خشک‌سالی دسته‌بندی، سپس مفاهیم فرضیه (امر به معروف، بی‌اعتنایی به ولایت، قضاوت ظالمانه) از آن آیات و روایات استنباط، سپس با استفاده از تفاسیر و منابع مربوطه، عوامل مذکور تبیین و سؤالات و جنبه‌های مجهول حول موضوع پاسخ مناسب ارائه می‌گردد.

جامعه آماری

جامعه آماری تحقیق حاضر، کل آیات قرآن کریم (۶۲۳۶ آیه) و ۱۲۱۶۰۱ روایت از کتب حدیثی (کنز العمال، عیون الاخبار، الأمالی، بحار الأنوار، من لایحضره الفقیه، الکافی و معانی الاخبار) می‌باشد. در واقع نگارنده از بین ۶۲۳۶ آیه، آیات مربوط به موضوع را به دست آورده، سپس به تناسب آیات، از بین ۱۲۱۶۰۱

جدول ۱. جامعه آماری تحقیق (نرم افزار جامع الاحادیث نور).

Table 1. Research population (Jame' al-Ahadith Noor Software).

آیات قرآن کریم (Ayat-e Qur'an-e Karim)		منابع روایی (e Revayi-'Manabe)	
تعداد روایت	کتاب (Book)	تعداد روایت	کتاب (Book)
9523	کنز العمال (Kanz al-Ummal)	85173	بحار الانوار (Bihar al-Anwar)
2422	عیون الاخبار (Uyun al-Akhbar)	5963	من لایحضره الفقیه (Man La Yahduruhu al-Faqih)
1537	الأمالی (Al-Amali)	16199	کلینی (Kulaini)
784	معانی الاخبار (Ma'ani al-Akhbar)	121601	جمع کل روایات (Total Number of Narrations):

زمین چیزی نرود. در نتیجه، کم‌یابی و یا نایابی غلات و در نهایت قحطی و یا گرانی پیش می‌آید. خشک‌سالی در اصطلاح هواشناسی عبارت است از یک دوره ممتد کمبود بارش که منجر به صدمه زدن به محصولات زراعی و کاهش عملکرد می‌شود. این پدیده تقریباً در تمامی مناطق اقلیمی رخ می‌دهد، گرچه مشخصات آن از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً تفاوت می‌کند (Monfared, 2013).

تعاریف متعددی از خشک‌سالی با توجه به اثراتی که در عرصه‌های مختلف دارد ارائه نموده‌اند، از جمله تعریف خشک‌سالی در حوزه کشاورزی است. خشک‌سالی کشاورزی نتیجه کمبود رطوبت خاک است که بر اثر بهم خوردن تعادل میان تأمین آب و هدر رفتن آن از طریق تبخیر و تعرق به وجود می‌آید. خشک‌سالی کشاورزی زمانی به وجود می‌آید که در فاصله بین دو بارندگی ذخیره رطوبتی منطقه ریشه در خاک برای زنده مانی محصولات کشاورزی و گیاهان طبیعی و مراتع کفایت نکند. این وضعیت معمولاً در اثر نبود و یا کمبود جریان رطوبت برای تغذیه منطقه ریشه و یا زمانی که رطوبت نسبی هوا به اندازه‌ای کم است که رطوبت موجود خاک قادر به جبران میزان هدر رفت رطوبت بر اثر تبخیر و تعرق نیست رخ می‌دهد (Kordavani, 219).

آیات و روایات ناظر بر خشک‌سالی که در مباحث بعدی بدان پرداخته خواهد شد به انواع خشک‌سالی

ابجدی می‌نویسد: «جذب- جذباً المکان» (Bustan, 1996) آن زمین به علت نیامدن باران خشک شد.

قحط

زبیدی در کتاب "تاج العروس من جواهر القاموس" آورده است «الخط: الجذب، كما في الصحاح؛ لأنه من أثر احتباس المطر» (Zabidi, 1993) و قال ابن درید: «فَحَطَّتِ الْأَرْضُ كَمَنَع»، «خشک سالی زمین مانند منع»، ابن منظور نیز می‌گوید «أقحط الناس إذا لم يُمطروا»، «اگر باران نبارد مردم دچار قحطی می‌شوند» (Ibn Manzur, 1997) قال ابن سیده: «وقد يُشتقُّ القحط لكل ما قل خیره، و الأصل للمطر»، «و قحط به هر چیزی که خیرش کم باشد گفته می‌شود، و اصل آن در مورد باران است». همچنین در فرهنگ لغت ابجدی آمده است: «أقحط - إقحاطاً العام؛ سال خشک و بی باران شد» (Bustan, 1996).

-سنین

«سنین» جمع «سنه» به معنای قحط و نایابی است. و گویا معنای اصلی آن «سنه القحط» سال قحطی بوده و به تدریج گفته شده: «السنه» آن سال. سپس به کثرت استعمال، تدریجاً کارش به جایی رسیده که معنای قحطی و نایابی را به خود گرفته است (Tabatabai, 2008). خشک‌سالی در اصطلاح عبارت است از وضع و حالت خشک‌سال بودن که بر اثر نباریدن باران یا کاهش بارش، از

با توجه به تعاریف ارائه‌شده، می‌توان چنین بیان کرد که خشک‌سالی که در این تحقیق مد نظر است، خشک‌سالی بر اثر کمبود و یا قطع نزولات آسمانی است که بر اثر مرور زمان باعث خشکی و کم‌آبی می‌شود. به‌دنبال آن، بخش کشاورزی و دامپروری دچار آسیب شده و در مرحله پیشرفته آن، باعث گرسنگی و قحطی می‌شود.

عوامل معنوی خاص اجتماعی و تأثیر آن بر خشک‌سالی

نکته‌ای که نباید در مسئله خشک‌سالی آن را نادیده گرفت، نقش اسباب معنوی و مادی در کنار هم است. در آموزه‌های اسلامی، این معنا بارها مورد تأکید قرار گرفته است که جهان مادی و دنیا دارالاسباب است. حضرت امیر المؤمنین علیه السلام می‌فرماید: «أَبَى اللَّهُ أَنْ يُجْرِيَ الْأَشْيَاءَ إِلَّا بِأَسْبَابٍ فَجَعَلَ لِكُلِّ شَيْءٍ سَبَبًا». «سنت خداوند بر آن است که افعال و اشیا را به‌وسیله اسباب‌شان به جریان بیندازد» (Kulaini, 1986). برای نظام آفرینش، نظم خاص و قانون معینی وجود دارد و اراده خدا به وجود اشیا، عین اراده نظام است. از همین رو است که قانون علت و معلول و یا نظام اسباب و مسببات به وجود می‌آید. بدین معنا که هر معلولی علت خاص و هر علتی معلول مخصوص به خود دارد.

در حقیقت، هر موجودی در نظام علت و معلول، جای مشخص و مقام معلومی دارد؛ یعنی هر معلولی، معلول شیء معینی خواهد بود و هر علت، شیء خاصی خواهد بود. در نظام اسباب، سه مؤلفه وجود دارد: علت، سبب و مسبب. خداوند سبب و مسببیت را ایجاد و خلق می‌نماید، اما به‌کارگیری سبب به دست مخلوقات و تأثیر آن به دست خداوند است و به وجود آمدن مسبب از ناحیه سبب است که در واقع واسطه موجد اشیا از ناحیه خداوند می‌باشد.

(خشک‌سالی آب و هوایی، خشک‌سالی هیدرولوژیکی، کشاورزی و اقتصاد اجتماعی) اشاره دارد به‌گونه‌ای که:

۱- «وَلَقَدْ أَخَذْنَا آلَ فِرْعَوْنَ بِالسِّنِينَ وَنَقَصْنَا مِنَ الثَّمَرَاتِ لَعَلَّهُمْ يَذَّكَّرُونَ» (اعراف/۱۳۰)، «و ما نزدیکان فرعون (و قوم او) را به خشک‌سالی و کمبود میوه‌ها گرفتار کردیم، شاید متذکر گردند!»

(نقص من الثمرات ← خشک‌سالی کشاورزی)

۲- «إِنَّا بَلَوْنَاهُمْ كَمَا بَلَوْنَا» (قلم/۱۷)

«ما کافران را به قحطی و سختی آزمودیم.»

مراد از بلوناهم، همان آزمودن ایشان به بلای خشک‌سالی و قحطی است (Tabarsi, 1993) که در چنین شرایطی مردم برای رفع نگرانی‌ها و اطمینان خاطر از آینده خود به سمت خرید یک محصول خاصی هجوم می‌آورند.

(بلوناهم ← خشک‌سالی اقتصادی - اجتماعی)

۳- «ثُمَّ يَأْتِي مِنْ بَعْدِ ذَلِكَ سَبْعٌ شِدَادٌ يَأْكُلْنَ مَا قَدَّمْتُمْ لَهُنَّ إِلَّا قَلِيلًا مِمَّا تَحْصِنُونَ» (یوسف/۴۸)

«پس از آن، هفت سال سخت (و خشکی و قحطی) می‌آید، که آنچه را برای آن سال‌ها ذخیره کرده‌اید، می‌خورند؛ جز کمی که (برای بذر) ذخیره خواهید کرد.»

(سَبْعٌ شِدَادٌ ← خشک‌سالی آب و هوایی)

۴- «وَلَنَبْلُوَنَّكُمْ بِشَيْءٍ مِنَ الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَنَقْصٍ مِنَ الْأَمْوَالِ وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ» (بقره/۱۵۵)

«قطعاً همه شما را با چیزی از ترس، گرسنگی، و کاهش در مال‌ها و جان‌ها و میوه‌ها، آزمایش می‌کنیم؛ و بشارت ده به استقامت‌کنندگان!»

(الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَ نَقْصٍ مِنَ الْأَمْوَالِ وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ)

← خشک‌سالی هیدرولوژیکی)

با توجه به آیات ذیل، انواع خشک‌سالی را می‌توان در جدول ۲ ترسیم نمود.

جدول ۲. انواع خشک‌سالی (نرم‌افزار جامع‌الاحادیث نور)

Table 2. Types of Drought (Jame' al-Ahadith Noor Software)

ردیف	انواع خشک‌سالی	آیات ناظر بر موضوع
Row	Types of Drought	Qur'anic Verses Related to the Topic
۱	کشاورزی Agricultural	<p>وَلَقَدْ أَخَذْنَا آلَ فِرْعَوْنَ بِالسِّنِينَ وَنَقَصْنَا مِنَ الثَّمَرَاتِ لَعَلَّهُمْ يَذَّكَّرُونَ</p> <p>And We certainly afflicted the people of Pharaoh with years of hardship and a reduction in fruits, so that they might take heed</p>
۲	اقتصادی و اجتماعی Economic and Social	<p>إِنَّا بَلَوْنَاهُمْ كَمَا بَلَوْنَا</p> <p>Indeed, We tested them just as We tested others before</p>
۳	آب و هوایی Meteorological	<p>ثُمَّ يَأْتِي مِنْ بَعْدِ ذَلِكَ سَبْعٌ شِدَادٌ يَأْكُلْنَ مَا قَدَّمْتُمْ لَهُنَّ إِلَّا قَلِيلًا مِمَّا تَحْصِنُونَ</p> <p>Then after that will come seven harsh years which will consume what you have stored for them, except for a small portion which you will preserve</p>
۴	هیدرولوژیکی Hydrological	<p>وَلَنَبْلُوَنَّكُمْ بِشَيْءٍ مِنَ الْخَوْفِ وَالْجُوعِ وَنَقْصٍ مِنَ الْأَمْوَالِ وَالْأَنْفُسِ وَالثَّمَرَاتِ وَبَشِّرِ الصَّابِرِينَ</p> <p>And We will surely test you with something of fear, hunger, and a loss of wealth, lives, and fruits. But give glad tidings to those who are patient</p>

آزمایشگاهی را ندارند. همچنین، اثبات عقلی آن ممکن نیست، چرا که عقل فقط کلیات این امور را ثابت می‌کند و از جزئیات آن عاجز است. این امور ناپیدا که در زندگی بشر تأثیرات بسیاری دارند، را می‌توان از راه متون شرعی و به عبارت دیگر، وحی به دست آورد (Khajepour, 2015) که در ذیل به بحث و بررسی آن پرداخته می‌شود:

ترک امر به معروف و نهی از منکر

یکی از واجبات الهی که آثار اعتقادی و تربیتی بسیاری در جامعه دارد و در متون دینی، ترک و بی‌اهمیتی به این فریضه الهی را موجب خشک‌سالی و بسته شدن در رحمت الهی بر بندگان می‌داند، امر به معروف و نهی از منکر است. پیامبر اسلام، صل الله علیه و آله، در این مورد چنین می‌فرماید: «أَيُّهَا النَّاسُ، إِنَّ اللَّهَ يَقُولُ: لَتَأْمُرَنَّ بِالْمَعْرُوفِ وَلَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ قَبْلَ أَنْ تُجَدَّبُوا فَتَتَسَفَّوْنَ فَلَا تُسَفَّوْنَ» (Muttaqi Hindi, 1944). «ای مردم! خداوند می‌فرماید: حتماً امر به معروف و نهی از منکر کنید پیش از آنکه دچار خشک‌سالی شوید. پس هر چه آب بخواهید، آبی به شما داده نمی‌شود».

امر در لغت دو معنی دارد؛ یکی کار که جمع آن امور است و دیگری اوامر (Fayoumi, 1993). معروف از ماده

این اسباب به سه گونه است که به آن اشاره می‌شود. در مورد علت نیز می‌توان گفت هرگاه رابطه بین دو چیز به‌گونه‌ای باشد که از وجود یکی وجود دیگری و از عدم یکی عدم دیگری لازم بیاید، آن «یکی» را علت دیگری می‌گویند اسباب طبیعی مادی که بر اساس سنت‌های الهی هرگاه کامل شود، عمل می‌نماید و مسبب را ایجاد می‌کند. به عنوان مثال، آتش سبب حرارت است. بنابراین، هرگاه مقتضیات لازم فراهم باشد و مانعی وجود نداشته باشد، حرارت ایجاد می‌شود.

قرآن کریم نوعی دیگر از اسباب را معرفی می‌کند که از دایره اسباب طبیعی خارج است و دستیابی به آن از طریق حواس ظاهری و حتی ادراکات عقلی ممکن نیست. دستیابی و آگاهی از آن فقط از طریق وحی صورت می‌گیرد. این اسباب، همانند اسباب مادی، می‌توانند موجب تأثیر و تأثراتی در زندگی بشر گردند (Khajepour, 2015). به عبارت دیگر، در عالم وجود که عالم حقیقت است، ناپیداهایی وجود دارد که می‌توانند تأثیرات شگرفی را در زندگی بشر داشته باشند. البته اثبات این امور از طریق حس و عقل ممکن نیست، چرا که از دایره حس خارج است. حس، اموری را ثابت می‌کند که قابل اثبات تجربی باشد، در حالی که اسباب معنوی قابلیت اثبات

نیستند، ولی تکلیف خود را انجام نداده یا مرتکب عمل منکری شده‌اند. در این باره لازم است آنان را به وظیفه خود آگاه ساخت. در این مرحله، شرط تأثیر امر به معروف مطرح می‌شود، البته گاه در جامعه فضایی حاکم است که احکام شرعی ارزش اجتماعی بالایی دارند و ترک آنها گناهی بزرگ محسوب می‌شود. در این شرایط، تارک الصلاه نامیدن یک فرد برای او از هر ناسزایی بدتر است. در چنین وضعیتی، نهی از منکر تأثیر خوبی بر جا می‌گذارد. احکامی که در رساله‌های عملیه برای امر به معروف ذکر شده، بیشتر ناظر به این مرحله است. اما گاه فضای فرهنگی حاکم بر جامعه این‌گونه نیست و انجام تکلیف واجب، ارزش و ترک آن، ضد ارزش تلقی نمی‌شود. گناه‌کاران هیچ شرم و حیایی از ارتکاب گناه و معصیت به خود راه نمی‌دهند، تا آنجا که اگر به آنها گفته شود که برای اجرای احکام زحمت‌های زیادی کشیده شده، آشکارا خواهند گفت که ما اسلام را نمی‌خواهیم. در چنین فضای فرهنگی‌ای، تظاهر به مخالفت با اسلام زشتی خود را از دست داده است. در چنین اوضاعی که امر به معروف و نهی از منکر بدون تأثیر است و مردم با کسی که به این فریضه عمل می‌کند، دشمنی می‌ورزند یا حتی او را می‌کشند، چه باید کرد؟ به روایت جابر، امام باقر (ع) فرموده است: «در این هنگام با آنان جهاد کنید تا به امر خدا گردن نهند.» (Hurr al-Amili, 1998) بنابراین، گستره امر به معروف از تعلیم جاهل آغاز شده و تا جهاد پیش می‌رود.

در گذشته، کتابی جداگانه به نام "امر به معروف" در میان کتاب‌های روایی شیعه وجود نداشت، بلکه در پایان کتاب «جهاد»، بابی را به امر به معروف اختصاص می‌دادند. کتاب تهذیب الاحکام طوسی نیز چنین است. از این رو، می‌توان گفت مفهوم امر به معروف و نهی از منکر، دو نوع کاربرد دارد. نخست، کاربردی که در رساله‌های

«عرف» به معنای کار خوب و پسندیده است. معنای لغوی نهی، نقیض امر است؛ نهی به معنای زجر و منع است (Fayoumi, 1993). منکر از ماده «نکر» به معنی ناشناخته است (Bustan, 1996).

امر به معروف در اصطلاح، اسمی است برای هر کاری که با عقل و شریعت نیکو شناخته شده و منکر ضد معروف است. هر کاری که عقل‌ها و خرده‌ای سلیم زشتی آن را حکم می‌کنند یا اینکه عقل‌ها در زشتی و خوبی آن کار سکوت می‌کنند، سپس دین و شریعت بدی و زشتی آن را بیان می‌کند. بنابراین، امر به معروف یعنی فرمان دادن به نیکی و نهی از منکر، باز داشتن از بدی و ناپسندی است. فریضه امر به معروف و نهی از منکر از سویی وظیفه افراد است و از سویی وظیفه امت. در خصوص شکل جمعی قضیه، در آیه چهارم از سوره مبارکه آل عمران اشاره شده که امت را مأمور به امر به معروف کرده است. این مأموریت اجتماعی را هم می‌توان در برابر سایر امت‌ها قلمداد کرد و هم در داخل خود جامعه اسلامی.

«وَلَتَكُنْ مِنْكُمْ أُمَّةٌ يَدْعُونَ إِلَى الْخَيْرِ وَيَأْمُرُونَ بِالْمَعْرُوفِ وَيَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ وَأُولَئِكَ هُمُ الْمُفْلِحُونَ» (آل عمران/ ۱۰۴). «باید از میان شما، جمعی دعوت به نیکی، و امر به معروف و نهی از منکر کنند! و آنها همان رستگارانند»

برای شناخت جایگاه این دو فریضه، لازم است گستره آنها را بشناسیم. مراتب امر به معروف و نهی از منکر از تعلیم جاهل آغاز می‌شود و تا جهاد ادامه می‌یابد. بنابراین، نخستین مرتبه امر به معروف و نهی از منکر، آموزش واجبات شرعی به کسانی است که به آن آگاهی ندارند. این مطلب که در زبان روایات از آن به تعلیم جاهل تعبیر شده است، بیشتر به آموزش احکام و تکالیف شرعی برای نوجوانان باز می‌گردد. پس از تعلیم جاهل، باید کسانی را به معروف امر کرد که از حکم و تکلیف شرعی نا آگاه

گردد، بایستی لزوم استفاده از هر وسیله مشروع برای پیشبرد اهداف اسلامی بیان گردد» (Motahhari, 1989). ترک امر به معروف و نهی از منکر از گناهان فردی نیست که فقط گناه آن فرد مرتکب کننده را دچار بلا و عذاب نماید، بلکه از گناهان اجتماعی به حساب می آید که اثر آن بر کل مردم جامعه است.

براساس نقلی در تفسیر صافی، امام باقر (ع) در حدیثی می فرماید: «خداوند به حضرت شعیب علیه السلام فرمود: من صد هزار نفر از قوم تو را عذاب می کنم که ۴۰ هزار نفر از آنان گناهکار و ۶۰ هزار نفر از افراد دیندار هستند. حضرت شعیب علیه السلام عرض کرد: «خدا یا، گناهکاران بحثی نیست، اما دین داران را چرا عذاب می کنی؟» خداوند فرمود: «زیرا آنان نیز با گناهکاران مدارا کرده و در کنار خشم من بر آنها خشم نمی گیرند. امر به معروف و نهی از منکر نمی کنند» (Faiz Kashani, 2001).

یکی از هولناک ترین گناهان، رضایت به گناه دیگران است. در اینجا، خود فرد در ظاهر گناهی مرتکب نشده، ولی نتیجه امر یک چیز است و آن عذاب الهی و هلاکت است؛ هلاکتی که نهایتاً در آخرت دامن انسان را خواهد گرفت. همچنان که حضرت امام رضا (ع) مطلب را این گونه بیان داشته اند: «لَوْ أَنَّ رَجُلًا قَتَلَ بِالْمَشْرِقِ فَرَضِي بِقَتْلِهِ رَجُلًا فِي الْمَغْرِبِ لَكَانَ الرَّاضِي عِنْدَ اللَّهِ عَزَّ وَجَلَّ شَرِيكَ الْقَاتِلِ». همانا اگر مردی در مشرق کشته شده و در مغرب مردی راضی به قتل او شده است، این چنین فردی شریک در قتل حساب می شود (Ibn Babawayh, 1984).

اما برای فرار از این گناه هلاکت بار و عذاب آور، راهکاری وجود دارد و آن اعلام عدم رضایت نسبت به گناهان دیگران است که این کار با انجام امر به معروف و نهی از منکر صورت می پذیرد. راهکاری که برخاسته از قرآن کریم است: «فَلَمَّا نَسُوا مَا ذُكِّرُوا بِهِ أَنْجَيْنَا الَّذِينَ يَنْهَوْنَ عَنِ السُّوءِ وَأَخَذْنَا الَّذِينَ ظَلَمُوا بِعَذَابٍ بَئِيسٍ بِمَا

عملیه مطرح است. این نوع کاربرد هیچگاه جهاد را در بر نمی گیرد؛ زیرا در این نوع امر به معروف و نهی از منکر، بیم نداشتن از ضرر شرطی ضروری است، در حالی که در جهاد این شرط معنا ندارد و احتمال ضرر و گاهی یقین به آن وجود دارد.

نوع دیگر امر به معروف، مصداق جهاد است؛ آن احتمال، بلکه اطمینان به ضرر وجود دارد و گاهی انسان اطمینان دارد که کشته می شود. بنابراین، مفهوم متعارف امر به معروف هنگامی مصداق پیدا می کند که حکومت اسلامی مقتدر باشد و ارزش های اسلامی در جامعه حاکم باشد. در این زمان، مردم از انجام کار زشت و گناه خجالت می کشند و نهی از منکر بر آنها تأثیر می گذارد. این نوع امر به معروف همان شرایطی را دارد که در منابع فقهی و رساله های عملیه آمده است. البته این شرایط شامل امر به معروفی نمی شود که به معنای جهاد است. امام خمینی قدس سره در این باره می فرماید: «تقیه جایز نیست، ولو بلغ ما بلغ. در چنین مواردی باید امر به معروف و نهی از منکر در معنای عام خود از یک سو تعلیم جاهل را در برمی گیرد و از سوی دیگر، تا مرحله جهاد می رسد؛ زیرا هدف جهاد، برتری سخن خداست (Mesbah Yazdi and Moharrami, 2012).

مرتضی مطهری نیز امر به معروف و نهی از منکر را وسیله ای برای پیشبرد اهداف اسلامی می داند و می آورد: «... تمام هدف های مثبت اسلامی داخل در معروف و تمام هدف های منفی اسلامی داخل در منکر است، و گرچه در امر به معروف و نهی از منکر تعبیر امر و نهی هست، ولی با توجه به قرائن، مقصود از آن تنها امر و نهی لفظی نیست، بلکه مقصود استفاده کردن از هر وسیله مشروع برای پیشبرد اهداف اسلامی است. پس اگر روح امر به معروف و نهی از منکر با ترجمه و تعبیر فارسی بیان

پیامبران‌شان امتناع کرد و از فرو فرستادن باران بر این قوم به‌خاطر دشمنی‌شان با علی بن ابی طالب، امتناع می‌کند. در این هنگام شخصی پرسید: «ای رسول خدا، مگر کسی با علی دشمنی می‌ورزد؟» پیامبر فرمود: «آری، دست کشیدن از یاری علی، دشمنی با اوست.»

قریشی در قاموس قرآن می‌آورد: «بُغْضُ به معنی کینه و دشمنی است.» در اقرب الموارد می‌گوید: «بُغْضُ ضد حب، بغضاء و بغضه شدت دشمنی است.» (Gorashi, 1975). راغب گفته آن تنفر نفس از چیزی است بر خلاف حب که میل نفس است (Raghib Isfahani, 1991). حقیقت ایمان به این است که انسان هر آنچه را که خداوند مقرر کرده است، قبول کند. یکی از فرمان‌های خداوند درباره ولایت امام علی علیه السلام است. پس هر کس ولایت آن حضرت را نپذیرد و نسبت به ایشان بغض و دشمنی داشته باشد، در واقع حق ایمان را ادا نکرده است. پیامبر خدا صلی الله علیه و آله فرمود: «مَنْ آمَنَ بِي وَصَدَّقَنِي فَلْيَتَوَلَّ عَلِيَّ بْنَ أَبِي طَالِبٍ؛ فَإِنَّ وِلَايَتَهُ وِلَايَتِي، وَوِلَايَتِي وِلَايَةُ اللَّهِ» (Muttaqi Hindi, 1944). هر کس به من ایمان آورده و تصدیق کرده، باید علی بن ابی طالب را ولی خود بگیرد، که ولایت او ولایت من و ولایت من، ولایت خداست.»

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، گناه عامل اصلی منع باران است. فرهنگ ادیان آسمانی هیچ گناهی به‌اندازه سرپیچی از اطاعت از زمامدار حق بزرگ تلقی نمی‌شود، زیرا زمامدار حق، حاکمیت خدا را پاس می‌دارد و سرپیچی از پاسدار حاکمیت خدا، جرئت و دهن‌کجی به حاکمیت خداست. هر کسی نمی‌تواند دوستدار اهل بیت باشد. کسی که می‌خواهد محب آل محمد صلی الله علیه و آله باشد، باید زمینه آن را در وجود خویش داشته باشد که این عمل نیاز به برطرف نمودن و رفع موانع دارد.

این موانع عبارتند از:

كَانُوا يُفْسُقُونَ» هنگامی که تذکراتی را که به آن‌ها داده شده بود فراموش کردند، لحظه عذاب فرا رسید و نهی‌کنندگان از بدی را رهایی بخشیدیم و کسانی را که ستم کردند، به‌خاطر نافرمانی‌شان به عذاب گرفتار کردیم (اعراف / ۱۶۷). این آیه قرآن به روشنی می‌فهماند که ترک نهی از منکر برابر با عذاب الهی است. پس نباید در برابر انجام گناه دیگران بی‌تفاوت بود و سکوتی از روی رضایت داشت؛ زیرا این نوع رضایت خود گناه است. از آیات و روایات این‌گونه استنباط می‌شود که امر به معروف و نهی از منکر در اسلام همانند زکات در دیگر ادیان الهی نیست که صرفاً مبتنی بر یک نوع وصیت و سفارش اخلاقی باشد؛ بلکه واجبی الهی است و بی‌اعتنایی به آن یکی از عوامل معنوی اجتماعی می‌تواند باعث بند آمدن باران و در نتیجه خشک‌سالی شود. این فریضه الهی دارای شرایط و آداب مخصوصی است که در کتب اخلاقی ذکر شده است.

بی‌اعتنایی به ولایت

مهربت است که هر کار نیک و بدی در دنیا و آخرت آثار و نتایج دارد. دوستی اهل بیت علیهم السلام و انکار ولایت ایشان نیز از محدوده این قاعده کلی بیرون نیست. یعنی عشق و دوستی عترت پیامبر صلی الله علیه و آله و سلم، به عنوان یک صفت ارزشمند موجب برکات و درجات و منزلت انسان است و در مقابل عدم پذیرش ولایت، هلاکت و شقاوت ابدی به‌دنبال خواهد داشت. رسول اکرم صلی الله علیه و آله و سلم پیامدهایی را برای انکارکنندگان ولایت و جانشینی امیرالمؤمنین علیه السلام بیان می‌کند. از جمله:

«إِنَّمَا رَفَعَ اللَّهُ الْقَطْرَ عَنْ بَنِي إِسْرَائِيلَ بِسُوءِ رَأْيِهِمْ فِي أَنْبِيَائِهِمْ وَ إِنْ اللَّهُ يَرْفَعُ الْقَطْرَ عَنْ هَذِهِ بَبُغْضِهِمْ عَلَيَّ بِنِ ابِي طَالِبٍ» (Majlisi, 1982) خداوند از فرو فرستادن باران بر قوم بنی اسرائیل به‌خاطر بداندیشی آنان درباره

تولد از حرام. امام صادق علیه السلام فرمود: «مَنْ وَجَدَ بَرْدَ حُبْنَا عَلَى قَلْبِهِ فَلْيَكْثِرِ الدُّعَاءَ لِمَمِّهِ، فَإِنَّهَا لَمْ تَخُنْ أَبَاهُ» (Ibn Babawayh, 1958). هر که خنکای محبت ما در دلش یافت که برای مادرش زیاد دعا کند؛ زیرا معلوم می‌شود که به پدرش خیانت نکرده است.

- صفات زشت و غیر اخلاقی: روزی مردی به علی علیه‌السلام عرض کرد: "خداوند مرا فدای شما گرداند. من به شما و خانواده‌تان خیلی علاقه دارم" و آن حضرت را بسیار ستود. حضرت به او فرمود: "دروغ می‌گویی. ما را چند دسته دوست ندارند: انسان‌های بی‌غیرت و ناموس‌فروش، مردانی که حالات زنانه از خود بروز می‌دهند، متولدین از حرام و کسانی که مادرشان در ایام عادت به آنها باردار شده است."

راوی حدیث می‌گوید: مدتی گذشت تا اینکه جنگ صفین پیش آمد. همان مرد به‌همراه لشکریان معاویه در جنگ صفین به هلاکت رسید و راستی گفتار امام علی علیه‌السلام روشن شد. اصولاً اینکه مؤمن نمی‌تواند بدون عشق و محبت اهل بیت علیهم‌السلام زندگی کند و در مقابل انسان‌های منحرف و گمراه و منافق هم نمی‌تواند آل الله علیهم‌السلام را از ته دل دوست داشته باشند، یک حقیقت تردیدناپذیر است (Elm Al-Huda, 2018).

به عبارتی، شخص باید مراقب نیت و کیفیت درونی قلب خود باشد، چون اگر دل انسان نسبت به رفتار و شخصیت تبه‌کاران یا گناهکاران تمایل پیدا کند، ممکن است او را از مسیر درست دور کند. رضایت قلبی به کاری، چه نیک و چه بد، انسان را از ثواب یا عقوبت آن برخوردار می‌کند. در جهان معنا گفته می‌شود که دل انسان باید همواره پاسداری شود، زیرا حتی اگر کسی در صحنه‌ی بی‌حرمتی به اهل بیت علیهم‌السلام حضور نداشته باشد، اما در دل به آن ستم خشنود باشد، در شمار همراهان آن ظلم نوشته می‌شود. همان‌گونه که شنیده می‌شود اگر

نیکی و کار صالحی انجام گیرد و دل انسان از آن شادمان شود، او نیز در پاداش آن شریک دانسته می‌شود. از همین رو در زیارت امام حسین علیه‌السلام یاد می‌شود: «و لَعَنَّ اللهُ أُمَّةً سَمِعَتْ بِذَلِكَ فَرَضِيَّتْ»^۱ که خداوند جماعتی را لعنت کرده است که تنها خبر ستم را شنیدند و به آن راضی بودند؛ چرا که رضایت قلبی، انسان را به‌سان انجام‌دهنده‌ی همان عمل به شمار می‌آورد، چه در خیر و چه در شر.

پیامبر خدا صلی الله علیه و آله در وصف اهل بیت خود و برکت آنان می‌فرماید:

«بِهِمْ يَعْمُرُ بِلَادُهُ، وَ بِهِمْ يَرْزُقُ عِبَادُهُ، وَ بِهِ مَنْزَلُ الْقَطْرِ مِنَ السَّمَاءِ، وَ بِهِمْ يُخْرَجُ بَرَكَاتُ الْأَرْضِ».

«به سبب آنان، خداوند سرزمین‌های خود را آباد می‌کند و به سبب آنان، بندگان خود را روزی می‌دهد و به سبب آنان از آسمان باران فرستد و به سبب آنان، برکت‌های زمین را رویاند (Majlisi, 1982).

با توجه به مطالبی که بیان شد، یکی از مهم‌ترین معیارهای قبولی اعمال که اعتنایی به آن می‌شود، ولایت است. بی‌اعتنایی به ولایت مانع بارش باران و به‌تبع آن موجب خشک‌سالی می‌شود.

قضاوت ظالمانه

انسان موجودی است که در زندگی نیازمند برقراری روابط اجتماعی با دیگران است. از طرفی، زندگی اجتماعی محل بروز اختلافات و درگیری‌ها و همچنین اظهار نظرها در مورد اشخاص، حوادث و رویدادهای گوناگون است. حکم کردن در مورد رفتار و اعمال دیگران از جمله رفتارهای اجتماعی است که تعداد زیادی از مردم جامعه درگیر آن هستند و معمولاً با کوچک‌ترین مسئله‌ای

^۱ . عباس قمی، مفاتیح الجنان، زیارت عاشورا

فرزندش گفت: "فرزندم، درست دقت کن که چگونه داوری می‌کنی، زیرا این خود نوعی قضاوت است و خداوند در روز قیامت درباره آن از تو سؤال می‌کند (Tabarsi, 1993). از محتوای حدیث چنین برداشت می‌شود که حضرت علی علیه‌السلام اظهار نظر فرزندش را نسبت به خط آن دو کودک و تعیین بهترین آن‌ها، نوعی قضاوت به معنای عام آن به‌شمار آورده است.

معنای خاص آن، همان معنای خاص اصطلاح "قضا" و یا همان معنای لغوی آن است. بیشتر فقها لفظ "قضا" را در مشهورترین معنای آنکه همان "حکم" است، از باب اطلاق کلی بر فرد در معنای عام بر خاص اطلاق نموده‌اند (Shaybanifar, 2011).

در بسیاری از موقع‌ها گفته می‌شود که قضاوت درباره دیگران بر پایه شناخت ناقص شکل می‌گیرد؛ زیرا هنگامی که اطلاعات اندکی درباره یک رویداد یا رفتار در دست باشد، موضوع به‌گونه‌ای که دل می‌خواهد در ذهن تحلیل می‌شود و در نتیجه، حکمی نادرست صادر می‌گردد. همچنین یاد می‌شود که پیش‌داوری ممکن است از پذیرش‌نداشتن رفتار یا ظاهر کسی ناشی شود؛ چنان‌که گاه ظاهر، پوشش یا چهره فردی ناپسند دانسته می‌شود و بی‌آنکه حقیقتی روشن باشد، برچسبی ناروا به او زده می‌شود. در حالی که هشدار داده می‌شود چنین نگاه‌هایی می‌تواند تنها بر برداشت‌های سطحی تکیه داشته باشد و به خطا رود. از این‌رو تأکید می‌شود که قضاوت‌های بشری همواره بر حق نیستند و الزاماً به داوری درست نمی‌انجامند.

در قرآن کریم، قضاوت‌های بشری بر دو نوع حق و باطل معرفی شده‌اند. اگر در جریان یک داوری، حکم به درستی صادر شود، آن قضاوت و داوری حق است و اگر به هر دلیل صدور حکم مبتنی بر حقایق موجود نباشد، قضاوت و داوری باطل و احکامی که در جریان این نوع

دیگران را مورد قضاوت قرار می‌دهند. این نحوه رفتار آثار نامطلوبی را نیز به‌دنبال دارد.

خیلی از مواقع، این قضاوت‌ها نادرست بوده و نتیجه‌ای جز تهمت و افترا نخواهد داشت. امام صادق علیه‌السلام نتیجه قضاوت نادرست و ستمگرانه را قطع رحمت الهی می‌داند و می‌فرماید:

«إِذَا فُشِيَ أَرْبَعَةٌ ظَهَرَتْ أَرْبَعَةٌ: إِذَا فُشِيَ الزَّانَا ظَهَرَتْ الزَّلَّزَلَةُ، وَإِذَا فُشِيَ الْجَوْرُ فِي الْحُكْمِ احْتَبَسَ الْقَطْرُ، وَإِذَا خُفِرَتِ الدِّمَّةُ أُدِيلَ لِأَهْلِ الشَّرْكِ مِنَ أَهْلِ الْإِسْلَامِ، وَإِذَا مُنِعَتِ الزَّكَاةُ ظَهَرَتِ الْحَاجَةُ» (Kulaini, 1986).

اگر چهار چیز شایع شود، چهار چیز نیز بروز می‌کند: اگر زنا شایع شود، زلزله رخ می‌دهد؛ و اگر ستم در داوری شایع شود، باران بند می‌آید؛ و اگر اهل ذمه مورد ستم قرار گیرند، مشرکان بر مسلمانان چیره می‌گردند؛ و اگر از پرداخت زکات خودداری گردد، نیازها نمایان می‌شوند.

مصطفوی می‌نویسد: «فشا خیره أو فضله أو سره،» اگر خیری، فضلی یا رازی از بزرگواری پخش شود. در معنای جور آمده است: «جوراً عن الشيء: از وی روی گردان شد (Mostafavi, 2023)؛ جار علیه: بر او ستم کرد (Bustan, 1996)». حاکم و حُكَّامٌ (Mostafavi, 2023)، کسانی هستند که در میان مردم حکم می‌کنند و فرمان دارند؛ حاکم، جمع حُكَّام و حاکمون: قاضی، داور، اجرا کننده حکم، آنکه مملکت را اداره کند، با امر: فرمانروای مطلق، دیکتاتور.

حکم دارای معنای عام و خاص می‌باشد. معنای عام آن عبارت است از اینکه درباره چیزی اظهار نظر و داوری کنی، یعنی بگویی این چنین است یا این چنین نیست.

در احادیث اسلامی آمده است که روزی دو کودک خردسال هر کدام خطی نوشته بودند و برای انتخاب بهترین خط به حضور امام حسن علیه‌السلام رسیدند. حضرت علی علیه‌السلام که ناظر این صحنه بود، به

قضاوت‌ها صادر می‌شوند، ظالمانه و نادرست‌اند (Shaybanifar, 2011).

بسیار دیده می‌شود که مثلاً فقط با دیدن یک عکس، نوع لباسی که شخصی به تن داشته، تهمت‌ها و هجمه‌هایی علیه افرادی ایجاد شده و بعداً مشخص شده که حقیقت ماجرا مخالف برداشت‌های ظاهری صورت گرفته بوده است. یا مثلاً کسی شخص جوان و کم‌سن و سالی را در حرفه یا پستی می‌بیند و به صرف جوان بودن، انگ بی‌سوادی به او می‌زند، در حالی که این جوان، سواد لازم را دارد و بسیار هم حرفه‌ای عمل می‌کند؛ ولی به صرف جوان بودن، مورد قضاوت ناپسند و ناصحیح قرار می‌گیرد. نمونه دیگر جایی است که سخنان شخصیتی را تقطیع می‌کنند و طوری آن را منعکس می‌کنند که برداشتی متفاوت از هدف گوینده ایجاد می‌شود و برخی بر اثر همین بخش از کلام، مرتکب قضاوت عجولانه و ناصحیح می‌شوند.

امام سجاد (ع) قضاوت ظالمانه‌ای را که موجب قطع باران می‌شود، خاص‌تر نموده و آن را منحصر به ظلم قاضی دانسته و می‌فرماید: «الذُّنُوبُ الَّتِي تَحْبِسُ غَيْثَ السَّمَاءِ جَوْرُ الْحُكَّامِ فِي الْقَضَاءِ وَ شَهَادَةُ الزُّورِ وَ كِتْمَانُ الشَّهَادَةِ» (Ibn Babawayh, 1984)، یعنی گناهایی که بارش آسمان را باز می‌دارند، عبارتند از قضاوت ظالمانه قاضیان، شهادت دروغ و کتمان شهادت.

اسلام، قضاوت غیر عادلانه را به شدت محکوم و قاضیان ستمگر را بازخواست می‌کند، چنان‌که خداوند در سه آیه از سوره مائده، چنین افرادی را کافر، ستمگر و فاسق معرفی کرده است: «وَمَنْ لَّمْ يَحْكَمْ بِمَا أَنْزَلَ اللَّهُ فَأُولَئِكَ هُمُ الْكَافِرُونَ» (مائده/ ۴۴، ۴۷ و ۴۵). بنابراین، به‌خاطر داوری بر طبق آیات الهی، از مردم نهراسید و از من بترسید و آیات مرا به بهای ناچیزی نفروشید! و آنها که به احکامی که خدا نازل کرده حکم نمی‌کنند، کافرند.

«قضاوت»، که عبارت از داوری کردن برای رفع نزاع و کشمکش در میان مردم است، یکی از منصب‌های بزرگی است که از جانب خداوند متعال برای پیغمبر صلی الله علیه و آله و امامان معصوم سلام و از جانب آنان برای فقیه جامع الشرایط تعیین کرده است.

منصب قضاوت در دیدگاه اسلام یکی از ارزشمندترین و در عین حال خطرناک‌ترین مناصب اجتماعی است. قاضی نیز در یک نگاه نماینده خدا و با فضیلت‌ترین انسان‌هاست؛ چنان‌که در قرآن آمده است: "ما تو را نماینده خود در زمین قرار دادیم، پس در میان مردم به حق داوری کن." و در نگاه دیگر، او از شقی‌ترین مردم شمرده شده است؛ زیرا به تعبیر امیر مؤمنان علیه السلام، او در جایگاهی می‌نشیند که یا انبیا و اوصیا در آن قرار می‌گیرند و یا اشقیا بر آن تکیه می‌زنند و فاصله این دو، فاصله بهشت و دوزخ است.

ظلم و ستم حاکم و قاضی یک گناه اجتماعی است که آثار آن در جامعه بسیار ملموس بوده و در همه طبقات جامعه تأثیرگذار است. لذا خداوند آثار وضعی چنین گناهی را کاهش و قطع باران می‌گذارد که نتیجه چنین وضعیتی، بروز خشک‌سالی و تأثیر آن بر جوامع انسانی است.

گفته می‌شود بر همگان لازم است تا آنجا که توان دارند از افتادن در دام ظلم و ستم، به‌ویژه ستم در داوری و قضاوت، پرهیز شود. همچنین یادآوری می‌شود که اگر در جامعه چنین انحرافی پدید آید، باید برای جلوگیری از آن اقدام شده و در مسیر اصلاح آن کوشش گردد. در عین حال هشدار داده می‌شود که اگر در برابر چنین وضعی سکوت اختیار شود و امر به معروف و نهی از منکر انجام نگیرد، پیامدهای ناگوار آن دامنگیر جامعه خواهد شد؛ چنان‌که کاهش برکات آسمانی و بروز بلاهایی چون

می‌توان دلالت آیات و روایات بر انواع خشک‌سالی و نقش عوامل خاص اجتماعی بر آن‌ها را در شکل ۱ ترسیم نمود.

نتیجه‌گیری

عوامل خاص اجتماعی خشک‌سالی از منظر قرآن کریم و روایات، عواملی هستند که افراد با نادیده‌انگاری و بی‌اعتنایی به آن (امر به معروف و نهی از منکر و بی‌اعتنایی به ولایت) و رفتار نادرست برخی از مسئولان (قضاوت ظالمانه قضات) زمینه عذاب الهی (خشک‌سالی) را در جامعه فراهم می‌سازند عوامل مذکور در قرآن کریم و روایات حاکی از آن است که خشک‌سالی در واقع یک نوع عذاب اجتماعی دنیوی است که به سبب اعمال خود انسان‌ها گریبانگیر آنها می‌شود. مهم‌ترین نتیجه این تحقیق این است که علت پدیده خشک‌سالی فقط منحصر در عوامل طبیعی نیست، بلکه تأثیر عوامل معنوی کمتر از عوامل طبیعی و مادی نبوده است. با توجه به اینکه برخی از افراد با استناد به علل طبیعی، خشک‌سالی را از حوادث بی‌ارتباط با رفتار و اعمال مردم دانسته و برخی با داشتن اطلاعات ناقص از آیات و روایات آن را بر رفتار گروه خاصی از مردم تطبیق می‌دهند که باعث ایجاد شبهه و اختلاف بین گروه‌های مختلف جامعه می‌شود، لذا پیشنهاد می‌گردد افراد متخصص پیامدهای احتمالی این پدیده، مدیریت و راهکارهای کاهش خسارت ناشی از آن مورد بررسی قرار داده و اطلاعات مربوط را از کتب و نشریات معتبر و پایان‌نامه‌هایی با محوریت خشک‌سالی که به موضوع خشک‌سالی پرداخته‌اند را استخراج نموده و یک راهکار جامع و کامل بدون انگیزه سیاسی خاص ارائه دهند تا با برنامه‌ریزی دقیق و عمل به آن بتوان تا آنجا که در دست انسان است با این پدیده سوء مقابله کرد.

قحطی و خشک‌سالی به عنوان نتیجه چنین بی‌تفاوتی یاد شده است.

تطبیق انواع خشک‌سالی بر آیات و روایات مستخرج

موضوع

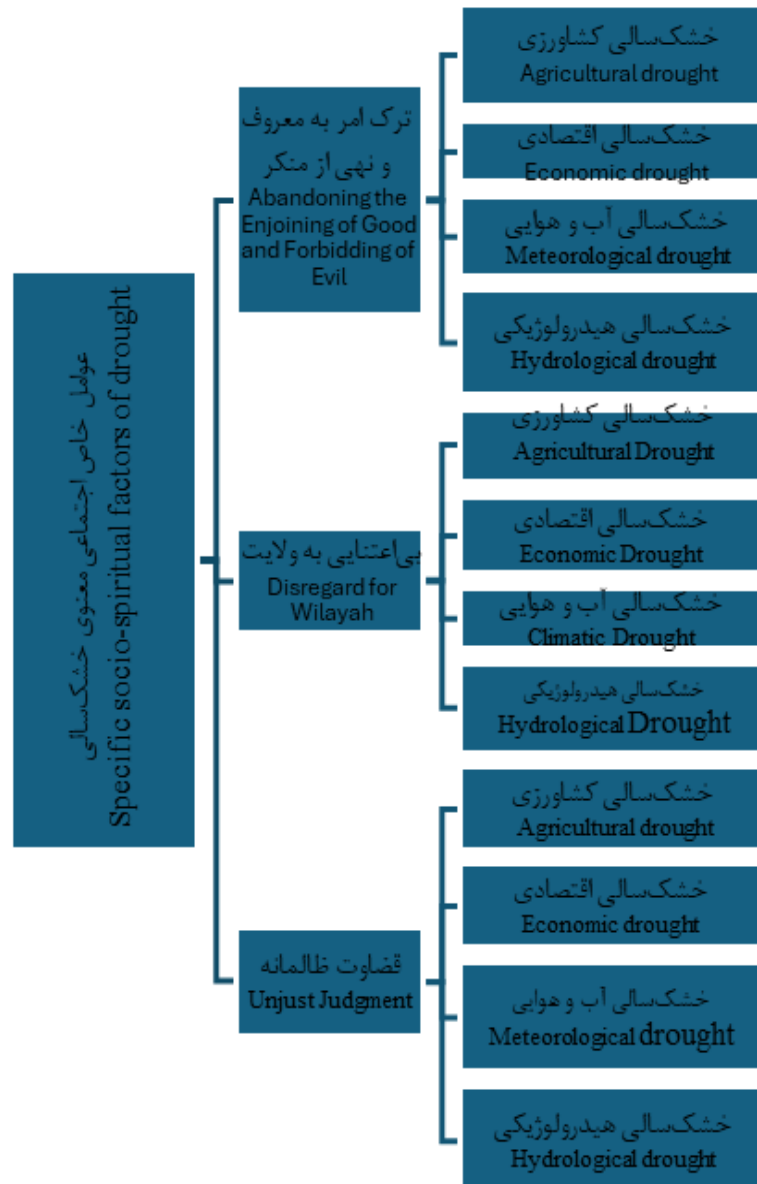
با توجه مباحثی که در ذیل مفهوم‌شناسی خشک‌سالی مطرح گردید می‌توان گفت که خشک‌سالی کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی، آب و هوایی و هیدرولوژیکی، از انواع خشک‌سالی محسوب می‌شود. با تأمل در هر یک از آیات و روایات ناظر بر عوامل خاص اجتماعی معنوی خشک‌سالی می‌توان گفت که اصطلاح‌های «تُجَدَّبُوا»^۱، «رَفَعَ الْقَطْرُ»^۲، «احتبس القطر»^۳ و «تَحْبَسُ عَيْنُ الْمَاءِ»^۴ ناظر به قطع باران است. این مسئله (عدم بارش باران) منشأ همه انواع خشک‌سالی است که مطرح گردید. به نظر نگارنده این جامعیت الفاظ و دلالت اکمل آن بر تمام مفاهیم و عناصر موضوع، یکی از ویژگی‌های آیات و روایات است. در واقع یکی از جنبه‌های اعجاز بیانی آیات قرآن و روایات معصومین (ع) گزینش هدفمند واژگان می‌باشد، به گونه‌ای که نمی‌توان هیچ واژه‌های را جایگزین واژه‌های آن نمود. اگر به جای اصطلاحات «رَفَعَ الْقَطْرُ»، «احتبس القطر»، و «تَحْبَسُ عَيْنُ الْمَاءِ» اصطلاحات دیگری استعمال می‌شد، دلالت کامل بر انواع خشک‌سالی که در عصر حاضر اتفاق افتاده است، نمی‌کرد. با توجه به مطالب مذکور

۱. « أَيُّهَا النَّاسُ، إِنَّ اللَّهَ يَقُولُ: لَتَأْمُرَنَّ بِالْمَعْرُوفِ وَلَتَنْهَوْنَ عَنِ الْمُنْكَرِ قَبْلَ أَنْ تُجَدَّبُوا فَتَتَسَقَّفُونَ فَلَا تَسْقُونَ »

۲. إِنَّمَا رَفَعَ اللَّهُ الْقَطْرَ عَنْ بَنِي إِسْرَائِيلَ بِسُوءِ رَأْيِهِمْ فِي أَنْبِيَائِهِمْ وَإِنَّ اللَّهَ يَرْفَعُ الْقَطْرَ عَنْ هَذِهِ بِنُضْحِهِمْ عَلَيَّ بِنِ أَبِي طَالِبٍ (ع).

۳. إِذَا فُشَا أَرْبَعَةٌ ظَهَرَتْ أَرْبَعَةٌ: إِذَا فُشَا الزَّيْنَا ظَهَرَتْ الزَّلْزَلَةُ، وَإِذَا فُشَا الْجَوْرُ فِي الْحَكْمِ احْتَبَسَ الْقَطْرُ، وَإِذَا خُفِرَتِ الدِّمَةُ أُدِيلَ لِأَهْلِ الشَّرِكِ مِنَ أَهْلِ الْإِسْلَامِ، وَإِذَا مُنِعَتِ الزَّكَاةُ ظَهَرَتْ الْحَاجَةُ.

۴. اَلَّذُنُوبُ الَّتِي تَحْبِسُ عَيْنَ السَّمَاءِ جَوْرُ الْحُكَّامِ فِي الْقَضَاءِ وَ شَهَادَةُ الزُّورِ وَ كِتْمَانُ الشَّهَادَةِ.



شکل ۱. نمودار تطبیق انواع خشکسالی بر آیات و روایات مستخرج موضوع.

Fig 1. Chart of the correspondence of drought types with the extracted Qur'anic verses and narrations on the topic.

akhbar (1st ed.). Islamic Publishing Office affiliated with the Society of Teachers of the Qom Seminary.

Ibn Babawayh, M. (1958). *Uyun akhbar al-Ridha*. Jahan Publishing.

Ibn Manzur, A. (1997). *Lisan al-Arab*. Center for Computerized Islamic Sciences Research.

Khajepour, M. (2015). The world of causes and how they influence and are influenced in the Quran. *Oyun Quarterly*, (2), Spring–Summer. [In Persian]

Kulaini, M. (1986). *Al-Kafi* (4th ed.). Dar al-Kutub al-Islamiyyah.

Majlisi, M. (1982). *Bihar al-anwar* (2nd ed.). Al-Wafa Foundation.

منابع

Bustan, F. (1996). *Arabic-Persian abjad dictionary* (R. Mahyar, Ed.; 2nd ed.). Islamic Publishing. [In Persian]

Dekhoda, A. (2010). *Dekhoda dictionary* (6th ed.). University of Tehran Publishing and Printing Institute. [In Persian]

Fayoumi, A. (1993). *Al-Misbah al-munir fi gharib al-sharh al-kabir al-Rafi'i* (Vol. 3). Dar al-Hijrah Institute.

Gorashi, A. (1975). *Quran dictionary*. Islamic Bookstore. [In Persian]

Ibn Babawayh, A. (Sheikh Saduq). (1984). *Man la yahduruhu al-faqih*. Beirut Publishing. Ibn Babawayh, M. (Sheikh Saduq). (1982). *Ma'ani al-*

- Mesbah Yazdi, M., & Moharrami, G. (2012). *Lightning of Karbala* (9th ed.). Imam Khomeini Educational and Cultural Institute. [In Persian]
- Mirsemici, S. M., Derakhshani, K., & Kamran, B. (2015). *Disasters and calamities in the Qur'an and narrations*. Poshtiban Publishing. [In Persian]
- Mo'in, M. (2007). *Mo'in dictionary* (2nd ed.). Zarrin. [In Persian]
- Mostafavi, H. (2023). *Al-Tahqiq fi kalimat al-Quran al-karim* (1st ed.). Markaz al-Kitab for Translation and Publication.
- Motahhari, M. (1989). *The epic of Hosseini* (Vol. 1, 14th ed.). Sadra. [In Persian]
- Muttaqi Hindi, A. (1944). *Kanz al-ummal*. Ottoman Encyclopedia Press.
- Naderi, M. (2003). *The philosophy of natural disasters and afflictions: Mercy or punishment? (Methods of prevention with verses, narrations, stories, and supplications)*. Fazayel. [In Persian]
- Raghib Isfahani, H. (1991). *Mufradat al-faz al-Quran* (S. A. Dawoodi, Ed.; 1st ed.). Dar al-Qalam.
- Tabarsi, F. (1993). *Majma' al-bayan* (3rd ed.). Nasir Khusraw Publications.
- Tabatabai, M. (2008). *Tafsir al-mizan* (M. B. Mousavi, Ed.; 11th ed.). Islamic Publications Office of the Society of Teachers of the Qom Seminary.
- Tarkhan, G. (2020). The role and effect of metamaterial causes and factors in natural disasters. *Qabasat*, 25(96), 35-66. [In Persian] <http://doi/0296>
- Zabidi, M. (1993). *Taj al-arous min jawahir al-qamus* (Vol. 10, 1st ed.). Dar al-Fikr.
- Monfared, N. (2013). *Drought: Causes, effects, and management* (1st ed.). Persian Gulf University Press. [In Persian]
- Elm Al-Huda, S. (2018). *Ethics and psychoanalysis from the Islamic perspective* (1st ed.). Yaser Publishing. [In Persian]
- Hurr al-Amili, M. (1988). *Wasail al-shi'a*. Al-Bayt Institute (AS).
- Shaybanifar, M. (2011). *Explanation of jurisprudential legal terms* (1st ed.). Negah-e Moaser Publishing. [In Persian]
- Kordavani, P. (2019). *Drought and ways to combat it in Iran: In agriculture, industry, and cities* (2nd ed.). Tehran University Press. [In Persian]
- Tabarsi, F. (1993). *Majma' al-bayan fi tafsir al-Quran* (1st ed.). Al-Alami Foundation for Publications. [In Persian]



An Overview of Different Perspectives on Climate Change: Analysis and Comparison

Ghazal Dehghanisani^{1,*}  Seyyed Nasser Bashi-Azghadi^{2,3}

1. M.Sc. Graduated, Water Resources Department, Toossab Consulting Engineers Company, Mashhad, Iran.
2. Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Khavaran Institute of Higher Education, Mashhad, Iran.
3. Researcher at Eram Research Center for Environmental Resource Management, Mashhad, Iran.

*Corresponding Author: ghazal.sani@gmail.com

Keywords:

Climate Change, Global Warming, IPCC, NIPCC, Greenhouse Gases.

Received:

04 March 2025

Revised:

06 June 2025

Accepted:

09 September 2025

Introduction

Climate change and global warming are recognized as among the most critical challenges of the 21st century in scientific and academic circles. Climate change refers to long-term shifts in Earth's weather patterns, primarily driven by human activities, posing a serious threat to human life on the planet. Beyond rising temperatures, it encompasses intensified storms, increased droughts, extreme precipitation, and rising sea levels. The term "climate change" is preferred over "global warming" for its broader scope, capturing all persistent alterations in the Earth's climate system. However, some experts argue that human settlements cover only 1-3% of Earth's surface (Babaeian et al., 2019), questioning whether this alone can cause such widespread changes, necessitating multifaceted analysis.

International bodies like the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), established in 1988 by the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP), assess scientific, technical, economic, and social research on climate change. IPCC defines climate change as statistically significant variations in climate averages or variability over decades, attributable to natural processes or human-induced atmospheric and land-use changes (IPCC, 2007). Its reports assert that human activities are undeniably the primary driver, with warming oceans, reduced ice/snow cover, rising sea levels, and elevated greenhouse gases. IPCC warns that global emissions must halve by 2030 to avert the worst crises. Conversely, critics view IPCC's approach as politically biased, potentially limiting developing nations or promoting wind/solar technologies at the expense of oil-producing countries.

How to cite this article:

Dehghanisani, G. & Bashi-Azghadi, S.N.(2026). An overview of different perspectives on climate change: Analysis and comparison. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 3 (Spatial Issue), 137-156. [10.22077/jdcr.2025.9047.1124](https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9047.1124)



Copyright: © 2026 by the authors. Licensee Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR). This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The Non-governmental International Panel on Climate Change (NIPCC), founded in 2003 and supported by the Heartland Institute, challenges IPCC's consensus by emphasizing natural factors. It cites historical evidence of higher CO₂ levels pre-human era with cooler temperatures and greater methane impacts (Singer, 2008). Debates intensify over CO₂ vs. methane roles, politicized by implications for oil-rich vs. industrialized nations. NIPCC references "Climategate" data manipulation claims, later debunked as non-systematic (Nature, 2010; IPCC, 2014). This article analyzes these perspectives, stressing the need for rigorous scrutiny to avoid unexamined policies with unintended consequences.

Materials and Methods

This report examines the formation, methodologies, and differences between IPCC and NIPCC through comparative analysis. IPCC relies on climate models like CMIP5/CMIP6, using RCPs and SSPs scenarios to simulate global/regional temperature, precipitation, sea levels, and other indices (IPCC, 2014, 2021). NIPCC prioritizes critical literature reviews, historical data, and case studies, critiquing IPCC models' uncertainties and advocating natural cycles (e.g., solar/oceanic) (Singer, 2008; Idso et al., 2014).

IPCC structure includes three Working Groups (scientific basis, impacts/adaptation/vulnerability, mitigation) and a Task Force on greenhouse gas inventories, with 195 member countries and offices in Geneva. Over 37 years, it has produced six Assessment Reports (AR1-AR6, 1990-2023), plus Special Reports (e.g., SR1.5 on 1.5°C warming, SRCCL on climate/land, SROCC on oceans/cryosphere). NIPCC, an independent scientist panel, focuses on unbiased data interpretation without political agendas, contrasting IPCC's governmental ties. Review involved synthesizing IPCC reports (FAR 1990 to AR6 2023), protocols (Kyoto, Paris), critiques (e.g., SEPP 1992; Maddy 1991), and NIPCC publications, with tabular summaries (Tables 1-2) for key findings.

Results and Discussion

IPCC reports progressively affirm human dominance: AR1 (1990) linked observations to greenhouse models, enabling the Rio Convention; AR2 (1996) detected human fingerprints, birthing Kyoto Protocol (5% emissions cut 2008-2012); AR3 (2001) tied changes to fossil fuels/land use; AR4 (2007) deemed warming "very likely" human-induced; AR5 (2014) outlined RCP scenarios (2.6-8.5 W/m² forcing, linear-then-weakening temperature response), underpinning Paris Agreement (limit warming to <2°C, ideally 1.5°C); AR6 (2023) projects 1.8-4°C rise by 2100, amplifying hydrological shifts (e.g., +30% irrigation needs at 2°C). Special Reports reinforce urgency: SR1.5 (2018) on societal transformations; SRCCL (2019) on land-food-security fluxes; SROCC (2022) on ocean/ice risks.

NIPCC counters with natural forcings, historical CO₂-temperature mismatches, methane potency, and model flaws. Tables 1-2 summarize reports, highlighting IPCC's policy influence (e.g., Paris commitments) vs. NIPCC's skepticism.

IPCC's model-driven approach enables quantitative policy but faces NIPCC critiques on uncertainties and political biases (e.g., Climategate). Debates politicize gas roles (CO₂ for oil nations, methane for industry), yet evidence confirms ongoing changes—disputed mainly on origins and extents. IPCC successes include global treaties, but implementations falter (e.g., U.S. Kyoto withdrawal, Paris funding gaps). NIPCC fosters doubt, promoting natural factors, but lacks IPCC's scale/consensus.

Conclusion

No climate hypothesis should be accepted unscrutinized; deep research is essential. While changes are evident, human vs. natural contributions remain contested. Hasty policies risk negative outcomes. Balanced analysis of IPCC/NIPCC perspectives urges evidence-based strategies for sustainable adaptation over alarmism.



مروری بر دیدگاه‌های مختلف درباره تغییر اقلیم: تحلیل و مقایسه

غزل دهقانی سانج^{۱*}، سیدناصر باشی ازغدی^{۲،۳}

- ۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه منابع آب، شرکت مهندسی مشاور طوس‌آب، مشهد، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، مؤسسه آموزش عالی خاوران، مشهد، ایران.
- ۳- پژوهشگر مرکز پژوهشی مدیریت منابع محیط زیست ارم، مشهد، ایران.

*نویسنده مسئول: ghazal.sanij@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم و گرمایش جهانی از مسائل مهم و پیچیده‌ای است که در سطح جهانی مورد توجه قرار دارد. این پژوهش به بررسی دو دیدگاه اصلی درباره تغییر اقلیم از سوی IPCC و NIPCC می‌پردازد. IPCC به‌عنوان نهادی بین‌المللی با حمایت علمی و دولتی، تغییرات اقلیمی را ناشی از فعالیت‌های انسانی دانسته و بر ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای پیشگیری از بحران‌های احتمالی تأکید می‌کند. همچنین این نهاد نقش سیاست‌های محیط‌زیستی و فناوری‌های نوین را در کاهش اثرات تغییر اقلیم برجسته می‌سازد. در مقابل، NIPCC با تکیه بر داده‌ها و شواهد علمی بی‌طرفانه، معتقد است تغییرات اقلیمی می‌تواند ناشی از عوامل طبیعی و نه فقط فعالیت‌های انسانی باشد. این گروه بر اهمیت پژوهش‌های مستقل و تحلیل‌های بلندمدت برای شناخت بهتر تغییرات اقلیمی تأکید دارد. در این تحقیق گزارش‌های IPCC و نقدهای وارد بر آن بررسی و تفاوت دیدگاه‌ها تحلیل شده و تصویری جامع برای سیاست‌گذاران و جامعه جهانی ارائه می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

تغییر اقلیم، گرمایش جهانی، IPCC، NIPCC، گازهای گلخانه‌ای.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۳/۱۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۱۹

مقدمه

در طی دهه‌های اخیر، سازمان‌ها و ارگان‌های مختلفی در سطح بین‌المللی در حال تحقیق بر روی موضوع تغییر اقلیم هستند. یکی از این نهادها هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم^۱ است. این نهاد پس از مطرح‌شدن اهمیت مسئله آثار گرمایش جهانی در اولین اجلاس بین‌المللی تغییر اقلیم، باهدف ارزیابی تحقیقات علمی، فنی، اقتصادی و اجتماعی مرتبط با تغییر اقلیم و آثار آن بر کره زمین در سال ۱۹۸۸ توسط سازمان جهانی هواشناسی^۲ و برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد^۳ تأسیس شد. اعضای این هیئت نمایندگان کشورهای عضو این دو سازمان هستند و وظیفه‌دارند که دلایل علمی وقوع تغییرات آب‌وهوایی و راهکارهای مقابله با آن را برای ارائه در کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل متحد^۴ فراهم کنند (National Meteorological Organization, 2017). از نگاه IPCC، تغییرات آب و هوایی به تغییرات معنادار آماری در میانگین‌های اقلیمی یا تغییرپذیری آن برای دوره‌های طولانی مدت (دهه‌ای یا بیشتر) اشاره دارد که این تغییرات به‌علت رخداد فرایندهای طبیعی یا تداوم تغییرات ناشی از فعالیت‌های بشر در ترکیب‌های جوی یا کاربری زمین اتفاق می‌افتد (IPCC, 2007). این نهاد از ابتدای شروع به کار نوشتارهای مختلفی را در قالب گزارش‌های تخصصی و ارزیابی و مقالات فنی تهیه و منتشر کرده است. مهم‌ترین دستاورد این سازمان به‌بیان کو بارت، نایب رئیس IPCC این بوده است که "۱۹۶ کشور عضو IPCC بر این باورند که فعالیت‌های انسانی به‌طرز انکارناشدنی دلیل اصلی تغییر اقلیم به‌شمار می‌روند". به‌بیان‌دیگر این نهاد اعلام می‌دارد که به‌طور کلی جو و اقیانوس‌ها گرم شده‌اند، میزان

عملکرد گیاهان زراعی و سازگاری آنها، تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. چنانچه روند این تغییرات سریع باشد، به‌خاطر آنکه گیاهان نسبت به سایر موجودات زنده امکان گریز از شرایط نامساعد را ندارند، بنابراین زیان بیشتری را متحمل خواهند شد. پس هرگونه تغییر در پارامترهای اقلیمی به نوبه خود، منجر به تغییر در تولید محصولات کشاورزی می‌شود. کاهش میزان تولید محصولات کشاورزی در اثر سرمازدگی، تگرگ و گرم‌زدگی از جمله اثرات گرمایش جهانی در بخش کشاورزی است؛ بنابراین دمای هوا، یکی از مهم‌ترین فاکتورهای اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی به‌حساب می‌آید (Bayatani et al., 2020).

امروزه در اغلب محافل علمی و دانشگاهی، موضوع تغییر اقلیم و گرمایش جهانی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر شناخته می‌شود. تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت در الگوهای آب‌وهوایی زمین اطلاق می‌شود که به‌طور عمده از فعالیت‌های انسانی نشئت می‌گیرد و به‌عنوان تهدیدی جدی برای زندگی بشر بر روی کره زمین در نظر گرفته می‌شود. این پدیده تنها به افزایش دمای زمین (گرمایش جهانی) محدود نمی‌شود، بلکه شامل تغییرات قابل توجهی همچون شدت یافتن طوفان‌ها، افزایش خشک‌سالی، بارش‌های شدید و بالا آمدن سطح دریاها است. استفاده از اصطلاح "تغییر اقلیم" به‌دلیل پوشش گسترده‌تر این پدیده در مقایسه با "گرمایش جهانی" است، زیرا به همه تغییرات پایدار و بلندمدت در سیستم آب‌وهوایی زمین اشاره دارد. با وجود این تعریف، برخی از کارشناسان معتقدند که سهم بسیار کوچک (۱ تا ۳ درصد) مساحت سکونتگاه‌های انسانی در سطح کره زمین (Babaeian et al., 2019)، نمی‌تواند به‌تنهایی موجب بروز چنین تغییرات گسترده‌ای شود و نیازمند بررسی دقیق‌تر و چندجانبه است.

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

² World Meteorological Organization (WMO)

³ United Nation Environment Program (UNEP)

⁴ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)

کنونی بود، اما دمای زمین در آن دوره‌ها پایین‌تر بوده است. از سوی دیگر NIPCC بر اثرگذاری بالاتر متان نسبت به دی‌اکسید کربن تأکید کرده است (Singer, 2008). در مقابل، گزارش‌های IPCC در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۳ نشان می‌دهند که اگرچه متان در بازه‌های کوتاه‌مدت پتانسیل گرمایی بالاتری دارد، اما دی‌اکسید کربن به دلیل پایداری طولانی‌مدت در جو، سهم اصلی در گرمایش جهانی ایفا می‌کند. این اختلاف‌نظرها گاه به مسائل سیاسی گره می‌خورد، چراکه در صورتی که دی‌اکسید کربن به‌عنوان عامل اصلی شناخته شود، کشورهای نفت‌خیز تحت فشار بیشتری برای محدودسازی انتشار این گاز قرار می‌گیرند، اما در صورت معرفی متان به‌عنوان عامل اصلی، توجه به نقش کشورهای پیشرفته و صنعتی در انتشار این گازها را برجسته خواهد کرد. علاوه بر این، NIPCC به موضوع موسوم به Climate Gate استناد کرده و مدعی است که برخی داده‌های اقلیمی برای تقویت شواهد گرمایش جهانی دستکاری شده‌اند (Singer, 2008). با این حال، تحقیقات مستقل بعدی در مجلات معتبر نشان دادند که این تغییرات ماهیت سیستماتیک نداشته و در نتیجه‌گیری‌های کلی IPCC تغییری ایجاد نکرده‌است (Nature, 2010; IPCC, 2014).

آنچه روشن و واضح است اینکه هیچ فرضیه‌ای درباره تغییر اقلیم را نمی‌توان بدون تحقیق و بررسی دقیق پذیرفت. این موضوع نیازمند پژوهش‌های عمیق و سنجش همه‌جانبه داده‌ها و شواهد علمی است. شواهد علمی متعدد، وقوع تغییر اقلیم را تأیید می‌کنند، اما درباره منشأ دقیق آن و میزان تأثیرگذاری عوامل طبیعی یا انسانی همچنان دیدگاه‌های متفاوتی وجود دارد. علاوه بر این، راهکارهای مورد تأکید در مجامع تصمیم‌ساز برای مقابله با تغییر اقلیم، در صورت اجرای بدون بررسی و شتاب‌زده،

یخ و برف کاهش یافته است، سطح میانگین جهانی دریاها بالا رفته‌است، تراکم گازهای گلخانه‌ای در جو افزایش یافته است و فعالیت‌های انسانی عامل اصلی ایجاد این تغییرات است. از این‌رو IPCC هشدار داده است که باید تا سال ۲۰۳۰ میلادی انتشار گازهای گلخانه‌ای در سراسر جهان به نصف کاهش یابد تا به‌این ترتیب از وقوع بدترین بحران آب و هوایی جلوگیری شود. در این میان، برخی محققان همچنان بر این باورند که دیدگاه غالب IPCC نیازمند بررسی و تحلیل‌های دقیق‌تر است و نباید بدون تحلیل کامل داده‌های علمی پذیرفته شود.

عده‌ای از محققان و اقلیم‌شناسان نوع رویکرد حاکم بر IPCC را سیاسی دانسته و معتقدند این نهاد برداشت‌های جهت‌دار از نتایج تحقیقات علمی دارد و به‌دنبال محدود کردن کشورهای در حال توسعه یا فروش فناوری‌های مربوط به توربین‌های بادی و پنل‌های خورشیدی به کشورهای دارای نفت است. یکی از این نهادها هیئت بین‌المللی غیردولتی تغییر اقلیم^۱ است. این نهاد در راستای حمایت از پروژه سیاست علم و محیط‌زیست Fred Singer^۲ که انکارکننده تغییرات آب و هوایی است، ایجاد شد و پس از آن توسط مؤسسه هارتلند^۳ حمایت گردید و به‌صورت رسمی در سال ۲۰۰۳ در ایتالیا آغاز به کار کرد. این نهاد با ایجاد برخی تردیدها، مسیر پذیرش بی‌قید و شرط نظریه‌های IPCC را دشوار می‌سازد و بر نقش عوامل طبیعی در تغییر اقلیم و گرمایش جهانی تأکید می‌کند. بر اساس شواهد تاریخی، حتی زمانی که انسان‌ها هنوز روی کره زمین زندگی نمی‌کردند، میزان دی‌اکسید کربن در جو زمین سه تا چهار برابر بیشتر از وضعیت

¹ Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC)

² S. Fred Singer's Science & Environmental Policy Project

³ Heartland Institute

گازهای گلخانه‌ای تشکیل شده است. دفتر IPCC از ۳۴ عضو تشکیل شده است که اعضای آن از بین کشورهای عضو سازمان ملل انتخاب می‌شوند. ریاست این هیئت از سال ۲۰۱۵ به عهده کره جنوبی است و در سال ۲۰۲۳ برای یک دوره دیگر انتخاب گردید. ۱۹۵ کشور جهان عضو IPCC هستند و سازمان هواشناسی کشور مرجع ملی IPCC در ایران است. این هیئت در طی ۳۷ سال فعالیت خود شش گزارش ارزیابی (دوره‌ای) در رابطه با تغییر اقلیم تهیه کرده است. هر یک از گزارش‌های ارزیابی معمولاً با فاصله زمانی ۵ تا ۷ سال منتشر شده‌اند.

گزارش‌های ارزیابی جهانی تغییر اقلیم

گزارش‌های ارزیابی مجموعه‌ای از گزارش‌های علمی جامع هستند که به بررسی وضعیت تغییرات اقلیمی، تأثیرات آن و راهکارهای مقابله با آن می‌پردازند. این گزارش‌ها به صورت دوره‌ای منتشر می‌شوند و پایه علمی تصمیم‌گیری‌های بین‌المللی در زمینه تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کنند. در ادامه به بررسی شش گزارش ارزیابی پرداخته می‌شود.

گزارش اول

اولین گزارش ارزیابی^۱ جهانی تغییر اقلیم در سال ۱۹۹۰ منتشر شد و به این نتیجه رسید که تغییرات دمایی مشاهده شده به‌طور کلی با مدل‌های گازهای گلخانه‌ای هم‌خوانی دارد. این گزارش اعلام کرد که با دو برابر شدن گازهای گلخانه‌ای، دما ممکن است بین ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سلسیوس افزایش یابد (FAR, 1990). این گزارش موجب شد که در اجلاس ۱۹۹۲ در ریودوژانیرو پیمان تغییرات اقلیمی جهانی پذیرفته شود. اما این گزارش با واکنش‌های

ممکن است به‌جای بهبود شرایط محیط‌زیستی، به بروز پیامدهای ناخواسته یا منفی منجر شود.

مواد و روش‌ها

در این گزارش به نحوه شکل‌گیری دو جبهه IPCC و NIPCC و بررسی تفاوت آن‌ها با یکدیگر پرداخته می‌شود.

تحلیل روش‌شناسی IPCC و NIPCC

IPCC روش‌شناسی خود را بر پایه مدل‌های اقلیمی بنا کرده است. مهم‌ترین این مدل‌ها، خانواده مدل‌های CMIP5 و CMIP6 هستند که با استفاده از سناریوهای انتشار SSPs و RCPs روند تغییرات دما، بارش، سطح دریا و سایر شاخص‌های اقلیمی را در مقیاس جهانی و منطقه‌ای شبیه‌سازی می‌کنند (IPCC, 2014; 2021). این رویکرد امکان پیش‌بینی بلندمدت و طراحی سیاست‌های اقلیمی بر اساس شواهد کمی را فراهم می‌سازد. در مقابل، NIPCC اتکا کمتری به مدل‌سازی‌های پیچیده دارد و بیشتر بر مرور انتقادی پژوهش‌ها، داده‌های تاریخی و شواهد موردی تکیه می‌کند (Singer, 2008). این نهاد معتقد است مدل‌های اقلیمی IPCC با عدم قطعیت‌های بالایی همراه هستند و باید به عوامل طبیعی مانند چرخه‌های خورشیدی یا تغییرات اقیانوسی توجه بیشتری شود.

دیدگاه IPCC

IPCC تنها نهاد سازمان ملل متحد است که مسئولیت علمی بررسی تغییر اقلیم را بر عهده دارد و گزارش‌های آن مبنای تصمیمات سازمان ملل قرار می‌گیرد. مقرر این هیئت در محل دائمی سازمان هواشناسی جهانی در ژنو (سوئیس) است. IPCC از ۳ گروه کاری (۱) مبنای علمی تغییر اقلیم، (۲) اثرات سازگاری و آسیب‌پذیری تغییر اقلیم، (۳) کاهش اثرات تغییر اقلیم و یک گروه ویژه فهرست ملی

¹ First Assessment Report (FAR)

عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است. این گزارش به برآوردهای مختلفی درباره پیش‌بینی تغییرات دما و شرایط آب‌وهوایی پرداخته و پیامدهای آن را بر اکوسیستم‌ها، منابع آبی، کشاورزی، سلامت انسان و اقتصاد جهانی بررسی می‌کند (Houghton and Ding, 2001).

یکی از نکات مهم این گزارش، پیش‌بینی افزایش سطح دریاها، تغییرات در الگوهای بارندگی، شدت یافتن پدیده‌های آب‌وهوایی و تأثیرات منفی بر زیستگاه‌ها و تنوع زیستی است. همچنین، این گزارش استراتژی‌های مقابله با این چالش‌ها، از جمله سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی را بررسی کرده است (TAR, 2001).

گزارش چهارم

گزارش چهارم ارزیابی^۵ در سال ۲۰۰۷ منتشر شد. این گزارش تأکید کرد که بیشتر افزایش دمای جهانی از نیمه دوم قرن بیستم، به احتمال بسیار زیاد به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی است. همچنین IPCC اعلام کرد که تغییرات اقلیمی اکنون یک واقعیت انکارناپذیر است و عمده‌تاً نتیجه فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو است که این فعالیت‌ها شامل استفاده از سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی و تغییرات در کاربری زمین است (AR4, 2007).

گزارش پنجم

گزارش پنجم ارزیابی^۶، در سال ۲۰۱۴ منتشر شد. این گزارش چهار سناریو مطرح کرد که با عنوان "مسیر غلظت

انتقادی روبه‌رو شد (SEPP, 1992). علاوه بر این، گزارش ارزیابی اول و نحوه کار IPCC در دو مقاله‌ی (Maddoy, 1992; Anonymous, 1991) در نشریه Nature به‌طور جدی مورد انتقاد قرار گرفتند.

گزارش دوم

در سال ۱۹۹۶ میلادی، دومین گزارش ارزیابی^۱ جهانی تغییر اقلیم منتشر شد. برای سیاست‌گذاران^۲ در این گزارش ذکر شده بود که "شواهد نشان می‌دهد که تأثیر انسان بر تغییرات اقلیمی قابل تشخیص است" (SAR, 1996). این گزارش زمینه‌ساز تصویب پروتکل کیوتو^۳ (KP) در سال ۱۹۹۷ شد. پروتکل کیوتو به‌عنوان نخستین معاهده‌ی بین‌المللی الزام‌آور در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای تدوین شد. این پروتکل کشورهای صنعتی را متعهد ساخت تا در دوره‌ی ۲۰۱۲ - ۲۰۰۸ به‌طور میانگین حدود پنج درصد از سطح انتشار سال ۱۹۹۰ بکاهند. با وجود اهمیت نمادین کیوتو به‌عنوان نقطه‌ی آغاز سیاست‌گذاری جهانی، اجرای آن با چالش‌های متعددی روبه‌رو گردید. عدم عضویت ایالات متحده، خروج برخی کشورها در مراحل بعدی، و نبود سازوکارهای اجرایی مؤثر موجب شد اثر واقعی این معاهده بر روند کلی انتشار جهانی بسیار محدود باشد (IPCC, 2007).

گزارش سوم

گزارش ارزیابی سوم^۴، در سال ۲۰۰۱ میلادی منتشر شد و در آن IPCC با ارائه شواهدی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی از جمله افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات در پوشش زمین و استفاده از سوخت‌های فسیلی

¹ Second Assessment Report (SAR)

² Summary for Policymakers (SPM)

³ Kyoto Protocol (KP)

⁴ Third Assessment Report (TAR)

⁵ Fourth Assessment Report (AR4)

⁶ Fifth Assessment Report (AR5)

گزارش ششم

گزارش ششم ارزیابی^۳ در ۲۰۲۳ منتشر شده است و به افزایش ریسک مخاطرات طبیعی مانند خشک‌سالی و سیلاب که ممکن است در نتیجه تغییرات اقلیمی رخ دهد، اشاره و هشدار داده است (Iranshahi and Ebrahimi, 2022).

این گزارش در سه دوره زمانی نزدیک (۲۰۲۳-۲۰۴۸)، میانی (۲۰۴۹-۲۰۷۴) و دور (۲۰۷۵-۲۱۰۰) مورد بررسی قرار گرفته است (کریمی و همکاران، ۱۴۰۲). طبق گزارش AR6، پیش‌بینی شده است که متوسط دمای جهانی تا سال ۲۱۰۰ میلادی نسبت به سال ۱۹۹۰ به میزان ۱/۸ تا ۴ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. این افزایش دما موجب تغییرات گسترده‌ای در سطح زمین می‌شود به‌گونه‌ای که در شرایط گرمایش جهانی و افزایش دما به میزان ۲ درجه سلسیوس، تغییرات منابع آب منجر به افزایش حدود ۳۰ درصدی نیاز آبیاری خواهد شد. بنابراین، شناخت اثرات تغییر اقلیم بر چرخه هیدرولوژیکی هر منطقه ضرورت بسیار دارد (AR6, 2023). در جدول ۱ خلاصه‌ای از گزارشات منتشر شده ارائه شده است.

گزارش‌های ویژه^۴

IPCC علاوه بر گزارش‌های ارزیابی، ۱۴ گزارش میان‌دوره‌ای (ویژه) نیز منتشر کرده است و در نظر است گزارش دیگری نیز با عنوان «گزارش ویژه تغییرات اقلیمی و شهرها»^۵ در سال ۲۰۲۷ منتشر گردد. در ادامه به بررسی برخی از این گزارش‌ها پرداخته شده است.

معرف^۱ شناخته می‌شوند (RCPs 2.6, 4.5, 6, 8.5) (شکل ۱).

بر اساس این سناریوها، رفتارهای مختلف انسانی و اقدامات گوناگون می‌تواند منجر به افزایش توان تابشی بین ۲/۶ تا ۸/۵ وات بر مترمربع شود که نتیجه آن افزایش دمای زمین به مقادیر متناسب با این سناریوها خواهد بود (IPCC, 2014).

در مراحل اولیه ارزیابی، تقریباً رابطه‌ای خطی بین افزایش دما و توان تابشی وجود دارد که باگذشت زمان ضعیف‌تر می‌شود (Kaufmann et al., 2006). مبنای تصمیمات در گزارش پنجم، توافقنامه تغییر آب‌وهوای پاریس (COP21) قرار گرفت. توافق پاریس در سال ۲۰۱۵ با مشارکت بیش از ۱۹۰ کشور جهان به تصویب رسید و نقطه‌ی عطفی در دیپلماسی اقلیمی محسوب می‌شود. هدف اصلی این توافق، محدود نگه‌داشتن افزایش دمای جهانی در سطح کمتر از ۲ درجه سلسیوس تا پایان قرن و تلاش برای رسیدن به ۱/۵ درجه نسبت به دوره پیشاصنعتی است.

در این توافق همه کشورهای، اعم از توسعه‌یافته و درحال توسعه، موظف به ارائه تعهدات ملی تعیین شده شدند که هر پنج سال یکبار مورد بازنگری قرار می‌گیرند. هرچند توافق پاریس نسبت به کیوتو از جامعیت و انعطاف بیشتری برخوردار است، گزارش‌های اخیر نشان می‌دهند که تعهدات فعلی کشورها برای دستیابی به هدف ۱/۵ درجه کافی نیست و اختلاف نظر بر سر تأمین مالی و انتقال فناوری میان کشورهای توسعه‌یافته و درحال توسعه همچنان وجود دارد (IPCC, 2021; UNEP, 2022).

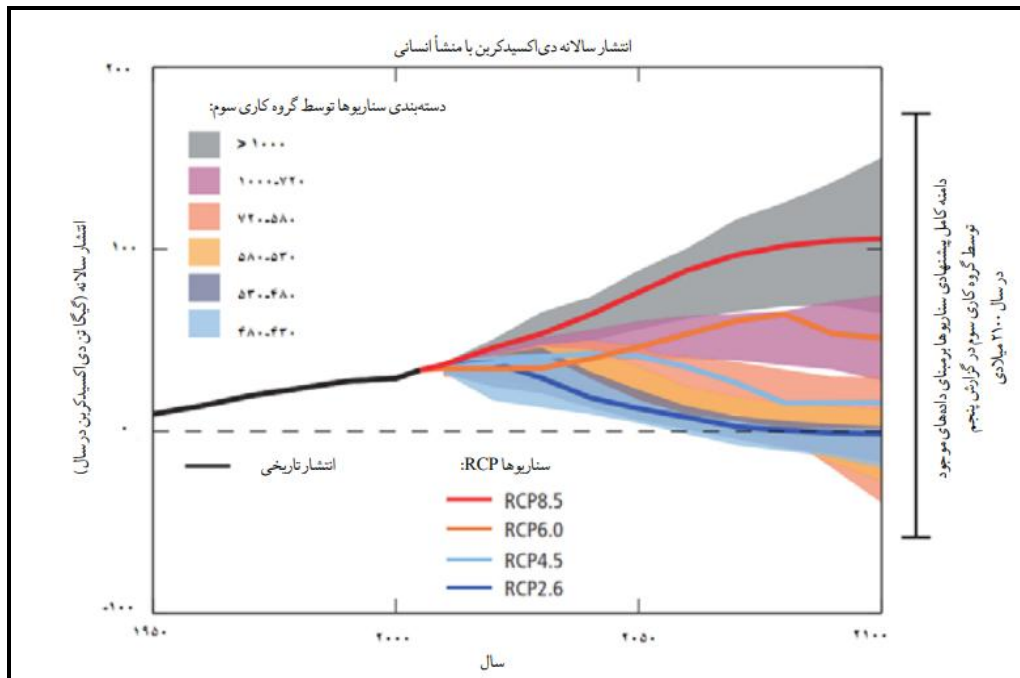
³ Sixth Assessment Report

⁴ Special Reports

⁵ Special Report on Climate Change and Cities

¹ Representative Concentration Pathways (RCPs)

² The twenty-first session of the Conference of the Parties



شکل ۱. انتشار سالانه دی‌اکسید کربن بر مبنای پیش‌بینی سناریوهای چهارگانه گزارش ارزیابی پنجم (خطوط رنگی) و دسته‌بندی سناریوهای مرتبط (طیف رنگی در دامنه ۵ تا ۹۵ درصد) که در مقالات علمی مختلف برای معادل دی‌اکسید کربن بر مبنای Parts per million (ppm) برای سال ۲۱۰۰ ارائه شده است (IPCC, 2014)

Fig 1. The annual CO₂ emissions based on the projected four scenarios of the fifth assessment report (colored lines) and the classification of related scenarios (color spectrum in the 5 to 95 percent range) as presented in various scientific articles for CO₂ equivalent based on parts per million (ppm) for the year 2100 (IPCC, 2014)

جدول ۱. خلاصه‌ای از گزارش‌های ارزیابی IPCC

Table 1. Summary of IPCC assessment reports

عنوان Title	سال انتشار Year of publication	خلاصه نتایج Summary of results
اولین گزارش First report	1990	<ul style="list-style-type: none"> هم‌خوانی تغییرات دمایی مشاهده‌شده با مدل‌های گازهای گلخانه‌ای the correlation between observed temperature and greenhouse gases emission افزایش دما بین ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سلسیوس به دلیل دو برابر شدن گازهای گلخانه‌ای increasing temperature between ۱,۵ to ۴,۵° c due to doubling of greenhouse gases پذیرفته شدن پیمان تغییرات اقلیمی جهانی global climate change treaty accepted
دومین گزارش Second report	1996	<ul style="list-style-type: none"> تصویب پروتکل کیوتو Kyoto protocol approval
سومین گزارش Third report	2001	<ul style="list-style-type: none"> برآورد تغییرات پیش‌بینی‌شده در دما و شرایط آب و هوایی و پیامدهای آن estimation of pre - nasal changes in weather conditions and its consequences پیش‌بینی افزایش سطح دریاهای، تغییرات در الگوهای بارندگی، شدت یافتن پدیده‌های آب‌وهوایی و تأثیرات منفی بر زیستگاه‌ها و تنوع زیستی forecast of the increase in the sea level, changes in the patterns of rainfall , the intensity of weather phenomena , and negative effects on habitat and biological diversity بررسی سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی Investigating the policy of reducing greenhouse gas emissions and climate compatibility strategies with climate change

عنوان Title	سال انتشار Year of publication	خلاصه نتایج Summary of results
چهارمین گزارش Fourth report	2007	<ul style="list-style-type: none"> افزایش دمای جهانی از نیمه دوم قرن بیستم به دلیل افزایش گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی Increasing global temperature from the second half of the twentieth century due to increased greenhouse gases due to human activities تغییرات اقلیمی از جمله جنگل‌زدایی و تغییرات در کاربری زمین در اثر فعالیت‌های انسانی Climate change, including deforestation and changes in land use, on human activities
پنجمین گزارش Fifth report	2014	<ul style="list-style-type: none"> مطرح شدن چهار سناریو معروف به <<مسیر غلظت معرف>> (RCPs) introducing four known scenarios to "representative concentration path" افزایش دما در اثر افزایش توان تابشی بین ۲/۶ تا ۸/۵ وات بر مترمربع increase in temperature due to increasing the radiated power between 2.6 to 8.5 w / m² وجود رابطه خطی بین دما و نیروی تابشی linear relationship between temperature and radiation power قرار گرفتن COP21 به عنوان مبنای تصمیمات inclusion of COP21 as a basis for decisions افزایش حدود یک درجه سلسیوس دمای کره زمین نسبت به دوره پیش از انقلاب صنعتی an increase of about one degree Celsius on earth 's temperature compared to the pre - industrial revolution برنامه‌ریزی جهت نگهداشتن افزایش دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ به کمتر از دو درجه سلسیوس و محدود به ۱/۵ درجه سلسیوس plan to keep the earth 's temperature up to 2100 from 2 degrees Celsius and over 1.5 degrees Celsius
ششمین گزارش Sixth report	2023	<ul style="list-style-type: none"> افزایش ریسک مخاطرات طبیعی همچون خشک‌سالی و سیلاب در نتیجه تغییر اقلیم increasing the risk of natural hazards such as drought and flood as a result of climate change بررسی تغییرات اقلیمی در سه دوره زمانی نزدیک (2023-2048)، میانی (2049-2074) و دور (2075-2100) the study of climate changes in three periods of close to (2023-2048), intermediate (2049-2074) and distant (2075-2100) پیش‌بینی افزایش متوسط دمای جهانی تا سال 2100 میلادی به میزان ۱/۸ تا ۴ درجه سلسیوس و به تبع آن افزایش حدود ۳۰ درصدی نیاز آبیاری the projected average global temperature rise to 2100 was estimated to be 1.8 to 4 degrees Celsius , and consequently an increase of about 30 percent of irrigation requirement

۱/۵ درجه سلسیوس و راه‌های کاهش گازهای گلخانه‌ای تهیه کند. IPCC این وظیفه را بر عهده گرفت و گزارشی را باهدف کمک به مقابله با تغییرات اقلیمی، توسعه پایدار و کاهش فقر آماده کرد. گزارش نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی در حال حاضر بر مردم، طبیعت و زندگی روزمره در سراسر جهان تأثیر می‌گذارد. همچنین تأکید می‌کند که محدود کردن گرمایش به ۱/۵ درجه سلسیوس ممکن است، اما نیازمند تغییرات گسترده در تمام بخش‌های جامعه دارد (SR15, 2018).

گزارش ویژه در مورد گرمایش جهانی ۱/۵ درجه سلسیوس^۱

این گزارش به تأثیرات گرمایش زمین تا ۱/۵ درجه سلسیوس بالاتر از سطح پیش صنعتی و راهکارهای کاهش گازهای گلخانه‌ای می‌پردازد و اولین گزارش ویژه‌ای است که در چرخه ششم گزارش ارزیابی تهیه شده است. در سال ۲۰۱۵، در اجلاس تغییرات اقلیمی پاریس، از IPCC خواسته شد تا گزارشی درباره تأثیرات گرمایش زمین تا

¹ Special Report on Global Warming of 1.5 °C (SR15)

می‌پردازد و تأثیرات و خطرات این تغییرات را ارزیابی می‌کند. همچنین راهکارهای مدیریت ریسک، افزایش مقاومت و اقدامات سازگاری را بررسی کرده و نقاط قوت و محدودیت‌های آن‌ها را نشان می‌دهد (SROCC, 2022). در جدول ۲، به‌طور خلاصه گزارش‌های ویژه مورد بررسی قرار گرفته است.

دیدگاه NIPCC

NIPCC، همان‌طور که از نامش پیداست، یک پنل بین‌المللی از دانشمندان و پژوهشگران است که برای درک علل و پیامدهای تغییر اقلیم گرد هم آمده‌اند. هدف NIPCC این است که داده‌ها و حقایق را به‌طور بی‌طرفانه تحلیل و تفسیر کند، بدون آنکه به هرگونه دستورکار خاصی پایبند باشد.

این ساختار سازمانی و هدف در تضاد با IPCC است که حمایت دولتی دارد و از انگیزه‌های سیاسی پیروی می‌کند. همچنین، IPCC به‌طور پیش‌فرض معتقد است که تغییرات اقلیمی مشکلی است که نیاز به توجه ویژه سازمان ملل دارد (Idso et al, 2014). هنگامی که اشتباهات جدید و نادرستی‌های آشکار در پیش‌نویس‌های اولیه گزارش چهارم ارزیابی مشاهده شد، پروژه علم و سیاست محیط‌زیستی سینگر^۳ برای ارائه یک ارزیابی مستقل از شواهد علمی موجود تیمی را تشکیل داد. سازمان‌دهی اولیه این تیم در جلسه‌ای در میلان در سال ۲۰۰۳ انجام شد و در فوریه ۲۰۰۷ فعال شد.

در سال ۲۰۰۸، SEPP با مؤسسه هارتلند همکاری کرد تا گزارشی به نام "طبیعت، نه فعالیت‌های انسانی، بر اقلیم حاکم است"^۴ منتشر کند (Idso et al, 2014).

گزارش ویژه تغییرات اقلیمی و زمین^۱

در این گزارش به بررسی تغییرات اقلیمی، بیابان‌زایی، تخریب زمین، مدیریت پایدار اراضی، امنیت غذایی و جریان گازهای گلخانه‌ای در اکوسیستم‌های زمینی پرداخته شده و دومین گزارش ویژه‌ای است که در چرخه ششم گزارش ارزیابی تهیه شده است. این گزارش تعاملات متعدد بین تغییرات اقلیمی و زمین را برجسته و همچنین، گزینه‌های حکمرانی و تصمیم‌گیری در مقیاس‌های مختلف را ارزیابی می‌کند (SRRCL, 2019).

گزارش ویژه اقیانوس و یخ‌کره در اقلیم در حال تغییر^۲

این گزارش ویژه سومین گزارش ویژه‌ای است که در چرخه ششم گزارش ارزیابی تهیه شده است. یافته‌های این گزارش، نتایج دو گزارش ویژه قبلی یعنی «گزارش ویژه درباره گرمایش جهانی ۱/۵ درجه سلسیوس» و «گزارش ویژه درباره تغییرات اقلیمی و زمین» را تقویت می‌کند. گزارش به‌طور مشترک توسط گروه‌های کاری اول و دوم IPCC تهیه شده و واحد پشتیبانی فنی گروه دوم رهبری عملیات تولید آن را بر عهده داشته است. تهیه این گزارش بر اساس اصول و رویه‌های IPCC انجام شده است. گزارش SROCC بر اساس AR5 و پژوهش‌های علمی، فنی، اجتماعی و اقتصادی مرتبط منتشر شده در این زمینه، تدوین شده است (SROCC, 2022). افزایش دمای کره زمین تا سال ۲۱۰۰ نسبت به پیش از دوره انقلاب صنعتی، کمتر از دو درجه سلسیوس نگه‌داشته شود و ترجیحاً به ۱/۵ درجه سلسیوس محدود گردد. این گزارش به بررسی تغییرات فعلی و آینده اقیانوس و یخ‌کره

¹ Special Report on Climate Change and Land (SRRCL)

² Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)

³ Singer's Science and Environmental Policy Project (SEPP)

⁴ Nature, Not Human Activity, Rules the Climate

جدول ۲. خلاصه‌ای از گزارش‌های ویژه IPCC
Table 2. Summary of IPCC special reports

خلاصه نتایج Summary of results	سال انتشار Year of publication	عنوان Title
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی عوامل مؤثر بر نیروی تابشی جو و ارزیابی سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای • investigation of effective factors on atmospheric radiative forcing and evaluation of greenhouse gas emission scenarios • تمرکز بر سناریوهای IS92 • focus on IS92 scenarios • ارائه پیش‌بینی‌هایی درباره انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده • provide predictions about future greenhouse gas emissions 	1994	تغییر اقلیمی 1994: نیروی تابشی تغییر اقلیم و ارزیابی سناریوهای انتشار IPCC IS92 Climate change 1994: Radiative forcing of climate change and an evaluation of the IPCC IS92 emission scenarios
<ul style="list-style-type: none"> • ارائه یک چارچوب هفت مرحله‌ای برای ارزیابی تأثیرات و سازگاری با تغییر اقلیم • provide a seven - stage framework for assessing impacts and adaptations to climate change 	1994	راهنمای فنی IPCC برای ارزیابی تأثیرات و سازگاری با تغییر اقلیم IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations
<ul style="list-style-type: none"> • تحلیل تأثیرات تغییر اقلیم بر مناطق مختلف جهان و شناسایی آسیب‌پذیری‌های هر منطقه • analysis of impacts of climate change on different regions of the world and identify vulnerabilities in each region • بررسی چالش‌ها و تهدیدهای ناشی از تغییر اقلیم در زمینه‌های مختلف • reviewing the challenges and threats caused by climate change in different fields • ارائه راهکارهایی به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان برای کاهش آسیب‌ها • provide solutions to policy makers and planners to reduce the damage. 	1997	تأثیرات منطقه‌ای تغییر اقلیم: ارزیابی آسیب‌پذیری The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی تأثیرات صنعت هوانوردی بر جو زمین و تغییر اقلیم • impacts assessment of aviation industry on climate change and climate change • استفاده از راهکارهای فناورانه و سیاست‌های محیط‌زیستی برای کاهش اثرات منفی صنعت هوانوردی • use of technological solutions and environmental policies to reduce the negative effects of aviation industry • نیاز به همکاری جهانی و تلاش‌های مستمر در توسعه فناوری‌های پایدار و پاک برای کاهش تأثیرات هوانوردی • the need for global warming and continual efforts to develop sustainable and clean technologies to reduce the effects of aviation 	1999	هوانوردی و جو جهانی Aviation and the global atmosphere
<ul style="list-style-type: none"> • شبیه‌سازی‌های مختلف از مسیرهای انتشار گازهای گلخانه‌ای و تأثیر آن‌ها بر دما، بارش‌ها و سایر ویژگی‌های اقلیمی بر اساس تغییرات احتمالی در رشد اقتصادی، جمعیت، سیاست‌های محیط‌زیستی و فناوری‌های جدید • various simulations of greenhouse gas emission paths and their impact on temperature, precipitation, and other climatic characteristics on the basis of possible changes in economic growth, population, environmental policies and new technologies • پیشنهاد پنج سناریو برای میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در آینده • proposing five scenarios for future greenhouse gas emissions • تأثیرات جدی و منفی تغییر اقلیم بر روی زمین در صورت ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای به سطوح بالا • serious and negative impacts of climate change on the ground if greenhouse gas emissions continue 	2000	سناریوهای انتشار Emissions scenarios

<ul style="list-style-type: none"> • بررسی چالش‌ها و مسائل مختلف مرتبط با انتقال فناوری در زمینه مقابله با تغییر اقلیم • review the various challenges and issues related to the transition in the field of combating climate change • تحلیل مسائل فناورانه و روش‌شناختی در فرآیند انتقال فناوری • analysis of technological and methodological issues in the technology transfer process • نیازمند بودن به همکاری بین‌المللی، سرمایه‌گذاری در آموزش و زیرساخت‌ها، و توسعه مدل‌های مالی پایدار برای انتقال فناوری • need to be international, investment in education and infrastructure, and develop sustainable financial models for transport 	2000	<p>مسائل روش‌شناختی و فناوری در انتقال فناوری</p> <p>Methodological and technological issues in technology transfer</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی تأثیرات تغییر در کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای • impacts assessment of changes in land use and vegetation on greenhouse gas emissions • کاهش گازهای گلخانه‌ای و مقابله با تغییرات اقلیمی در اثر حفاظت و احیای جنگل‌ها، کشاورزی پایدار و مدیریت بهینه اراضی • reduction of greenhouse gases and coping with climate change in forest conservation and conservation, sustainable agriculture and land management 	2000	<p>کاربری اراضی، تغییر کاربری اراضی، و جنگل‌داری</p> <p>Land use, land-use change, and forestry</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی فناوری‌های مربوط به جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن • review of carbon dioxide capture and storage technologies • اهمیت جذب و ذخیره‌سازی دی‌اکسید کربن برای صنایع و بخش‌هایی که به شدت از سوخت‌های فسیلی استفاده می‌کنند، در کاهش گازهای گلخانه‌ای و کمک به مقابله با تغییر اقلیم • the importance of carbon dioxide absorption and storage for industries and sectors that greatly use fossil fuels, in reducing greenhouse gases and helping to cope with climate change 	2005	<p>جذب و ذخیره دی‌اکسید کربن</p> <p>Carbon dioxide capture and storage</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی ارتباط میان لایه اوزون و تغییرات اقلیمی و اقداماتی که برای حفاظت از این لایه انجام شده • review the relationship between ozone layer and climate change and measures to protect this layer • تأکید بر تعاملات میان پدیده‌های تغییر اقلیم و آسیب‌های وارده به لایه اوزون • emphasis on interactions between climate change phenomena and damage to ozone layer • تأثیرات مثبت حفظ لایه اوزون در کاهش تغییرات اقلیمی • positive effects of ozone depletion in reducing climate change 	2005	<p>حفاظت از لایه اوزون و سیستم جهانی اقلیم</p> <p>Safeguarding the ozone layer and the global climate system</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی نقش منابع انرژی تجدید پذیر در کاهش تغییرات اقلیمی و مقابله با اثرات منفی گرمایش جهانی • review the role of renewable energy sources in mitigating climate change and coping with negative effects of global warming • استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یک راهکار اساسی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی • use of renewable energy as a fundamental solution to reduce greenhouse gas emissions and reduce dependence on fossil fuels 	2011	<p>منابع انرژی تجدید پذیر و کاهش تغییرات اقلیمی</p> <p>Renewable energy sources and climate change mitigation</p>

<ul style="list-style-type: none"> • بررسی خطرات و ریسک‌های مربوط به پدیده‌های اقلیمی و بلایای طبیعی مانند سیلاب‌ها، طوفان‌ها، خشکسالی‌ها و آتش‌سوزی‌های جنگلی و چگونگی مدیریت این ریسک‌ها • review the risks and risks associated with climate and natural disasters such as floods, hurricanes, droughts and wildfires, and how to manage these risks • شناسایی راهکارهایی برای کاهش آسیب‌های ناشی از پدیده‌های اقلیمی و تقویت توانمندی برای سازگاری بهتر با تغییرات اقلیمی از جمله تقویت زیرساخت‌های مقاوم، تقویت سیستم‌های پیش‌بینی و توسعه ظرفیت‌های محلی • identify strategies to reduce the damages caused by climate phenomena and strengthen the capability to better adapt to climate change including strengthening of resistant infrastructure, strengthening forecasting systems and developing local capacities. 	2012	<p>مدیریت خطرات حوادث و بلایای طبیعی برای پیشبرد سازگاری با تغییرات اقلیمی</p> <p>Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation</p>
<ul style="list-style-type: none"> • مقابله با تغییرات اقلیمی، توسعه پایدار و کاهش فقر • coping with climate change, sustainable development and poverty alleviation • تأثیرگذاری تغییرات اقلیمی بر مردم، طبیعت و زندگی روزمره • the impact of climate change on people, nature and everyday life • ممکن بودن محدود کردن گرمایش به ۱/۵ درجه سلسیوس • it is possible to limit heating to 1.5 ° degrees Celsius 	2018	<p>گرمایش جهانی 1.5 درجه سلسیوس</p> <p>Global warming of 1.5°C</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی تغییرات اقلیمی، بیابان‌زایی، تخریب زمین، مدیریت پایدار اراضی، امنیت غذایی و جریان گازهای گلخانه‌ای در اکوسیستم‌های زمینی • review of climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas flow in terrestrial ecosystems • برجسته کردن تعاملات متعدد بین تغییرات اقلیمی و زمین • highlighting multiple interactions between climate change and land 	2019	<p>تغییرات اقلیمی و زمین</p> <p>Climate change and land</p>
<ul style="list-style-type: none"> • بررسی تغییرات فعلی و آینده اقیانوس و یخ کره • Check out the current and future changes of the ocean and ice sphere • بررسی راهکارهای مدیریت ریسک، افزایش مقاومت و اقدامات سازگاری • reviewing risk management strategies, enhancing resistance and adaptation measures 	2019	<p>اقیانوس و یخ‌کره در حال تغییر</p> <p>The ocean and cryosphere in a changing climate</p>

تحلیل‌های متعددی است، به‌شدت بر لزوم تحلیل دقیق‌تر و بدون پیش‌داوری از تغییرات اقلیمی تأکید شده است (Idso et al, 2014).

در سال ۲۰۱۰، وب‌سایتی با آدرس www.nipccreport.org ایجاد شد تا مطالعاتی که NIPCC معتقد بود، احتمالاً توسط IPCC در هنگام تهیه گزارش ارزیابی بعدی نادیده گرفته یا کم‌اهمیت شمرده می‌شود، معرفی نماید. در سال ۲۰۱۱، سه سازمان حامی این پروژه گزارش "بازنگری تغییر اقلیم: گزارش موقت

هدف این گزارش بررسی و برجسته کردن کاستی‌ها و تعصبات موجود در گزارش‌های IPCC و خلاصه‌ای از تحقیقات برای سیاست‌گذاران بود که به‌طور گسترده منتشر و به شش زبان ترجمه شد (Singer, 2008). در سال ۲۰۰۹، مرکز مطالعه دی‌اکسید کربن و تغییرات جهانی به دو حامی اصلی یعنی SEPP و مؤسسه هارتلند پیوست و گزارشی به نام "بازنگری تغییر اقلیم: گزارش NIPCC ۲۰۰۹"^۱ منتشر کردند که اولین گزارش جامع NIPCC بود. در این گزارش که شامل تحقیقات و

¹ Climate Change Reconsidered: The 2009 Report of the NIPCC

اجماع علمی^۷ نوشتند. این کتاب نشان می‌دهد که هیچ نظرسنجی یا تحقیق "اجماعی" بر روی مهم‌ترین مسائل علمی در بحث تغییر اقلیم انجام نشده است و بیشتر دانشمندان از ادعاهای IPCC حمایت نمی‌کنند (Idso, Carter and Singer, 2015).

در اکتبر ۲۰۱۸، NIPCC خلاصه‌ای برای سیاست‌گذاران از آخرین جلد مجموعه "بازنگری تغییر اقلیم: سوخت‌های فسیلی"^۸ منتشر کرد. این جلد گزارش، هزینه‌ها و منافع استفاده از سوخت‌های فسیلی را با تمرکز ویژه بر نگرانی‌های مرتبط با تغییر اقلیم ارزیابی می‌کند (Bezdek et al, 2018). در جدول ۳ مطالب منتشر شده NIPCC به صورت خلاصه بررسی شده است.

در بررسی دقیق‌تر روش‌شناسی و نحوه ارزیابی داده‌ها توسط IPCC و NIPCC، مشخص می‌شود که IPCC با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی پیچیده، شبیه‌سازی‌های بلندمدت و اجماع گسترده علمی، داده‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی را تحلیل می‌کند و بر مبنای داده‌های میانگین‌گیری شده و تلفیق شده از پژوهش‌های متعدد جهانی، نتایجی با درجه اطمینان بالا ارائه می‌دهد (IPCC, 2014).

از جمله مدل‌های اقلیمی که IPCC استفاده می‌کند می‌توان به مدل‌های جهانی سامانه اقلیمی^۹ مانند مدل‌های CMIP5 و CMIP6 اشاره کرد که برای شبیه‌سازی تعاملات پیچیده اتمسفر، اقیانوس‌ها، یخ‌ها و زمین طراحی شده‌اند.

2011 NIPCC^۱ را منتشر کردند. این گزارش شامل بررسی و تحلیل تحقیقات جدیدی بود که از زمان انتشار گزارش ۲۰۰۹ منتشر شده بود یا توسط نویسندگان آن گزارش نادیده گرفته شده بود (Idso, Carter and Singer, 2011).

در سال ۲۰۱۳، مرکز اطلاعات مطالعات تغییرات جهانی آکادمی علوم چین، نسخه‌ای مختصر از گزارش‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ NIPCC منتشر کرد. همچنین در ۱۵ ژوئن، آکادمی علوم چین کارگاهی در پکن برگزار کرد تا نویسندگان اصلی NIPCC خلاصه‌ای از نتایج خود را ارائه دهند. در سپتامبر ۲۰۱۳ نیز، NIPCC گزارش "بازنگری تغییر اقلیم: علم فیزیک"^۲ را منتشر کرد که اولین جلد از سه جلد بود و گزارش اولیه ۲۰۰۹ را گسترش داده و به‌روز کرد. همچنین این گزارش نقطه‌نظری مخالف با گزارش پنجم IPCC را ارائه داد (Idso et al, 2014).

در سال ۲۰۱۴، جلد دوم گزارش با عنوان "بازنگری تغییرات اقلیمی: اثرات زیستی"^۳ منتشر شد. این جلد بیش از ۱۰۰۰ صفحه بررسی تحقیقات علمی ارائه داد که نشان می‌دهد اثرات گرمایش جهانی ناشی از فعالیت‌های انسانی، بی‌ضرر و حتی مفید برای انسان و دنیای طبیعی است.

در نوامبر ۲۰۱۵، سه نویسنده اصلی NIPCC ایدسو^۴، کارتر^۵ و سینگر^۶ کتابی را با عنوان "چرا دانشمندان درباره گرمایش جهانی اختلاف نظر دارند: گزارش NIPCC درباره

¹ Climate Change Reconsidered: The 2011 Interim Report of the NIPCC

² Climate Change Reconsidered II: Physical Science

³ Climate Change Reconsidered II: subtitled Biological Impacts

⁴ Idso

⁵ Carter

⁶ Singer

⁷ Why Scientists Disagree About Global Warming: The NIPCC Report on Scientific Consensus

⁸ Climate Change Reconsidered II: Fossil Fuels

⁹ Global Climate Models (GCMs)

جدول ۳. گزارش‌های NIPCC
Table 3. NIPCC Reports

خلاصه نتایج Summary of results	سال انتشار Year of publication	عنوان Title
<ul style="list-style-type: none"> نداشتن تأثیر چندان افزایش دی‌اکسید کربن ناشی از فعالیت‌های انسانی بر دمای زمین • lack of much impact of CO_2 on earth temperature نقش اصلی بودن عوامل طبیعی، مانند تغییرات خورشیدی و فرآیندهای اقیانوسی در تغییر اقلیم • the role of natural factors, such as solar changes and ocean processes in climate change تأثیر بیشتر تغییرات تابش خورشیدی بر تغییر اقلیم تا انتشار گازهای گلخانه‌ای • more influence of solar radiation on climate change to greenhouse gas emissions نداشتن دقت کافی مدل‌های IPCC و تخمین بیش از حد گرمایش جهانی • lack of sufficient accuracy of the IPCC and global warming estimate عدم وجود اجماع علمی گزارش‌های IPCC • lack of scientific consensus of IPCC reports 	2008	<p>طبیعت، نه فعالیت‌های انسانی، بر اقلیم حاکم است</p> <p>Nature, not human activity, rules the climate</p>
<ul style="list-style-type: none"> کمتر بودن ارتباط بین افزایش دی‌اکسید کربن و گرمایش جهانی از آن چیزی که IPCC مطرح کرده • Less than the relationship between increased carbon dioxide and global warming of what the IPCC has raised وجود عدم قطعیت در مدل‌های IPCC • uncertainty in the IPCC models تحلیل دقیق‌تر و بدون پیش‌داوری از تغییرات اقلیمی • more accurate and unbiased analysis of climate change 	2009	<p>بازنگری تغییر اقلیم: گزارش NIPCC 2009 climate change reconsidered: the 2009 report of the NIPCC</p>
<ul style="list-style-type: none"> برآورد بیش از حد میزان گرمایشی در طول قرن بیستم توسط مدل‌های IPCC • estimation of the amount of heat during the 20th century by the IPCC models در نظر نگرفتن فرآیندهای شیمیایی و زیستی مدل‌ها • not considering the chemical and biological processes of the models تأثیر پوشش گیاهی روی اقلیم و کمک به کاهش گرمای ناشی از دی‌اکسید کربن • impact of vegetation cover on climate and help reduce CO_2 emissions نقش مهم افزایش دما و غلظت دی‌اکسید کربن در جو، با بالا بردن میزان تولید محصولات کشاورزی در جلوگیری از تخریب محیط‌زیستی • the important role of increasing the temperature and concentration of carbon dioxide in the atmosphere by raising the amount of agricultural produce to prevent environmental degradation 	2011	<p>بازنگری تغییر اقلیم: گزارش موقت NIPCC 2011 climate change reconsidered: The 2011 interim report of the NIPCC</p>
<ul style="list-style-type: none"> نقش کم‌تر انسان در تغییر اقلیم • less human role in climate change برآورد بیش از حد میزان گرمایشی در مدل‌های اقلیمی IPCC • estimating excessive warming in the IPCC climate models نبود شواهد کافی برای فعالیت‌های انسانی به‌عنوان دلیل اصلی گرمایش جهانی • lack of sufficient evidence for human activities as a major cause of global warming 	2013	<p>بازنگری تغییر اقلیم: علم فیزیک Climate change reconsidered: physical science</p>
<ul style="list-style-type: none"> دی‌اکسید کربن یک آلاینده نیست • carbon dioxide is not a contaminant "سبز شدن" زمین در نتیجه افزایش دی‌اکسید کربن • "Greening" of the earth as a result of increased CO_2 emissions نبودن خطر نامنی غذایی ناشی از گرمایش جهانی • lack of risk of food insecurity caused by global warming رشد جهانی اکوسیستم‌های زمینی در نتیجه گرم شدن دما و افزایش دی‌اکسید کربن جو 	2014	<p>بازنگری تغییرات اقلیمی: با عنوان اثرات زیستی Climate change reconsidered: subtitled biological impacts</p>

عنوان Title	سال انتشار Year of publication	خلاصه نتایج Summary of results
		<ul style="list-style-type: none"> • growth of global ecosystems as a result of temperature warming and increased co₂ in the atmosphere • خطر نداشتن افزایش دما و دی‌اکسید کربن اتمسفر برای آبزیان • No risk of increasing temperature and atmospheric co₂ emissions for aquatic organisms • کاهش مرگ‌ومیر در اثر گرمایش جهانی • reduce mortality from global warming
		<ul style="list-style-type: none"> • نبود اجماع علمی قطعی در مورد تغییرات اقلیمی و عوامل انسانی مؤثر بر آن • lack of definitive scientific consensus on climate change and human factors affecting it • IPCC بیشتر یک نهاد سیاسی است تا یک سازمان علمی و قرار گرفتن یافته‌ها تحت تأثیر سیاست‌های جهانی • IPCC is more political than a scientific organization and the inclusion of findings under the influence of global policies • سیاست‌های بین‌المللی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، مانند توافقنامه پاریس، هزینه‌بر بوده و تأثیرات مثبتی بر اقلیم نداشته • international policies to reduce greenhouse gas emissions, such as the Paris agreement, are costly and have no positive effects on climate • ارائه دیدگاهی متفاوت نسبت به جریان غالب علمی در مورد تغییرات اقلیمی • provide a different view to the dominant scientific flow of climate change • بررسی داده‌های علمی کمتر دیده‌شده در گزارش‌های رسمی • checking the scientific data of the observed data observed in official reports
چرا دانشمندان درباره گرمایش جهانی اختلاف نظر دارند: گزارش NIPCC درباره اجماع علمی Why scientists disagree about global warming: The NIPCC report on scientific consensus	2015	
		<ul style="list-style-type: none"> • ضروری بودن سوخت‌های فسیلی برای رشد اقتصادی و رفاه انسانی • essential fossil fuels needed for economic growth and human wellbeing • اغراق‌آمیز بودن تأثیرات منفی محیط‌زیستی و اقلیمی سوخت‌های فسیلی در گزارش‌های IPCC • The exaggeration of negative environmental and ecological impacts of fossil fuels in IPCC reports • سیاست‌های اقلیمی جهانی به‌ویژه برای کشورهای در حال توسعه ممکن است به اقتصاد آسیب بزنند • global climate policies, especially for developing countries, might harm the economy
بازنگری تغییر اقلیم: سوخت‌های فسیلی Climate change reconsidered II: Fossil fuels	2018	

اقلیمی اتکا دارد یا در مواردی مدل‌های ساده‌تر و تحلیل‌های منطقه‌ای مانند مدل‌های مقیاس کوچک‌تر را ترجیح می‌دهد.

این اختلاف در رویکرد، موجب می‌شود که IPCC به‌عنوان مرجع تصمیم‌سازی جهانی شناخته شود، در حالی که NIPCC بیشتر نقش چالشگر را ایفا می‌کند و تأکیدش بر تنوع دیدگاه‌ها و کاهش سوگیری‌های سیاسی در تحلیل‌هاست.

در مقابل، NIPCC با تکیه بر بازنگری نقادانه داده‌ها و تأکید بر نقش داده‌های مغفول یا کمتر دیده‌شده، به تحلیل‌های تفکیکی و مبتنی بر مطالعات مستقل علاقه‌مند است و غالباً به‌جای پذیرش اجماع، به‌دنبال شناسایی تناقضات، خطاهای مدل‌سازی و تفاوت‌های منطقه‌ای و زمانی است (Idso et al., 2014; Singer et al., 2008).

NIPCC معمولاً از داده‌های مشاهداتی و مطالعات آماری مستقل بهره می‌گیرد و کمتر به مدل‌های پیچیده

نتایج و بحث

مسئله تغییر اقلیم و گرمایش جهانی یکی از چالش‌برانگیزترین مباحث علمی و سیاسی عصر حاضر به‌شمار می‌رود. دیدگاه غالب که از سوی IPCC مطرح شده، بر نقش پررنگ فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای، در ایجاد تغییرات اقلیمی تأکید دارد. این نهاد با استناد به داده‌های آماری و مدل‌های پیشرفته اقلیمی، افزایش غلظت گازهایی چون دی‌اکسید کربن را عامل اصلی گرمایش جهانی معرفی کرده و بر لزوم اقدام فوری جهانی برای کاهش این گازها تأکید دارد. با این حال، دیدگاه مزبور همچنان محل بحث و تردید برخی از محققان است که معتقدند بخشی از تغییرات اقلیمی ممکن است ناشی از چرخه‌های طبیعی زمین باشد.

در دهه‌های اخیر، IPCC و نهادهای مشابه با ارائه گزارش‌های ارزیابی دوره‌ای تلاش کرده‌اند تا روند تغییرات اقلیم را مستند و تحلیل کنند و توصیه‌هایی برای سیاست‌گذاری‌های محیط‌زیستی ارائه دهند. با این حال، گروه‌هایی نظیر NIPCC رویکردهای IPCC را مورد انتقاد قرار داده‌اند و آن را به سوگیری علمی، بهره‌برداری سیاسی و حتی دست‌کاری داده‌های اقلیمی متهم کرده‌اند. در این میان، یکی از مهم‌ترین محورهای اختلاف‌نظر، نقش دی‌اکسید کربن در گرمایش جهانی است. در حالی که IPCC این گاز را عامل اصلی می‌داند، برخی پژوهشگران تأکید می‌کنند که گازهایی مانند متان یا حتی تغییرات خورشیدی ممکن است تأثیرات بیشتری بر اقلیم داشته باشند. این اختلافات، به‌ویژه در حوزه سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی انرژی و محیط‌زیست از اهمیت فراوانی برخوردار است، چرا که پذیرش هر یک از این دیدگاه‌ها می‌تواند به نتایج اقتصادی و ژئوپلتیک متفاوتی منجر شود. علاوه بر این، شواهد تاریخی متعددی از دوره‌های گرمایش و سرمایش زمین در گذشته حکایت دارند که در

نبود فعالیت‌های انسانی رخ داده‌اند. این شواهد باعث شده‌اند که نظریه‌های جایگزین، مبتنی بر عوامل طبیعی نظیر تغییرات در تابش خورشیدی یا جریان‌های اقیانوسی، در برخی محافل علمی مطرح شوند. اگرچه این دیدگاه‌ها کمتر در رسانه‌های رسمی بازتاب می‌یابند، اما همچنان بخشی از گفتمان علمی پیرامون منشأ تغییر اقلیم محسوب می‌شوند.

در این میان، یکی از ابعاد مهم اما کمتر مورد توجه در بحث‌های اقلیمی، تفاوت‌های منطقه‌ای و جغرافیایی در میزان آسیب‌پذیری و توان سازگاری کشورها در برابر تغییر اقلیم است. برای نمونه، در ایران و منطقه خاورمیانه افزایش دما و کاهش بارش موجب تشدید خشک‌سالی، افت منابع آب زیرزمینی و کاهش توان کشاورزی شده است (Babaecian et al., 2019). در مقابل، در هلند و بخش‌هایی از اروپای شمالی، بالا آمدن سطح دریا مهم‌ترین چالش بوده و دولت‌ها ناچار به سرمایه‌گذاری‌های سنگین در مدیریت سیلاب و احداث سازه‌های حفاظتی شده‌اند (IPCC, 2019). همچنین در بسیاری از کشورهای آفریقایی، کاهش بارش‌های فصلی و افت تولید کشاورزی امنیت غذایی میلیون‌ها نفر را تهدید کرده است (FAO, 2020). این نمونه‌ها نشان می‌دهد که کشورهای درحال توسعه بیشتر با تهدیدهای مستقیم تغییر اقلیم مانند ناامنی غذایی و بحران آب مواجه هستند، در حالی که کشورهای توسعه‌یافته عمدتاً با هزینه‌های اقتصادی و زیرساختی ناشی از این پدیده روبه‌رو می‌شوند.

گزارش ویژه IPCC در سال ۱۹۹۷ درباره تأثیرات منطقه‌ای تغییر اقلیم، آسیب‌پذیری مناطق مختلف جهان را تحلیل کرده و نشان داده است که برای مثال کشورهای جزیره‌ای کوچک مانند مالدیو، فیجی یا تووالو با خطر مستقیم بالا آمدن سطح دریاها روبه‌رو هستند، در حالی که مناطقی مانند شمال آفریقا، خاورمیانه (از جمله ایران)

عدم استفاده از داده‌های بومی و مدل‌های شبیه‌سازی محلی دارد به‌صورت کلی به بررسی موضوع تغییر اقلیم پرداخته است. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی از داده‌های محلی و مدل‌سازی‌های دقیق‌تر استفاده شود تا بتوان به درک کامل‌تر و ارائه راهکارهای جامع‌تر برای کاهش اثرات تغییر اقلیم در هر منطقه دست یافت.

منابع

- Babaeian, I., Karimian, M., Modirian, R. & Mirzaei, E. (2019). Future Climate Change Projection Over Iran Using CMIP5 Data During 2020-2100. *The Scientific & Technical Journal of Nivar*, 43(104-105), 67-77. <https://doi.org/10.30467/nivar.2019.142745.1103>. [In Persian]
- Bezdek, R., Idso, C.D., Legates, D., & Singer, S.F. (Eds.) (2019). *Climate Change Reconsidered II: Fossil Fuels*. Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC). The Heartland Institute.
- Farzaneh, M., & Banimostafaarab, F. (2023). Analysis of climate change adaptation laws in developed countries. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 49-70. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6024.1009> [In Persian]
- Farzaneh, M. R., Fakhri, M., Fazeli Farsani, I., Najafi Biragani, M., & Abdolhosseini, M. (2024). A biophysical approach to assess the risks associated with climate change for spatial analysis of agricultural drought vulnerability. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 2(2), 27-56. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6479.1027>
- Idso, C., & Singer, S. F. (2009). *Climate change reconsidered: 2009 report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC)*. The Heartland Institute.
- Idso, C. D., Carter, R. M., & Singer, S. F. (Eds.). (2013). *Climate change reconsidered II: Physical science*. The Heartland Institute
- Idso, C. D., Idso, S. B., Carter, R. M., & Singer, S. F. (Eds.). (2014). *Climate change reconsidered II: Biological impacts*. The Heartland Institute.
- Idso, C. D., Idso, S. B., Carter, R. M., & Singer, S. F. (2014). *Climate change reconsidered II: Biological impacts. Summary for policymakers*. The Heartland Institute.
- Idso, C. D., Carter, R. M., & Singer, S. F. (2015). *Why scientists disagree about global warming*. Nongovernmental International Panel on Climate Change (NIPCC).

و آسیای مرکزی با تشدید خشک‌سالی، بیابان‌زایی و بحران منابع آب مواجه‌اند (Babaeian et al., 1997; IPCC, 2019). در عین حال، برخی نواحی قطبی و عرض‌های بالاتر مانند کشورهای اسکاندیناوی ممکن است در کوتاه‌مدت از مزایایی چون افزایش فصل رشد محصولات کشاورزی بهره‌مند شوند. این تفاوت‌های منطقه‌ای بیانگر آن است که سیاست‌گذاری اقلیمی باید متناسب با موقعیت جغرافیایی هر کشور و منطقه طراحی شود، و اتخاذ رویکردهای یکسان برای همه کشورها می‌تواند منجر به نابرابری یا ناکارآمدی در مقابله با تغییر اقلیم گردد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، مشخص شد که دیدگاه‌های ارائه‌شده توسط IPCC و NIPCC هر دو بر اساس داده‌های علمی شکل گرفته‌اند، اما اهداف و رویکردهای تحلیلی متفاوتی را دنبال می‌کنند. IPCC، به‌عنوان مرجع رسمی جهانی، بر پایه اجماع علمی، به هشدار و ارائه راهکارهای سیاست‌گذارانه برای کاهش اثرات انسانی تأکید دارد، در حالی که NIPCC با رویکردی انتقادی و تمرکز بر فرضیه‌های جایگزین، به برجسته‌سازی کاستی‌های مدل‌های اقلیمی و اثرگذاری عوامل طبیعی توجه می‌کند. این اختلافات تحلیلی، درک بهتری از نقاط قوت و محدودیت‌های هر نهاد به سیاست‌گذاران و محققان ارائه می‌دهد.

در نهایت، باید پذیرفت که تغییر اقلیم یک واقعیت انکارناپذیر است، اما درباره علت‌های دقیق آن همچنان ابهامات و اختلاف‌نظرهایی وجود دارد. از این‌رو، پذیرش یک دیدگاه بدون بررسی کامل و بی‌طرفانه شواهد علمی ممکن است به سیاست‌هایی منجر شود که نه تنها به حل مسئله کمک نمی‌کنند، بلکه چالش‌های جدیدی را نیز ایجاد خواهند کرد. این پژوهش محدودیت‌هایی از جمله

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2001). *Climate change 2001: Synthesis report*. Cambridge University Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Synthesis report*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Summary for policymakers*. In *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Draft version dated October 28, 2013.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Annex II: Glossary. In *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC, Geneva, Switzerland, 117–130.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. In Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). *IPCC special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. In Press.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Summary for policymakers*. Cambridge University Press. In Press.
- Jafari, M. (2018). Development, ethics, and climate change. *Journal of Iran Nature*, 3(4), 6–12. <https://doi.org/10.22092/irn.2018.117215> [In Persian]
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (2018). *Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways*. In Press.
- National Meteorological Organization. (2017). *Revealing and assessing the impacts and prospects of climate change in Iran during the 21st century*. <https://www.irimo.ir> [In Persian]
- National Center for Strategic Studies in Agriculture and Water. (2023). *Translation of the synthesis report of the sixth IPCC assessment report*. <https://awnrc.com/publishers-research-products> [In Persian]
- Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., & Zhai, P. (2019). *Special report on the ocean and cryosphere in a changing climate*. Cambridge University Press.
- Ramezani Etedali, H., & Koohi, S. (2025). Investigating the impact of climate change on aridity in Iran with a population exposure approach. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 3(1), 17–38. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079> [In Persian]
- Singer, S. F., Idso, C. D., & others. (2008). *Nature, not human activity, rules the climate: Summary for policymakers of the report of the Nongovernmental International Panel on Climate Change*. The Heartland Institute.
- Shukla, P. R., et al. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In Press.



Scientific Journal
Journal of Drought and Climate change Research

Volume 3, Special Issue, Winter 2025.

Online ISSN: 2980-9819

Print ISSN:3092-6076

license number of the Ministry of Culture and Islamic Guidance: 92041



Editor-in-Chief: Dr. Abolfazl Akbarpour

Director-in-Charge: Dr. Mostafa Yaghoobzadeh

English Text Editor: Dr. Sepideh Zeraati Neyshabouri

Publisher: University of Birjand-Research Group of Drought and Climate Change and Iranian water resources association (IR-WRA)

Manager: Dr. Farhad Azarmi-Atajan

Assistant Editor: Dr. Fatemeh Poursalehi

Executive Director: Saeide Hoseinabadi

Page layout: Dr. Sepideh Zeraati Neyshabouri

International Editorial Board:

Dr. Sangam Shrestha, Professor, Water Engineering and Management, Asian Institute of Technology.

Dr. Karim Abbaspour, 2w2e Environmental Consulting GmbH, Duebendorf, Switzerland.

Editorial Board:

Dr. Kumars Ebrahimi, Professor, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran.

Dr. Saeid Eslamian, Professor of Water Engineering, Dept., Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

Dr. Abolfazl Akbarpour, Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

Dr. Morteza Esmailnejad, Department of Geography, University of Birjand, Birjand, Iran.

Dr. Omid Bozorg-Haddad, professor Water Engineering Group, University of Tehran. Tehran, Iran.

Dr. Bahram Saghafian, Professor, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Dr. Ali Shahnazari, Professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

Dr. Ali Shahidi, Professor of Irrigation and Drainage, University of Birjand, Birjand, Iran.

Dr. Mohammad Hossein Sayadi, professor, Environmental Sciences Department, Shahid Bahonar University of Kerman.

Dr. Reza Kerachian, Professor, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Dr. Saeed Morid, Professor. Department of Water Engineering. Modares University Tehran. Iran.

Dr. Ali Reza Massah Bavani, Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

Dr. S. Aboalfazl Masoodian, Professor, Department of Natural Geography-University of Isfahan.

Dr. Seyed Mohammad Jafar Nazemosadat, Professor of Department of Water Engineering . Director of Oceanic and Atmospheric Research Center. Shiraz University, Shiraz, Iran.

Dr. Mostafa Yaghoobzadeh, Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

International Advisory Board:

Dr. Mojtaba Sadegh, Department of Civil Engineering, Boise State University Senior Fellow, United Nations University Institute for Water, Environment and Health.



Address: Iran-South Khorasan - Birjand - 5th km of Kerman road - Agricultural Science and Natural Resources Campus, University of Birjand, Birjand, Iran

Tel: +98 56 31027609

Email: jdcr@birjand.ac.ir

Web: <https://jdcr.birjand.ac.ir/>

Journal of Drought and Climate change Research

JDCR

Winter 2025, Vol. 3, Special Issue



- Investigating The Effects of Climate Change and Dust Storms on The Health and Sustainability of The Zagros Forest Ecosystem** 1
Majid Pato, Sohrab Moradi, Jalal Henareh
- Evaluation of Climate Models for Simulation of Temperature and Precipitation: Selection of the Best AR6 Model Using Multi-Criteria Decision-Making and Performance Metrics** 17
Negin Nabatghods, Parisa-Sadat Ashofteh
- Using Machine Learning to Improve Precipitation Estimation by ERA5 Data at Meteorological Stations in West Azerbaijan Province** 37
Moslem Mohammadi
- Response of Iranian Cloud Cover to Teleconnection Variability: A Study of 136 Synoptic Stations** 57
Alireza Saadatmoghadas, Zahra Aghashariatmadari
- Modeling the Effect of Temperature Increase on Maize Yield Components** 79
Fateme Safari, Hadi Ramezani Etedali, Abbas Kaviani, Leila Khosravi
- Application Of Integrated Drought Index In Multivariate Analysis Based On Vine-Copula** 95
Fateme Teimouri, Ommolbanin Bazrafshan, Hamid Gholami, Marzieh Shekari, Hossein Zamani
- Examining Specific Social and Spiritual Factors of Drought in Light of the Quran and Narrations** 119
Mohammad Akbari
- An Overview of Different Perspectives on Climate Change: Analysis and Comparison** 121
Ghazal Dehghanisanij, Seyyed Nasser Bashi-Azghadi