

Impact of Climate Change on Rainfall Pattern Variability in Ilam Province Using CMIP6 Models and Rainfall Frequency Analysis

ABSTRACT

The global trend of climate change has raised concerns about water resources. This study utilized outputs from 12 CMIP6 models to examine the impact of climate change on rainfall patterns in Ilam Province. By considering the climate change scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5, changes in precipitation in Ilam Province were analyzed up to the year 2050. After clustering the rain gauge stations into Cluster One (covering the south and east of the province) and Cluster Two (covering the north and west) and evaluating the performance of the CMIP6 models, the IPSL-CM6A-LR and ACCESS-CM2 models were selected as the best-performing models for Cluster One. For Cluster Two, the IITM-ESM and BCC-CSM2-MR models were chosen as the top models. The model outputs indicate that in the future period (2018-2027), for Cluster One, under the SSP1-2.6 scenario, the annual average rainfall is expected to decrease by 4.1% to 303.52 mm per year. Under the SSP5-8.5 scenario, this decrease is projected to be 4.7%, resulting in an annual rainfall of 301.56 mm. For Cluster Two, under both scenarios (SSP1-2.6 and SSP5-8.5), the annual average rainfall is anticipated to increase by 3% and 2.8%, respectively, rising from 431.10 mm per year to 444.04 mm in the SSP1-2.6 scenario, and reaching 443.31 mm in the SSP5-8.5 scenario. The selected probabilistic distributions revealed that, regardless of climate scenarios and return periods, the maximum 24-hour rainfall amount is likely to decrease in most instances. This emphasizes the need for sustainable water supply strategies in the province.

Keywords: *Climatic scenario, Clustering, Rainfall, Water resources management.*

مستند
مستند

Extended Abstract

Introduction

Climate change has brought destructive effects on agriculture, biodiversity, and water resources. General Circulation Models (GCMs) are among the most commonly used tools for studying climate change on global and regional scales, producing climate scenarios for the present and future. One of the parameters affected by climate change is precipitation, the variation of which can set the stage for alterations in water resource management scenarios in any given region. Considering the background of other research, analyzing climate change and its impact on climate parameters like precipitation can provide a suitable perspective for long-term watershed management. Therefore, in this study, by evaluating 12 CMIP6 climate models to predict precipitation changes up to the year 1427, the most accurate model for prediction was selected, and based on it, precipitation changes were analyzed. The results of this research can be used with a high level of accuracy to develop management strategies for better management of Ilam province for adapting to the consequences of climate change in the years ahead.

Method

Ilam province is located in western Iran, covering approximately 19,350 km². The province shares borders with Kermanshah to the north, Lorestan to the east, Khuzestan to the southeast, and Iraq to the west. The study examines the impact of climate change on rainfall patterns in Ilam province, analyzing data from 11 rain gauge stations scattered throughout the region from October 1991 to September 2018. Clustering analysis is utilized to categorize the rain gauge stations and study the changes in rainfall patterns due to climate change. Historical precipitation data from 1995 to 2014 is used to assess future rainfall variations and determine the climate parameters' effects on Ilam province, with simulations up to 2050 using twelve CMIP6 models. The research employs statistical methods for downscaling and bias correction of CMIP6 model data, including Quantile Mapping for scaling adjustments.

Results

For Cluster 1 and under the SSP1-2.6 scenario, it is observed that the average values of all indices except CWD have decreased compared to the baseline period, indicating a decrease in dry days and an increase in wet days. Overall, the number of days with heavy and extremely heavy rainfall has decreased, and for SSP5-8.5, the average indices of CDD, CWD, PRCPTOT, R10mm, and R20mm have increased while the average of the remaining indices has decreased. This shows that under the SSP5-8.5 scenario, the intensity of daily precipitation has decreased, but the number of wet days and total precipitation have increased. Under the SSP1-2.6 scenario, the maximum daily precipitation at Station 2 for return periods of 100 and 1000 years is 75.1% and 47.12% respectively, while at Station 6 and for return periods of 2 and 5 years, it is 9.7% and 22.2% respectively, and at Station 10 for return periods of 2, 5, and 10 years, it increases by 42.22%, 78.9%, and 58.0% respectively, with maximum daily precipitation decreasing in other cases. Under the SSP5-8.5 scenario, the maximum daily precipitation at Station 1 for return periods of 2 and 5 years is 101.2% and 98.0% respectively, and at Station 2 for return periods of 25 to 1000 years, it increases by 4.6%, 59.11%, 79.16%, and 79.34% respectively, while at Station 7 for a 1000-year return period, the maximum daily precipitation has increased by 68.3%. Knowing the increase in maximum rainfall values can lead to the development of water resource management scenarios with higher accuracy.

Conclusions

The results showed the average annual rainfall in clusters one and two during the observational period is 5.316 and 1.431 millimeters per year, respectively. For cluster one, according to the SSP1-2.6 scenario, the average annual rainfall is projected to decrease by 1.4% by 2049, reaching 52.303 millimeters per year, while under the SSP5-8.5 scenario, this decrease is 7.4%, with an annual rainfall of 56.301 millimeters during this period. In cluster one, the average annual rainfall in the autumn and spring seasons in the future will decrease, while the winter season's rainfall will increase. For cluster two, the average annual rainfall in the winter and autumn seasons will increase under the SSP5-8.5 scenario, while there will be a decrease in rainfall during the autumn season under the SSP1-2.6 scenario and in the spring season. Climate change in Ilam Province leads to a reduction in precipitation, endangering the water

resources in the region. Therefore, it is recommended to develop strategies and adaptation scenarios to cope with the climate phenomenon by focusing on reducing precipitation, to achieve sustainable water resource management in years facing water scarcity.

Author Contributions

“Conceptualization, Saman Javadi and Farhad Behzadi; methodology, Ali Mohammadi; software, Farhad Behzadi; validation, Farhad Behzadi., Ali Mohammadi; formal analysis, Farhad Behzadi; investigation, Saman Javadi and Ali Mohammadi; resources, Farhad Behzadi; writing—original draft preparation, Ali Mohammadi; writing—review and editing, Saman Javadi and Ali Mohammadi.”

“All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Ethical considerations

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

فصلنامه علمی پژوهشی
مجله علمی پژوهشی
پژوهش‌های علمی

بررسی اثر تغییر اقلیم بر نوسانات الگوی بارندگی استان ایلام با استفاده از مدل های CMIP6 و تحلیل فرکانس بارندگی

چکیده

روند جهانی گرمایش زمین سبب افزایش نگرانی‌ها پیرامون وضعیت منابع آب شده است. در این پژوهش، به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییر الگوی بارش استان ایلام، از پروتکل ۱۲ مدل CMIP6 بهره گرفته شد و با لحاظ سناریوهای تغییر اقلیم SSP1-2.6 و SSP5-8.5، وضعیت تغییرات بارندگی استان ایلام تا سال ۲۰۵۰ مورد بررسی قرار گرفت. بعد از خوشه‌بندی ایستگاه‌های بارانسنجی (خوشه یک، جنوب و شرق استان و خوشه دو، شمال و غرب استان) و ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6، برای خوشه یک مدل IPSL-CM6A-LR و ACCESS-CM2 و برای خوشه دو، مدل IITM-ESM و BCC-CSM2-MR به عنوان برترین مدل‌ها برگزیده شدند. خروجی مدل‌ها نشان می‌دهد که در دوره آینده (۱۳۹۷-۱۴۲۷) برای خوشه یک، طبق سناریو SSP1-2.6، میانگین بارندگی سالانه ۴/۱ درصد کاهش یافته و به ۳۰۲۷۵۲ میلی‌متر در سال خواهد رسید و طبق سناریو SSP5-8.5 این کاهش ۴/۷ درصد بوده و میزان بارندگی سالانه طی این دوره ۳۰۱/۵۶ میلی‌متر در سال خواهد بود. برای خوشه دو، طبق دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5، میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۳ و ۲/۸ درصد افزایش خواهد یافت و از میزان ۴۳۱/۱۰ میلی‌متر در سال به ۴۴۴/۰۴ میلی‌متر در سال (در سناریو SSP1-2.6) و ۴۴۳/۳۱ میلی‌متر در سال (در سناریو SSP5-8.5) خواهد رسید. با انتخاب بهترین توزیع احتمالاتی برای هر یک از ایستگاه‌های بارانسنجی مشخص شد در هر دو سناریوی تغییر اقلیمی و دوره بازگشت‌های مختلف، مقدار حداکثر بارش ۲۴ ساعته در اغلب موارد در دوره آبی با کاهش مواجه می‌شود. لذا این موضوع اهمیت تدوین سناریوهای تأمین پایدار آب استان را برجسته می‌کند.

کلیدواژه‌ها: بارش، خوشه‌بندی، سناریوی اقلیمی، مدیریت منابع آب.

دانشگاه ایلام

مقدمه

تغییر اقلیم اثرات مخربی را بر کشاورزی، تنوع زیستی و منابع آب وارد کرده است (Adnan and Ullah, 2022). پدیده تغییر اقلیم که توسط دگرگونی در شرایط مختلف هواشناسی مانند تغییرات در بارش و درجه حرارت نشان داده می‌شود، در بسیاری از مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها مشهود است (Afsari et al., 2024; Alexander, 2016). مقدار قابل توجهی از این تغییرات در پارامترهای هواشناسی، ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های مختلف انسانی مانند استفاده از سوخت‌های فسیلی و تغییرات کاربری زمین طی قرن گذشته است. لذا نقش عوامل انسانی در تغییرات دما و بارش و در مجموع اقلیم بسیار چشمگیر است (Mohammadi et al., 2024; Fawzy et al., 2020). تغییر اقلیم خود می‌تواند پارامترهای اقلیمی یک ناحیه را تغییر دهد و در نتیجه به فرآیندهای هیدرولوژیکی سرعت بخشد (Otto et al., 2023; Ge et al., 2021; Swain et al., 2020). یکی از پارامترهای مهم و اساسی اقلیم، پارامتر بارش است که تغییر در آن تبعات بسیاری به دنبال دارد. افزایش بارش می‌تواند با افزایش ریسک سیل‌خیزی در یک ناحیه همراه باشد (Tabari, 2020) درحالی‌که کاهش بارش می‌تواند پدیده خشکسالی را به همراه داشته باشد (Li et al., 2024; De Jong et al., 2018). پیش‌بینی و پایش تغییرات پارامترهای اقلیمی می‌تواند سبب اعمال سناریوهای مدیریتی شود که از طریق آن بتوان پدیده تغییر اقلیم را مدیریت کرد. مثال‌هایی از این پیش‌بینی و مدیریت می‌تواند در حوزه‌های مختلفی مانند مدیریت ریسک در آبیاری مناطق خشک (Elnashar and Elyamany, 2023)، کنترل و مدیریت مطلوب سواحل (Cabana et al., 2023) و اثرات تغییر اقلیم و ضرورت تعیین پایداری سدها (Islam et al., 2024) مطرح شود. لذا پیش‌بینی تغییرات اقلیم به عنوان یک مسأله کلیدی در تحقیقات مرتبط با منابع آب و محیط زیست محسوب می‌شود. مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) از پرکاربردترین ابزارهای بررسی تغییر اقلیم در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای محسوب شده که از طریق تولید سناریوهای اقلیمی برای زمان حاضر و آینده، تغییرات اقلیمی را قابل پایش می‌کنند. بررسی نتایج حاصل از خروجی مدل‌های GCM از آن حکایت دارد که مناطق خشک به سمت خشکی بیشتر و مناطق مرطوب به سمت رطوبت بیشتر حرکت می‌کنند (Xiong et al., 2022)، اگرچه که ارزیابی‌های منطقه‌ای به منظور شناسایی روند تغییر اقلیم و تغییر در پارامترهای آن بسیار حائز اهمیت است.

کریمی‌احمدآباد و نبی‌زاده (۱۳۹۷)، با استفاده از مدل گردش عمومی جو HadCM3 اثرات تغییر اقلیم را بر پارامترهای اقلیمی حوزه دریاچه ارومیه بررسی نمودند. نتایج پژوهش ذکر شده نشان داد تا سال ۲۰۴۰ مقدار بارش در این حوزه نزولی بوده که بیشترین مقدار کاهش آن تا ۵/۳ درصد نسبت به زمان مشاهداتی می‌باشد و میانگین حداقل دما نیز با افزایش ۰/۶۴ الی ۱/۳۵ درجه سانتی‌گرادی مواجه خواهد بود. جهانگیر و محمدی (۱۳۹۷)، به پیش‌بینی تغییرات بارش و دمای استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG اقدام نمودند. پارامترهای ارزیابی مدل از جمله RMSE حاصل حاکی از عملکرد مناسب مدل مذکور در پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بود و نشان داد که مقدار بارش تا سال ۲۰۶۵ در درصد قابل توجهی از استان روند کاهشی داشته و بطور میانگین ۴۰ میلی‌متر از دوره مشاهداتی کم‌تر خواهد بود. Cetin (۲۰۲۰) با تأکید بر اهمیت بازنگری‌ها در برنامه‌ریزی شهری، اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی شهر Mersin را مورد ارزیابی قرار داد. افزایش دما در سناریوی RCP 8.5 برابر با ۵ درجه سانتی‌گراد در این شهر خواهد بود و تا افق ۲۰۷۰ اقلیم این شهر خشک خواهد شد. Kuttippurath و همکاران (۲۰۲۱)، به بررسی تغییرات بارش مشاهده‌ای قرن گذشته (۲۰۱۹-۱۹۰۱) در مرطوب‌ترین منطقه دنیا یعنی شمال شرق هند پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که بعد از سال ۱۹۷۳ در این منطقه بارش‌ها ۰/۴۲ میلی‌متر کاهش یافته است و تغییر دمای اقیانوس هند و تا حد قابل توجهی تغییر پوشش زمین در این زمینه تأثیرگذار بوده است. بهزادی و همکاران (۱۴۰۱)، با هدف تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان دشت شهر کرد، از برون‌داد مدل‌های CMIP6 استفاده کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که خشکسالی‌هایی با شدت و مدت بیش‌تری در منطقه رخ خواهد داد و تحت سناریوی SSP5-8.5 شدیدترین خشکسالی تا ۷۰ ماه دوام خواهد یافت. در پژوهش El-Rawy et al., 2023 اثرات تغییر اقلیم برای منابع آب مناطق خشک و نیمه‌خشک بررسی شد. در این راستا از چهار مدل CMIP6 استفاده و دو سناریوی SSP2-4.5 (انتشار متوسط-کم) و SSP5-8.5 (انتشار زیاد) استفاده شد. نتایج نشان داد که تحت سناریوهای SSP2-4.5 و

SSP5-8.5 میانگین بارش سالانه در عربستان تا سال ۲۰۴۰، به ترتیب ۱۴/۹ میلیمتر و ۱۵/۵ میلیمتر افزایش خواهد یافت. Tamm et al., 2023 با استفاده از روش ناپارامتریک Sen's slope به بررسی و تخمین روند و بزرگی تغییرات بارش در چندین ایستگاه بارانسنجی واقع شده در اروپا پرداختند. براساس این تحقیق، شدت حداکثر بارش در کشور استونی بطور میانگین چهار درصد در دوره زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۱ افزایش یافته است.

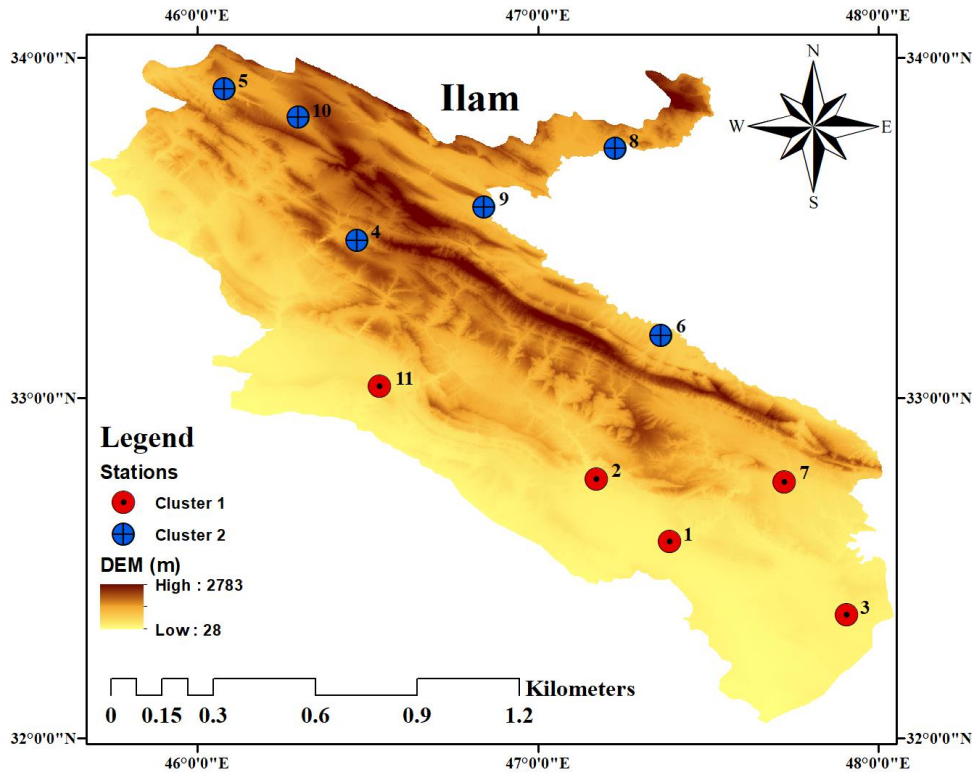
با توجه به پیشینه تحقیق ذکر شده، یکی از پارامترهای تحت تأثیر تغییر اقلیم، بارش است که تغییر آن می‌تواند زمینه‌ساز دگرگونی در سناریوهای مدیریت منابع آب در هر منطقه‌ای شود. لذا بررسی تغییر اقلیم و تأثیر آن بر پارامترهای اقلیمی از جمله بارش، می‌تواند دیدگاه مناسبی را برای مدیریت مطلوب یک حوضه آبخیز در طولانی مدت فراهم نماید. در این پژوهش با ارزیابی ۱۲ مدل اقلیمی CMIP6 به منظور پیش‌بینی تغییرات بارش تا سال ۱۴۲۷، دقیق‌ترین مدل برای پیش‌بینی انتخاب شده و براساس آن، آنالیز تغییرات بارش صورت گرفت. لذا انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند با دقت بالایی به منظور تدوین اقدامات مدیریتی برای مدیریت بهتر استان ایلام برای سازگاری با تبعات ناشی از تغییر اقلیم در سال‌های پیش‌رو استفاده شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان ایلام با مساحتی حدود ۱۹۳۵۰ کیلومتر مربع در غرب ایران واقع شده است. این استان بین طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۴ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۵ دقیقه شمالی قرار دارد (عسگری و همکاران، ۱۴۰۴؛ رستم نیا و آخوندزاده هنزائی، ۱۳۹۵). ارتفاع استان ایلام از حداقل ۲۸ متر در مناطق جنوب غربی تا بیش از ۲۷۰۰ متر در مناطق شرقی و شمال شرقی متغیر است. اقلیم استان به دلیل تأثیر عوامل مختلفی از جمله عرض جغرافیایی، ارتفاع، بیابان‌های عربی، دشت خوزستان، دشت‌های عراق و بادهای محلی بسیار متنوع است. تفاوت دماهای و بارشی بین شمال، جنوب و غرب استان قابل توجه بوده و باعث تنوع اقلیمی استان ایلام شده است. به طور کلی از نظر اقلیمی استان ایلام به دو اقلیم Csa (اقلیم مدیترانه‌ای با تابستان گرم) که شمال استان را تشکیل می‌دهد و BSh (اقلیم نیمه‌خشک گرم) که شامل مناطق جنوبی است، تقسیم می‌شود (Raziei, 2022). موقعیت جغرافیایی استان ایلام، ایستگاه‌های باران‌سنجی مورد استفاده در این مطالعه به همراه خوشه‌بندی ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

نشانده



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان ایلام، ایستگاه‌های باران‌سنجی و خوشه‌بندی منطقه

داده‌ها و مدل‌های مورد استفاده

به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارندگی استان ایلام و تغییرات ایجاد شده در الگوی آن، از داده‌های بارندگی ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی که در سطح این استان پراکنده شده‌اند، طی دوره مهر ۱۳۷۰ الی شهریور ۱۳۹۷ (سال آبی ۱۳۷۰-۷۱ الی ۱۳۹۶-۹۷) استفاده شده که مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. موقعیت مکانی ایستگاه‌های باران‌سنجی استان ایلام

ایستگاه	نام	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
۱	پل دوبرج	۳۲/۵۷	۴۷/۳۸	۳۱۸
۲	جاده دهلران	۳۲/۷۶	۴۷/۱۷	۳۶۰
۳	دشت عباس	۳۲/۳۶	۴۷/۹۱	۱۶۱
۴	سرجوی	۳۲/۴۶	۴۶/۴۸	۱۱۵۰
۵	سیاهگل	۳۳/۹۱	۴۶/۰۷	۷۹۰
۶	گل زرد	۳۳/۱۸	۴۷/۳۶	۶۸۰
۷	مورموری	۳۲/۷۵	۴۷/۷۲	۴۸۵
۸	هلبلان	۳۳/۷۳	۴۷/۲۲	۱۰۰۰
۹	ورگچ	۳۳/۵۶	۴۶/۸۴	۷۰۳
۱۰	سد کنگیر	۳۳/۸۲	۴۶/۲۹	۱۲۰۰
۱۱	خوشاب	۳۳/۰۳	۴۶/۵۳	۲۳۰

شایان ذکر است در این پژوهش به منظور تعیین اثر تغییر اقلیم بر بارندگی استان ایلام، از برون داد ۱۲ مدل CMIP6 تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استفاده شد (مشخصات مدل‌ها در جدول ۲ ارائه شده است) تا تغییرات بارندگی تا سال ۲۰۵۰ در این استان مشخص گردد.

جدول ۲. مدل‌های مورد استفاده در راستای تعیین اثر تغییر اقلیم

ردیف	مدل	کشور	موسس
۱	ACCESS-CM2	استرالیا	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
۲	BCC-CSM2-MR	چین	Beijing Climate Center Ocean-atmosphere Coupled Model
۳	CanESM5	کانادا	Canadian Earth System Model
۴	CESM2-WACCM	ایالات متحده	The Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere extension
۵	FGOALS-f3-L	چین	Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System
۶	GFGL-ESM4	ایالات متحده	National Oceanic and Atmospheric Administration, Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
۷	IITM-ESM	هند	Indian Institute of Tropical Meteorology ESM
۸	INM-CM5-0	روسیه	Institute for Numerical Mathematics
۹	IPSL-CM6A-LR	فرانسه	Institute Pierre-Simon Laplace
۱۰	KIOST-ESM	کره جنوبی	Korea Institute of Ocean Science and Technology
۱۱	MIROC6	ژاپن	Atmosphere-ocean coupled model
۱۲	NorCPM1	نروژ	Norwegian Climate Prediction Model

به منظور تعیین اثر تغییر اقلیم بر نوسانات الگوی بارندگی استان ایلام، حداکثر بارندگی روزانه به ازای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله طی دوره مشاهداتی و آینده (تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5) محاسبه و نتایج آن‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. در این راستا، طی دوره مشاهداتی و آینده، حداکثر بارندگی روزانه در هر سال برای هر یک از ۱۱ ایستگاه معرفی شده جدا شده و روی سری داده‌های تشکیل شده، توابع توزیع احتمالاتی برازش داده می‌شود تا با استفاده از برترین تابع توزیع برازش یافته، مقادیر حداکثر بارندگی روزانه به ازای دوره بازگشت‌های نام برده شده تعیین شود. به این منظور، در پژوهش حاضر از نرم‌افزار EASYFIT استفاده شده است و بر داده‌های هر یک از ایستگاه‌های طی دوره مشاهداتی و آینده، ۶۵ تابع احتمالاتی مختلف برازش داده شده است. در نهایت، به منظور تعیین برترین تابع برازش یافته بر هر یک از ایستگاه‌ها، از دو آزمون نکویی برازش کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ بهره گرفته شد که توضیحات تکمیلی در مورد شیوه محاسبه این دو آزمون، در پژوهش ناظری تهرودی و رضانی (۱۳۹۷) ارائه شده است. لازم به ذکر است که پیش از برازش توابع احتمالاتی بر داده‌ها باید همگن بودن، ایستایی بودن و تصادفی بودن داده‌ها مورد بررسی قرار گیرد که در این پژوهش به منظور بررسی شرایط نام برده شده به ترتیب از چهار آزمون Pettitt's، Wald-Wolfowitz، Mann-Kendall و Wallis and Moore استفاده گردید.

خوشه‌بندی

روش کای-میانگین (K-Means)، روشی کاربردی است که توسط بسیاری از محققین به منظور طبقه‌بندی مناطق بر اساس ویژگی‌های هواشناسی یا اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته است (فغانی و همکاران، ۱۳۹۵؛ محمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ Roushangar ; et al., 2018; Alam and Paul, 2020; Behzadi et al., 2022; Behzadi et al., 2024). در پژوهش حاضر نیز به منظور تقسیم‌بندی ایستگاه‌های باران سنجی استان ایلام و تحلیل تغییرات ایجاد شده به واسطه تغییر اقلیم در الگوی بارندگی استان ایلام، از روش خوشه‌بندی K-Means استفاده شده است. نخستین گام پس از تعیین منطقه مورد مطالعه و تهیه داده‌های آماری مربوطه، انتخاب

ویژگی‌ها و آماده‌سازی بردارهای مشخصه ای است. در این مرحله هدف انتخاب ویژگی‌های موثر بر تقسیم‌بندی منطقه مورد مطالعه است. یک خوشه از یک یا تعداد بیشتری بردار مشخصه تشکیل می‌شود. یک بردار مشخصه شامل چندین ویژگی اثرگذار یک ایستگاه باران‌سنجی در منطقه مورد مطالعه است. در این پژوهش ویژگی‌هایی که برای خوشه‌بندی منطقه مد نظر قرار گرفته‌اند عبارتند از طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، و میانگین بارندگی در ۱۲ ماه سال که به عنوان بردار ورودی هر یک از ایستگاه‌های در نظر گرفته شده است. خوشه‌بندی ترکیبی بر اساس هر یک از این ویژگی‌ها و به عنوان ویژگی‌های بردارهای مشخصه انجام گرفت. خوشه‌های تشکیل شده به صورت بصری و با استفاده از شاخص‌های صحت‌سنجی خوشه برای تعیین تعداد بهینه مناطق تفسیر می‌شوند. در مطالعه حاضر از میان شاخص‌های سنجش صحت خوشه‌بندی، شاخص اعتبارسنجی سایه‌نما یا سیلوئت (Silhouette Width) انتخاب شده است. این شاخص برای آامین بردار مشخصه در خوشه یا $s(i)$ نشان داده شده و مطابق رابطه ۱ تعریف می‌شود (Rousseeuw, 1987):

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن $a(i)$ فاصله متوسط بردار مشخصه نام نسبت به تمام بردارهای مشخصه دیگر موجود در خوشه و $b(i)$ حداقل فاصله متوسط بردار مشخصه نام نسبت به تمام بردارهای مشخصه خوشه دیگر است. بر اساس رابطه ۱، خواهیم داشت $-1 \leq s(i) \leq 1$. اگر مقدار $s(i)$ نزدیک به ۱ باشد، می‌توان این طور نتیجه‌گیری کرد که بردار مشخصه نام در خوشه‌ای مناسب جای گرفته است. از سوی دیگر چنانچه مقدار $s(i)$ به -1 نزدیک باشد، می‌توان این گونه استنتاج کرد که آامین بردار مشخصه به خوشه مناسبی تعلق نیافته است. از میانگین تمام مقادیر $s(i)$ که با S_{av} نشان داده می‌شود، برای قضاوت کلی در مورد خوشه‌بندی انجام گرفته استفاده می‌شود. بالابودن کیفیت خوشه‌بندی بر اساس شاخص S_{av} بدین معنا است که بردارهای مشخصه موجود در یک خوشه حتی‌الامکان به هم نزدیک و بردارهای مشخصه موجود در خوشه‌های مختلف حتی‌الامکان از یکدیگر دور هستند.

ریز‌مقیاس‌نمایی

با اینکه مدل‌های گردش عمومی (GCM) برترین ابزار کنونی بشر جهت شبیه‌سازی آینده تحت تاثیر تغییر اقلیم می‌باشد اما یکی از اصلی‌ترین معضلات این مدل‌ها، بزرگ مقیاس بودن آن‌ها می‌باشد. در همین راستا از فرآیندهای تحت عنوان ریزمقیاس‌نمایی جهت تقلیل مقیاس این مدل‌ها استفاده می‌شود تا دقت زمانی و مکانی آن‌ها به میزان مورد نیاز کاهش یابد. دو رویکرد اصلی جهت کاهش مقیاس این مدل‌ها وجود دارد که عبارتند از روش‌های آماری و روش‌های دینامیکی که روش‌های آماری به دلیل ساده‌تر و ارزان‌تر بودن نسبت روش‌های دینامیکی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در همین راستا، در این پژوهش به منظور تصحیح سوگیری و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل‌ها، از روش نگاشت چندک (Quantile Mapping) استفاده شده است. روش نگاشت چندک (QM) با استفاده از چندک پیش‌بینی به اصلاح پیش‌بینی‌ها با توجه به مشاهدات تاریخی می‌پردازد. برای این منظور، تابع احتمال تجمعی (Cumulative Distribution Function) پیش‌بینی‌ها و همچنین CDF تجربی مشاهدات (داده‌های تاریخی) تعیین می‌شود. در نهایت، زمانی که پیش‌بینی جدید موجود است، مقدار چندک پیش‌بینی از CDF تاریخی پیش‌بینی‌ها بدست می‌آید و بعد عدد معادل چندک به دست آمده در CDF پیش‌بینی‌ها به عنوان داده تصحیح شده لحاظ می‌شود (Gudmundsson, 2012; Lee et al., 2020; Sangelantoni et al., 2019; Yang et al., 2018). اگر Z_i و Y_i به ترتیب داده خام و تصحیح شده، F_{Si} و $F_{O_i}^{-1}$ به ترتیب نشان دهنده CDFهای پیش‌بینی خام و مشاهداتی باشند، رابطه ۲ نگاشت چندک برای تصحیح متغیر پیش‌بینی شده را نشان می‌دهد (باپیرزاده و همکاران، ۱۴۰۱).

$$Z_i = F_{O_i}^{-1}(F_{S_i}(Y_i)) \quad \text{رابطه ۲}$$

روش‌های مختلفی از ریزمقیاس‌نمایی به روش نگاشت چندک وجود دارد که در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عبارتند از: توابع تبدیل پارامتریک (PTF)، تبدیل بر اساس توابع توزیع (DIST)، چندک تجربی (QUANT)، چندک‌های تجربی قوی

(RQUANT) و اسپلاین همواری (SSPLIN) که جزئیات کامل تمامی روش‌ها و شیوه محاسبات در پژوهش Enayati et al. (۲۰۲۱) ارائه شده‌اند.

ارزیابی مدل‌های اقلیمی

در سرتاسر جهان مدل‌های تغییر اقلیمی زیادی به منظور شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای برای دوره آتی توسعه داده شده‌اند که هر یک از این مدل‌ها از عملکرد متفاوتی در شبیه‌سازی این متغیرها در مناطق مختلف برخوردار هستند. به منظور بررسی دقت نتایج مدل‌های GCM، از پنج معیار آماری شامل میانگین قدرمطلق خطا (MAE) (Verma et al., 2021)، ریشه میانگین مربعات خطا استاندارد شده (NRMSE) (Verma et al., 2021)، ضریب همبستگی (r) (Santos et al., 2018)، آماره اریب (BIAS) (صادقی و همکاران، ۱۳۹۴) و نمایه IA (Krause et al., 2005) جهت انتخاب مناسب‌ترین و نزدیک‌ترین مدل به داده‌های واقعی کشور استفاده شده است (روابط ۳ تا ۷).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_i - O_i| \quad \text{رابطه ۳}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}}{\text{Max}_o - \text{Min}_o} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)(P_i - \bar{P}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P}_i)^2}} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i) \quad \text{رابطه ۶}$$

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad \text{رابطه ۷}$$

که در آن N تعداد داده ها، P_i مقادیر پیش‌بینی شده و O_i مقادیر مشاهداتی هستند.

آزمون‌های آماری

آزمون تصادفی بودن Wallis-Moore

از جمله مهم‌ترین آزمون‌های بررسی تصادفی بودن داده‌ها مورد بررسی، آزمون Wallis-Moore است. براساس این آزمون (رابطه ۸)، تفاضل رتبه نخست یک سری مورد بررسی که علامت آن از منفی به مثبت (با برعکس)، دچار تغییر می‌شود، با همین سری از نوع تصادفی مقایسه می‌شود. بدین منظور، باد تعداد کل دوره‌هایی که در یک سری هم علامت هستند، در حالت تصادفی محاسبه شود که برای محاسبه تعداد دوره از رابطه ۸ استفاده می‌شود (پاریزان و اسماعیلی، ۱۳۸۷).

$$U_d = \frac{2(d^2 + 3d + 1)(n - d - 2)}{(d + 3)!} \quad \text{رابطه ۸}$$

که در آن U_d تعداد دوره‌های انتظار با طول d در حالت تصادفی بودن و n نیز تعداد مشاهدات است.

آزمون استقلال داده‌ها Wald-Wolfowitz

به منظور انجام این آزمون باید در اولین گام، به هر داده کوچک‌تر و بزرگ‌تر از میانگین مشخصه‌های a و b اختصاص داده شود و

سپس آماره این آزمون به صورت ذیل محاسبه می‌گردد (خادمی و همکاران، ۱۳۹۶).

$$U_R = \frac{R - E_R}{S_d} \quad \text{رابطه ۹}$$

$$E_R = \frac{n_a + n_b + 2n_a n_b}{n_a + n_b} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$S_d = \sqrt{\frac{2n_a n_b (2n_a n_b - n_a - n_b)}{(n_a + n_b)^2 (n_a + n_b - 1)}} \quad \text{رابطه ۱۱}$$

که در این روابط، U_R آماره آزمون Wald-Wolfowitz، R تعداد دنباله‌های بدست آمده، E_R تعداد دنباله‌های قابل انتظار، S_d انحراف معیار دنباله‌ها، n_a تعداد داده‌های بزرگ‌تر از میانگین و n_b تعداد داده‌های کوچک‌تر از میانگین هستند.

آزمون همگنی داده‌ها Pettitt

این آزمون، یکی از آزمون‌های ناپارامتریک برای تعیین تغییر ناگهانی در یک سری زمانی است. در این آزمون، یک سری زمانی به دو سری جدا تفکیک شده و معنی‌دار بودن آن را بررسی می‌کند. در این آزمون فرض صفر به معنی استقلال مقادیرهای مختلف سری زمانی از یکدیگر و همگنی آنها است. در مقابل اگر عدم پیوستگی در مقادیر میانگین سری زمانی مشاهده شود، براساس فرض یک این آزمون، سری زمانی غیرهمگن است. در این آزمون ابتدا مقادیر سری داده مورد نظر Y_i ، براساس مقادیرشان مرتب شده و رتبه‌های R_i برای مقادیر متناظر Y_i مشخص می‌شوند سپس براساس روابط ۱۲ تا ۱۴ (مرتضی پور و همکاران، ۱۳۹۹) مقادیر X_k محاسبه شده و براساس مقادیر ارائه شده مقایسه می‌شوند یعنی اگر که آماره از مقادیر بحرانی عبور کند، زمان مربوط به داده بیشینه X_k معادل زمان بروز ناهمگنی است.

$$X_y = 2 \sum_{i=1}^y r_i - y(n+1) \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$Y = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$X_k = \max_{1 \leq y \leq n} |X_y| \quad \text{رابطه ۱۴}$$

بررسی روند داده‌ها با استفاده از روش Mann-Kendall

در این آزمون براساس نوعی ضریب همبستگی، میزان ارتباط بین دو سری از متغیرها اندازه‌گیری شده و مشخص می‌شود که آیا مقدار متغیر اول با افزایش متغیر دوم افزایش یا کاهش می‌یابد و یا اینکه الگوی تغییر آن‌ها با هم در ارتباط نیست. این آزمون با تعریف آماره S بصورت زیر تعریف می‌شود (رابطه ۱۵) (ناظری تهرودی و همکاران، ۱۳۹۵).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sign}(X_i - X_j) \quad (\forall j > i) \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن X_i و X_j مقادیر مرتب شده و n تعداد نمونه است.

تحلیل تغییرات ایجاد شده در الگوی بارندگی

در این پژوهش به منظور تعیین تغییرات ایجاد شده در الگوی بارندگی استان ایلام، از شاخص‌های حدی اقلیمی تحت عنوان شاخص‌های CLIMDEX استفاده شده است. در مجموع ۲۷ نوع از این شاخص‌ها توسعه داده شده‌اند که هرکدام از آن‌ها هدف خاصی را دنبال

می‌کنند و به داده‌های مختلفی نیاز دارند. از آنجا که هدف این پژوهش ارزیابی و تعیین تغییرات ایجاد شده در الگوی بارندگی آینده نسبت به دوره پایه است، از شاخص‌های حدی مرتبط با بارندگی بهره‌گرفته شده است. در مجموع در این پژوهش از ۱۱ شاخص خانواده CLIMDEX استفاده شده است که عناوین این شاخص‌ها در جدول ۳ نشان داده شده است.

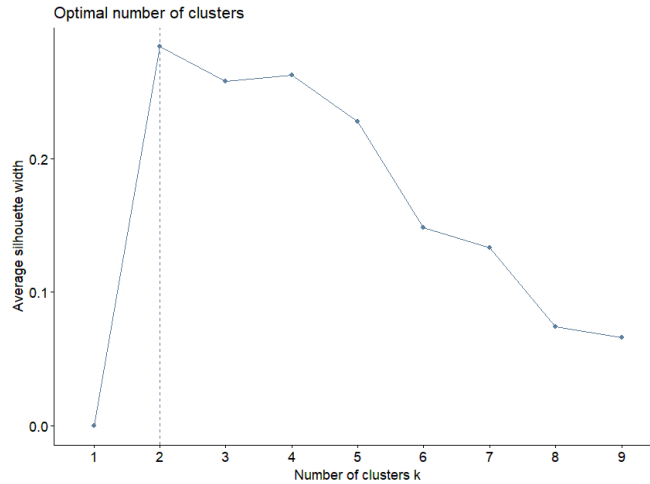
جدول ۳. شاخص‌های اقلیمی مورد استفاده

نماینه	نام شاخص	تعریف	واحد
CDD	روزهای خشک متوالی	تعداد روزهای متوالی با بارش کمتر از یک میلی‌متر	day
CWD	روزهای تر متوالی	بیشترین تعداد روزهای متوالی که بیش از یک میلی‌متر بارندگی رخ داده است	day
SDII	نمایه ساده شدت روزانه	این شاخص از تقسیم مجموع کل بارش سالانه بر تعداد روزهای بارانی (حداقل یک میلی‌متر) بدست می‌آید.	mm/day
R10mm	تعداد روزهایی با بارش سنگین	تعداد روزهایی که بارندگی روزانه مساوی یا بیشتر از ۱۰ میلی‌متر باشد	mm
R20mm	تعداد روزهایی با بارش بسیار سنگین	تعداد روزهایی که بارندگی روزانه مساوی یا بیشتر از ۲۰ میلی‌متر باشد	day
R50mm	تعداد روزهایی با بارش بیش از اندازه سنگین	تعداد روزهایی که بارندگی روزانه مساوی یا بیشتر از ۵۰ میلی‌متر باشد	day
R95p	مجموع بارندگی در روزهای خیلی مرطوب	بارندگی کل سالانه هنگامیکه بیشتر از صدک نود و پنجم باشد	mm
R99p	مجموع بارندگی در روزهای بیش از اندازه مرطوب	بارندگی کل سالانه هنگامیکه بیشتر از صدک نود و نهم باشد	mm
Rx1day	حداکثر بارش یک روزه	حداکثر بارش یک روزه	mm
Rx5day	حداکثر بارش پنج روزه	حداکثر بارش پنج روزه	mm
PRCPTOT	بارش سالانه در روزهای تر	مقدار سالانه بارش سالانه در روزهای تر	mm

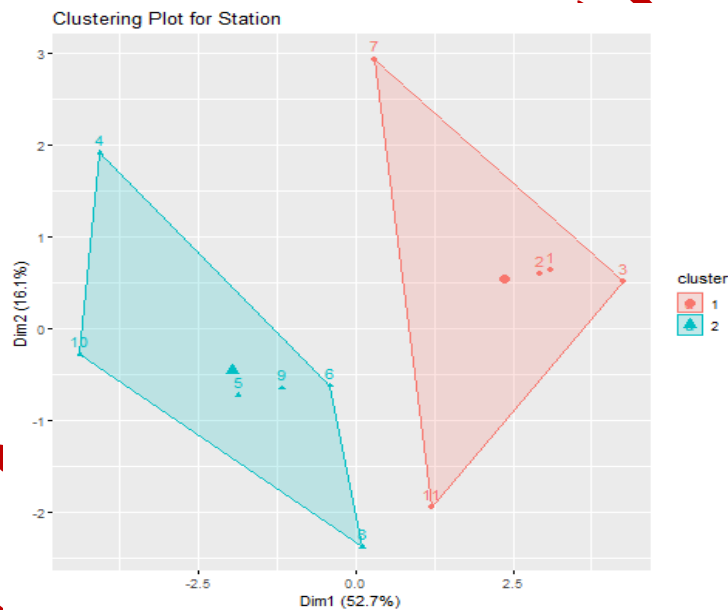
بحث

همانطور که اشاره شد در این پژوهش به منظور خوشه‌بندی استان ایلام بر اساس ایستگاه‌های باران‌سنجی در سطح منطقه، از روش K-Means استفاده شده است. همچنین به منظور تعیین تعداد خوشه بهینه از روش اعتبارسنجی سیلوئت بهره‌گرفته شده است. در این پژوهش ویژگی‌هایی که برای خوشه‌بندی منطقه مد نظر قرار گرفته‌اند عبارتند از طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا، و میانگین بارندگی در ۱۲ ماه سال که به عنوان بردار ورودی هر یک از ایستگاه‌ها در نظر گرفته شده است.

در همین راستا، رویکرد خوشه‌بندی K-Means برای تعداد دسته ۱ الی ۹ دسته ($k = 1, 2, \dots, 9$) با تعداد تلاش ۱۰۰۰ بار (Iteration = 1000) با کدنویسی در محیط R اجرا شد و با استفاده از تکنیک سیلوئت تعداد بهینه خوشه‌های مشخص شده است. در شکل ۲ تعداد خوشه‌های بهینه بر اساس سیلوئت و در شکل ۳ خوشه‌بندی بدست آمده از روش K-Means نشان داده شده است.



شکل ۲. تعداد خوشه بهینه بر اساس رویکرد اعتبارسنجی سیلوئت



شکل ۳. الگوی خوشه‌بندی K-Means بر اساس بردار ورودی هر یک از ایستگاه‌ها

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، تعداد خوشه بهینه بر اساس رویکرد اعتبارسنجی سیلوئت تعداد دو خوشه تعیین شد و خوشه‌بندی دو خوشه نیز با روش K-Means انجام شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. مشخص می‌شود که ایستگاه شماره یک در خوشه شماره یک به مرکز این دسته نزدیک است و از این رو به عنوان نماینده این خوشه انتخاب می‌شود و در خوشه شماره دو نیز ایستگاه شماره نه به مرکز این خوشه نزدیک است و به عنوان نماینده این خوشه انتخاب می‌شود.

مدل‌های گردش عمومی

به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم جهانی و نقش آن بر تغییر الگوی بارش استان ایلام در این پژوهش از نتایج مدل‌های گردش عمومی جو CMIP6 (GCM) و دو سناریو گزارش ششم تغییر اقلیم که از ترکیب سناریو SSP1 با RCP2.6 و SSP5 با RCP8.5 استفاده شده است استفاده شد. در همین راستا به منظور ارزیابی عملکرد ۱۲ مدل اقلیمی مورد استفاده که در شبیه‌سازی دوره آینده استان ایلام مورد استفاده

قرارگرفته‌اند (جدول ۴)، از معیارهای آماری MAE، NRMSE، R، BIAS، IA استفاده شد. شایان ذکر است که روش ریزمقیاس‌نمایی DIST به کمک تابع توزیع برنولی-لوگ نرمال که ترکیبی از تابع توزیع احتمالاتی برنولی و لوگ نرمال است، به‌عنوان برترین روش ریزمقیاس‌نمایی انتخاب شد.

جدول ۴. عملکرد مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دوره پایه در هر یک از خوشه‌ها

خوشه شماره ۲ - ماهانه					خوشه شماره ۱ - ماهانه					مدل
IA	BIAS	r	NRMSE	MAE	IA	BIAS	r	NRMSE	MAE	
-۰/۶۲	۴/۳۳	۰/۴	۰/۲۷	۳۵/۲۱	۰/۶	۱/۱۴	۰/۳۵	۰/۲۵	۲۲/۲۲	ACCESS-CM2
-۰/۶۵	-۰/۰۸	-۰/۴۲	۰/۲۲	۲۷/۸	-۰/۵۸	-۰/۶۲	۰/۳۴	۰/۲۳	۲۱/۲۱	BCC-CSM2-MR
-۰/۵۱	۱/۶۳	-۰/۲۳	۰/۳۳	۳۵/۸۷	-۰/۴۵	-۰/۱۴	۰/۱۷	۰/۳	۲۷/۰۸	CanESM5
-۰/۳۶	-۰/۰۶	-۰/۰۳	۰/۱۶	۴۴/۷۷	-۰/۴۳	۰/۳۸	۰/۰۸	۰/۳	۲۸/۹۶	CESM2-WACCM
-۰/۳۶	-۰/۰۹	-۰/۰۶	۰/۱۵	۴۹/۸۲	-۰/۳۴	۰/۸۶	-۰/۰۷	۰/۳۲	۳۴/۲۵	FGOALS-F3-L
۰/۶	۱/۰۲	-۰/۳۴	۰/۲۷	۳۲/۱۱	-۰/۵۶	۱/۶۲	۰/۲۹	۰/۲۶	۲۵/۷۸	GFDL-ESM4
-۰/۶۲	-۰/۳۲	۰/۴	۰/۲۶	۲۸/۸۸	-۰/۵۸	-۱/۵۳	۰/۳۴	۰/۲۵	۲۱/۲۴	IITM-ESM
-۰/۴۷	-۱/۰۴	-۰/۲۱	۰/۳۴	۳۵/۳	-۰/۳۹	۱/۷۹	۰/۱۱	۰/۳۴	۲۸/۸۲	INM-CM5-0
-۰/۶۹	-۴/۳۵	-۰/۴۸	۰/۲۱	۲۵/۴۷	-۰/۶۸	-۲/۸۶	۰/۴۶	۰/۲۱	۱۸/۲۳	IPSL-CM6A-LR
-۰/۳۹	۱۱/۸۱	-۰/۱۴	۰/۴۵	۴۵/۸۵	-۰/۳۲	۱۰/۸۱	۰/۰۹	۰/۴۵	۳۵/۳۹	KIOST-ESM
-۰/۵	-۱/۱۴	-۰/۲۲	۰/۲۸	۳۴/۴۷	-۰/۴۹	-۰/۳۳	۰/۱۹	۰/۲۹	۲۶/۷۳	MIROC6
-۰/۳۳	۰/۹۷	-۰/۰۱	۰/۱۶	۴۷/۷۵	-۰/۳۵	۰/۱۷	-۰/۰۱	۰/۳۱	۳۱/۲	NorCPM1

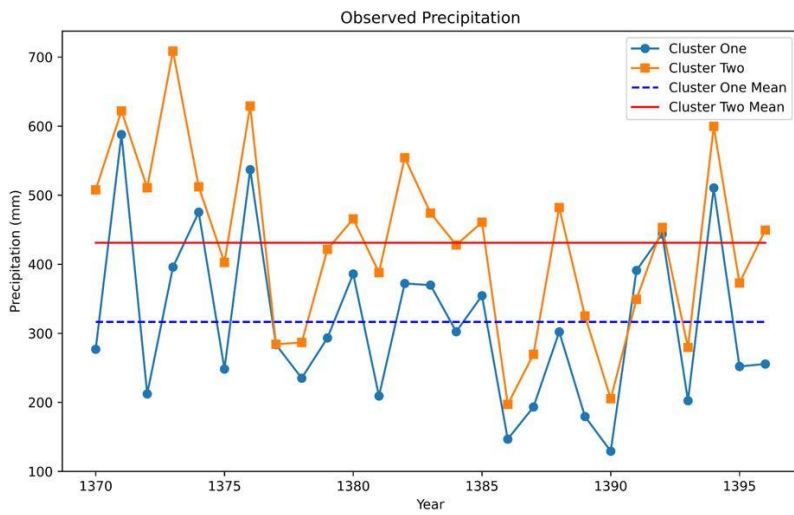
با بررسی جدول ۴ و آنالیز شاخص‌های ارزیابی، برای خوشه شماره یک، دو مدل ACCESS-CM2 و IPSL-CM6A-LR و برای خوشه شماره دو، دو مدل IITM-ESM و BCC-CSM2-MR به‌عنوان برترین مدل‌ها برگزیده می‌شوند.

اثر تغییر اقلیم بر بارندگی استان ایلام

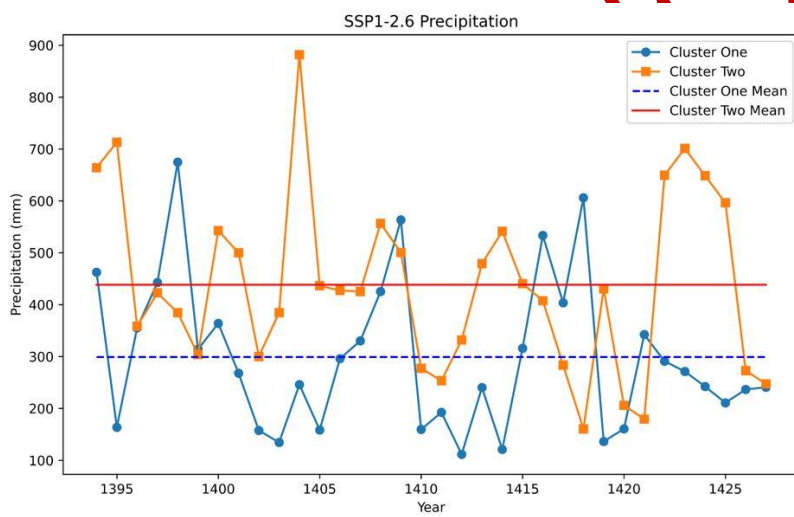
پس از استخراج بارندگی روزانه از برترین مدل‌ها، بارندگی دوره آینده استان ایلام مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا در جدول ۵ میزان بارندگی فصلی و میانگین سالانه برای هر یک از خوشه‌ها در دوره مشاهداتی و هم تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 ارائه شده است. همچنین در شکل‌های ۴ نیز بارندگی سالانه هر یک از خوشه‌ها طی دوره مشاهداتی (۱۳۹۶-۱۳۷۰) و دوره آینده (۱۳۹۴-۱۴۲۷) تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نشان داده شده است.

جدول ۵. میانگین بارندگی استان ایلام (mm) در دوره مشاهداتی و آینده

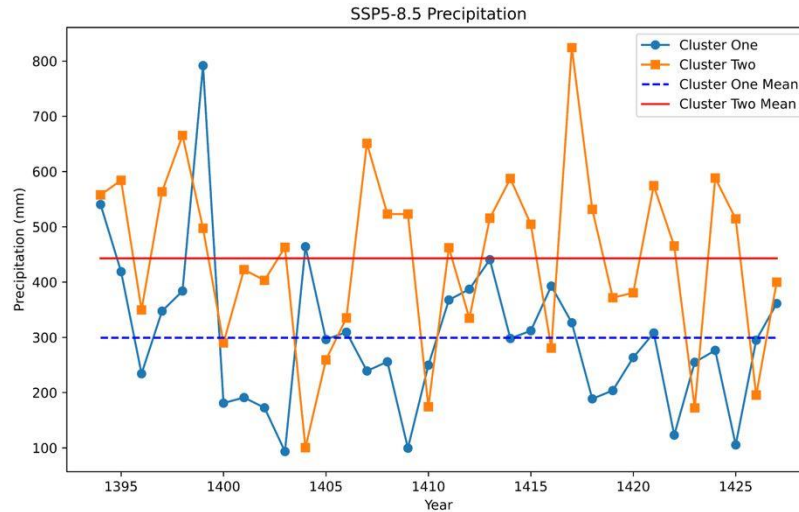
سالانه	تابستان	بهار	زمستان	پاییز	سناریو	خوشه
۳۱۶/۵۱	-۰/۹۲	۶۴	۱۴۷/۸۳	۱۰۳/۸۲	OBS	شماره ۱
۳۰۳/۵۲	-۰/۶۱	۵۲/۴۱	۱۵۳/۷۴	۹۶/۷۷	SSP1-2.6	
۳۰۱/۵۶	۲/۴۹	۴۵/۲۶	۱۶۸/۶۶	۸۵/۱۵	SSP5-8.5	
۴۳۱/۱۱	۱	۹۷/۷۲	۱۹۷/۷۱	۱۳۴/۷۲	OBS	شماره ۲
۴۴۴/۰۴	-۰/۱۱	۶۴/۴۷	۲۴۷/۴	۱۳۲/۰۶	SSP1-2.6	
۴۴۳/۳۱	-۰/۰۱	۶۵/۲	۲۳۵/۶۶	۱۴۲/۴۴	SSP5-8.5	



شکل ۴ الف. بارندگی سالانه در مشاهداتی در استان ایلام

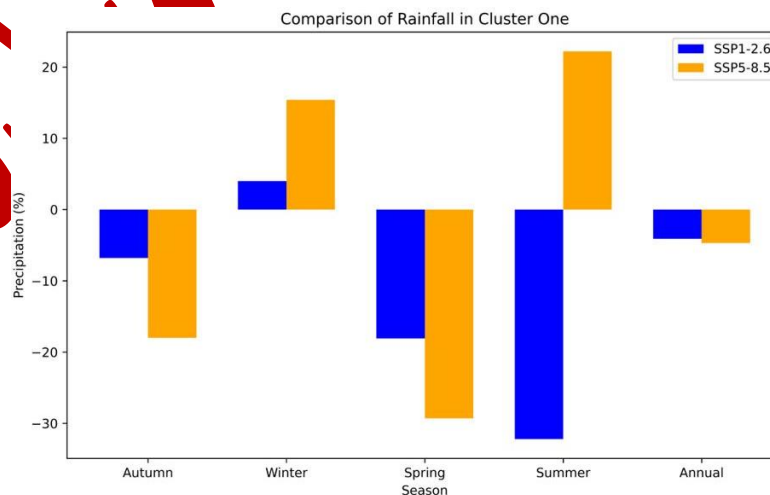


شکل ۴ ب. بارندگی سالانه در دوره آینده در استان ایلام تحت سناریو SSP1-2.6

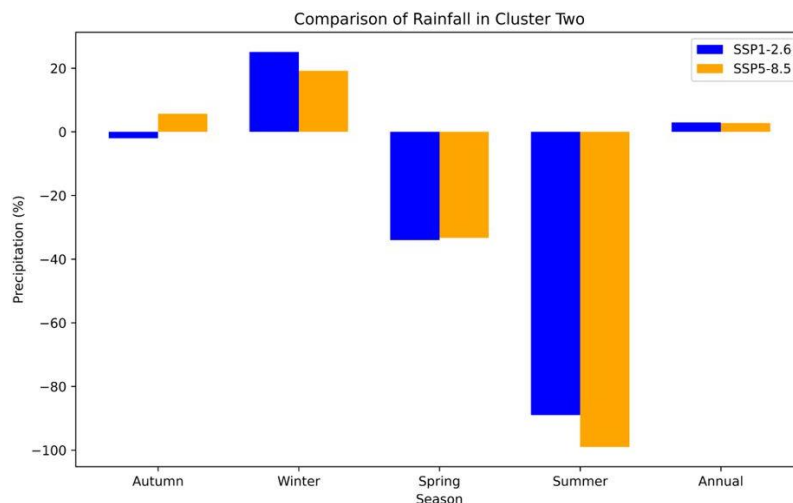


شکل ۴. بارندگی سالانه در دوره آینده در استان ایلام تحت سناریو SSP5-8.5

همانطور که در جدول ۵ نیز بیان شد، متوسط بارندگی سالانه در دوره مشاهداتی در خوشه یک و دو به ترتیب برابر با ۳۱۶/۵۱ و ۴۳۱/۱۱ میلیمتر در سال می‌باشد. همچنین، نتایج مدل‌ها نشان می‌دهد برای دوره آینده (۱۳۹۷-۱۴۲۷) برای خوشه یک، طبق سناریو SSP1-2.6 میانگین بارندگی سالانه ۴/۱ درصد کاهش یافته و به ۳۰۳/۵۲ میلیمتر در خواهد رسید و طبق سناریو SSP5-8.5 این کاهش ۴/۷ درصد بوده و میزان بارندگی سالانه طی این دوره ۲۰۱/۵۶ میلیمتر در سال خواهد بود. برای خوشه دو، طبق دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۳ و ۲/۸ درصد افزایش خواهد یافت و از میزان ۴۳۱/۱۱ به ۴۴۴/۰۴ و ۴۴۳/۳۱ میلیمتر در سال خواهد رسید. علاوه بر این، در شکل ۵، مقایسه‌ای میان بارندگی فصلی و سالانه دوره آینده استان ایلام در هر یک از دو خوشه و نسبت به دوره مشاهداتی صورت گرفته است. همانطور که مشخص است، نتایج نشان می‌دهد در خوشه شماره یک، میزان میانگین بارندگی سالانه، فصلی پاییز، بهار و تابستان (تحت سناریو SSP1-2.6) در دوره آینده با کاهش روبرو می‌شود و میانگین بارندگی فصل زمستان و فصل تابستان (تحت سناریو SSP5-8.5) افزایش خواهد یافت. برای خوشه شماره دو، میانگین بارندگی فصل پاییز (سناریو SSP5-8.5)، فصل زمستان و سالانه، افزایش خواهد یافت و طی فصل پاییز (تحت سناریو SSP1-2.6)، فصل بهار و فصل تابستان بارندگی کاهش خواهد یافت.



شکل ۵ الف. مقایسه میانگین بارندگی سالانه و فصلی خوشه شماره یک طی دوره پایه و آینده



شکل ۵ ب. مقایسه میانگین بارندگی سالانه و فصلی خوشه شماره دو طی دوره پایه و آینده

با مشخص شدن بارندگی روزانه برای دوره آینده، ۱۱ شاخص CLIMDEX (بیان شده در جدول ۳) برای دو خوشه استان ایلام تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 محاسبه و توزیع تجربی آن‌ها رسم شد. در این راستا، به منظور تسهیل امکان مقایسه شاخص‌ها طی دوره پایه و آینده و تعیین تغییرات ایجاد شده در توزیع تجربی شاخص‌ها طی دوره آینده و تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5، میانگین و انحراف از معیار ۱۱ شاخص طی دو دوره پایه و آینده برای هر یک از خوشه‌ها در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶. میانگین و انحراف معیار ۱۱ شاخص CLIMDEX طی دوره پایه و آینده

		خوشه ۲				خوشه ۱						شاخص
		SSP1-2.6		OBS		SSP1-2.6		OBS				
SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	SD	MEAN	
۳۳/۸۴	۱۹۳/۴۳	۴۷/۰۹	۱۵۵/۷۴	۲۹/۹۲	۱۶۴/۲۵	۳۴/۵۹	۲۰۶/۱۵	۵۲/۷۱	۱۸۸/۵۸	۳۳/۲۵	۱۹۱/۸۵	CDD
۱/۱۹	۴/۳۸	۱/۹۳	۴/۹۶	۱/۳۳	۴/۲۵	-۰/۷۷	۳/۳۱	۱/۱۱	۲/۹۶	۱/۰۱	۲/۷۸	CWD
۱۳۱/۶۸	۴۷۱/۱۵	۱۸۶/۱۸	۴۶/۵۷	۱۲۳/۲	۳۵۸/۷۸	۱۱۶/۳۶	۳۱۶/۱۷	۱۴۲/۸۸	۲۸۴/۲۵	۱۲۴/۳۸	۳۰۵/۸	PRCPTOT
۴/۴	۱۵/۹۶	۶/۶۲	۱۶/۱۷	۴/۷۸	۱۳/۲۸	۳/۷۷	۱۱/۰۲	۴/۷۷	۱۰/۱۱	۴/۴۲	۱۰/۵۳	R10mm
۲/۷	۸/۰۶	۱/۸۲	۷/۲۲	۲/۷۱	۵/۵۵	۲/۷۶	۵/۷۸	۳/۲۶	۴/۹۳	۳/۱۵	۵/۵۸	R20mm
۱/۰۶	-۰/۹۳	-۰/۸۲	-۰/۶۵	-۰/۸۶	-۰/۶۴	-۰/۹۲	-۰/۶	-۰/۷۶	-۰/۴۶	۱/۱	-۰/۷۹	R50mm
۷۵/۵۶	۸۶/۰۲	۸۳/۳۴	۸۸/۲	۷۰/۸۳	۸۵/۶۷	۶۲/۷۶	۵۴/۰۱	۶۹/۲۷	۵۱/۲۷	۵۶/۴۹	۵۶/۷۸	R95p
۴۰/۸۱	۳۳/۰۵	۴۶/۳۷	۲۷/۰۷	۴۵/۶۶	۲۲/۵۳	۳۲/۱۲	۱۳/۵۱	۲۷/۰۸	۱۴/۰۵	۳۳/۰۴	۱۵/۳۴	R99p
۱۵/۱۵	۵۲/۸۷	۱۸/۴۸	۴۸/۸۸	۱۹/۳	۴۸/۳	۱۶/۰۳	۴۸/۹۷	۱۵/۴۳	۴۲/۸۳	۱۸/۳۴	۴۹/۱۶	RX1day
۲۶/۸۶	۱۰۳/۶۹	۳۶/۸۷	۹۰/۵۱	۳۱/۶۹	۷۳/۳۶	۲۸/۲۴	۸۶/۳۵	۳۱/۰۹	۷۱/۰۹	۳۳/۶۷	۷۱/۵۴	RX5day
۳/۹۲	۱۵/۰۳	۳/۳۶	۱۲/۸۸	۴/۱۲	۱۰/۸۸	۴/۴	۱۶/۳۶	۳/۸۹	۱۴/۰۱	۵/۷۱	۱۴/۶۹	SDII

با توجه به جدول ۶ برای خوشه شماره یک و تحت سناریو SSP1-2.6 مشاهده می‌شود که میانگین تمامی شاخص‌ها به غیر از شاخص CWD نسبت به دوره پایه کاهش یافته است و نشان دهنده کاهش تعداد روزهای خشک و افزایش روزهای تر می‌باشد و در مجموع تعداد روزها با بارندگی سنگین و بیش از اندازه سنگین کاهش یافته است و برای SSP5-8.5، میانگین شاخص‌های CDD، CWD، PRCPTOT، R20mm و R10mm افزایش و میانگین باقی شاخص‌ها کاهش یافته است. این امر نشان می‌دهد که تحت سناریو SSP5-8.5 شدت بارندگی روزانه کاهش یافته اما تعداد روزهای تر و مجموع بارندگی افزایش یافته است. برآزش خوشه شماره

دو، تحت سناریو SSP1-2.6 نسبت به دوره پایه، میانگین تمامی شاخص‌ها بجز شاخص CDD افزایش یافته است و نشان‌دهنده کاهش روزهای خشک متوالی و افزایش تعداد روزهای بارانی، شدت و مقدار بارندگی در روزهای تر می‌باشد. تحت سناریو SSP5-8.5، میانگین تمامی شاخص‌ها افزایش یافته است و با توجه به افزایش چشمگیر تعداد روزهای خشک متوالی و افزایش شدت بارندگی، می‌توان نتیجه گرفت که بارندگی‌های سیل آسا عموماً افزایش یافته است.

پس از مشخص شدن بارندگی روزانه دوره آینده استان ایلام، حداکثر بارندگی ۲۴ ساعته ۱۱ ایستگاه در سطح استان مورد بررسی قرار گرفت. در همین راستا، در ابتدا چهار آزمون Pettitt's (همگن بودن داده‌ها)، Wald-Wolfowitz (ایستا بودن داده‌ها)، Mann-Kendall (بی‌روند بودن داده‌ها) و Wallis and Moore (تصادفی بودن داده‌ها) بر داده‌ها پیاده‌سازی شد که نتایج آن‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷. مقدار p-value آزمون‌های نام برده شده روی حداکثر بارندگی دوره مشاهداتی و آینده

ایستگاه	سناریو	آزمون همگن بودن داده‌ها (Pettitt)	آزمون ایستا بودن داده‌ها (Wald-Wolfowitz)	آزمون بی‌روند بودن داده‌ها (Mann-Kendall)	آزمون تصادفی بودن داده‌ها (Wallis and Moore)
۱	OBS	۰/۷۲	۰/۷۲	۰/۱۸	۰/۷۴
	SSP1-2.6	۰/۶۵	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۵۰
	SSP5-8.5	۰/۶۳	۰/۸۹	۰/۱۸	۰/۳۲
۲	OBS	۰/۶۲	۰/۶۲	۰/۲۵	۰/۲۸
	SSP1-2.6	۰/۶۶	۰/۶۲	۰/۶۶	۰/۵۰
	SSP5-8.5	۰/۲۴	۰/۹۳	۰/۲۰	۰/۱۸
۳	OBS	۰/۱۷	۰/۲۵	۰/۸۳	۰/۷۰
	SSP1-2.6	۰/۶۵	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۵۰
	SSP5-8.5	۰/۶۳	۰/۶۰	۰/۱۸	۰/۳۲
۴	OBS	۰/۸۲	۰/۶۳	۱	۰/۷۵
	SSP1-2.6	۰/۸۰	۰/۲۹	۱	۰/۳۹
	SSP5-8.5	۰/۷۳	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۳۵
۵	OBS	۰/۲۴	۰/۷۵	۰/۱۲	۰/۷۹
	SSP1-2.6	۰/۹۰	۰/۲۱	۰/۸۳	۰/۲۳
	SSP5-8.5	۰/۷۳	۰/۵۸	۰/۴۷	۰/۳۵
۶	OBS	۰/۹۷	۰/۵۰	۱	۰/۵۱
	SSP1-2.6	۰/۶۸	۰/۱۷	۰/۶۱	۰/۲۹
	SSP5-8.5	۰/۷۳	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۳۵
۷	OBS	۰/۵۲	۰/۸۸	۰/۵۵	۰/۷۴
	SSP1-2.6	۰/۶۵	۰/۶۴	۰/۶۵	۰/۵۰
	SSP5-8.5	۰/۴۶	۰/۵۶	۰/۴۰	۰/۴۶
۸	OBS	۰/۷۳	۰/۳۳	۰/۸۴	۰/۳۹
	SSP1-2.6	۰/۳۱	۰/۲۸	۰/۲۲	۰/۸۱
	SSP5-8.5	۰/۷۳	۰/۵۶	۰/۴۷	۰/۳۵
۹	OBS	۰/۸۴	۰/۷۸	۰/۷	۰/۳۷
	SSP1-2.6	۰/۸۲	۰/۲۲	۰/۸۱	۰/۲۳
	SSP5-8.5	۰/۷۳	۰/۵۷	۰/۴۷	۰/۳۵
۱۰	OBS	۰/۳۰	۰/۰۲	۰/۳۰	۰/۳۴
	SSP1-2.6	۰/۹۰	۰/۲۱	۰/۸۳	۰/۲۳

0/35	0/47	0/54	0/73	SSP5-8.5	۱۱
0/40	0/87	0/85	0/54	OBS	
0/50	0/64	0/61	0/64	SSP1-2.6	
0/94	0/55	0/53	0/57	SSP5-8.5	

لازم به ذکر است که فرض صفر هر یک از آزمون‌های Pettitt's, Wald-Wolfowitz, Mann-Kendall و Wallis and Moore به ترتیب این است که داده‌ها همگن هستند، داده‌ها ایستا و مستقل هستند، داده‌ها از یک روند مونوتونیک برخوردار نیستند و داده‌ها تصادفی هستند. پس از تعیین نتایج آزمون‌ها و بررسی شرط اولیه، توابع احتمالاتی بر داده‌های هر یک از ایستگاه‌ها در دوره مشاهداتی و آینده برازش داده شد و با استفاده از دو آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ، برترین توابع احتمالاتی تعیین شدند تا حداکثر بارندگی هر یک از ایستگاه‌ها به ازای دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله تعیین شوند که در جدول ۸ نتایج دو آزمون برای برترین توابع برازش داده شده نشان داده شده است.

جدول ۸. نتایج آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و اندرسون-دارلینگ برای تعیین برترین توابع توزیع برازش یافته

مقدار بحرانی آزمون اندرسون- دارلینگ ($\alpha = 0/1$)	آماره اندرسون-دارلینگ			آماره کولموگروف-اسمیرنوف (p-value)			نتایج توزیع احتمالاتی	ایستگاه
	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	OBS	SSP5- 8.5	SSP1- 2.6	OBS		
۱/۹۲	0/26	0/74	0/46	0/05 (0/90)	0/05 (0/60)	0/05 (0/79)	Johnson SB	۱
	0/28	0/72	0/60	0/05 (0/89)	0/06 (0/54)	0/11 (0/26)	Log Pearson (3P)	۲
	0/50	0/28	0/25	0/05 (0/91)	0/03 (0/98)	0/06 (0/91)	Johnson SB	۳
	0/52	0/95	0/29	0/04 (0/59)	0/10 (0/28)	0/07 (0/91)	Inv Gaussian (3P)	۴
	0/87	0/87	0/21	0/08 (0/22)	0/09 (0/21)	0/05 (0/98)	Fatigue Life (3P)	۵
	0/53	0/55	0/36	0/06 (0/79)	0/05 (0/85)	0/06 (0/82)	Gen Pareto	۶
	0/28	0/28	۱/۷۱	0/03 (0/98)	0/03 (0/98)	0/۱۷ (0/08)	Johnson SB	۷
	0/21	0/21	0/23	0/06 (0/98)	0/06 (0/98)	0/07 (0/98)	Inv Gaussian (3P)	۸
	0/88	0/88	0/48	0/09	0/09	0/08	Pearson 5 (3P)	۹

				(-./۲۲)	(-./۲۳)	(-./۵۷)		
	۰./۴۴	۰./۴۴	۰./۵۰	۰./۰۵	۰./۰۵	۰./۰۶	Gen Pareto	۱۰
				(-./۸۷)	(-./۸۷)	(-./۵۳)		
	۰./۲۰	۰./۱۷	۰./۵۵	۰./۰۲	۰./۰۳	۰./۰۸	Wakeby	۱۱
				(-./۹۹)	(-./۹۸)	(-./۷۷)		

در جداول ۹ تا ۱۱ نیز نتایج حداکثر بارندگی استخراج شده از توابع احتمالاتی به ترتیب طی دو دوره مشاهداتی و آینده (تحت هر دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5) تحت دوره بازگشت‌های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۹. حداکثر بارندگی روزانه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف در دوره پایه

دوره بازگشت							تابع توزیع احتمالاتی	ایستگاه
۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲		
۱۱۵/۷۴	۸۵/۸۰	۷۵/۲۰	۶۴/۳۳	۵۰/۴۰	۴۰/۷۰	۲۹/۸۱	Johnson SB	۱
۱۰۷/۵۴	۷۹/۸۱	۷۲/۵۱	۶۵/۶۱	۵۶/۹۱	۵۰/۴۰	۴۱/۵۲	Log Pearson (3P)	۲
۸۹/۹۰	۸۱/۸۳	۷۷/۲۳	۷۱/۱۱	۶۰/۳۲	۵۰/۴۰	۳۶/۶۰	Johnson SB	۳
۱۸۲/۳۱	۱۲۴/۹۰	۱۰۹/۲۲	۹۴/۳۰	۷۶/۵۲	۶۴/۶۱	۵۱/۴۰	Inv Gaussian (3P)	۴
۱۸۸/۷۱	۱۳۱/۰۰	۱۱۴/۳۱	۹۷/۸۰	۷۶/۹۱	۶۲/۲۱	۴۴/۹۰	Fatigue Life (3P)	۵
۹۳/۵۲	۷۹/۳۴	۷۳/۷۰	۶۷/۵۱	۵۷/۹۱	۴۹/۵۱	۳۶/۷۲	Gen Pareto	۶
۱۱۶/۹۳	۱۰۹/۲۵	۱۰۴/۵۰	۹۷/۷۲	۸۵/۵۰	۷۳/۶۱	۵۶/۹۱	Johnson SB	۷
۱۵۲/۰۰	۹۸/۴۱	۸۴/۲۰	۷۱/۴۲	۵۶/۸۲	۴۷/۹۰	۳۹/۳۱	Inv Gaussian (3P)	۸
۵۰/۰۰	۱۸۵/۶۰	۱۴۰/۴۱	۱۰۷/۶۳	۷۷/۷۰	۶۱/۸۳	۴۶/۸۰	Pearson 5 (3P)	۹
۱۹۱/۸۱	۱۲۳/۱۰	۱۰۵/۵۴	۸۹/۱۰	۶۶/۱۰	۵۵/۲۱	۴۸/۲۳	Gen Pareto	۱۰
۱۵۴/۵۰	۸۹/۶۰	۷۵/۳۳	۶۲/۶۰	۴۹/۰۰	۴۰/۱۱	۳۰/۱۱	Wakeby	۱۱

جدول ۱۰. حداکثر بارندگی روزانه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آینده و تحت سناریو SSP1-2.6

دوره بازگشت							تابع توزیع احتمالاتی	ایستگاه
۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲		
۷۵/۸۳	۶۳/۰۰	۵۷/۹۲	۵۲/۲۰	۴۳/۷۴	۳۶/۸۱	۲۷/۳۱	Johnson SB	۱
۱۲۰/۴۹	۱۱/۲۲	۷۱/۳۱	۶۲/۱۲	۵۰/۹۰	۴۲/۹۲	۳۲/۳۲	Log Pearson (3P)	۲
۷۷/۳۱	۶۴/۶۲	۵۹/۵۱	۵۳/۸۱	۴۵/۲۰	۳۰/۲۰	۲۸/۴۱	Johnson SB	۳
۱۳۸/۵۲	۹۷/۵۱	۸۶/۱۱	۷۵/۰۰	۶۲/۰۰	۵۳/۱۰	۴۲/۷۲	Inv Gaussian (3P)	۴
۱۴۱/۴۲	۱۰۳/۴۱	۹۲/۱۲	۸۱/۳۲	۶۷/۳۱	۵۷/۳۰	۴۴/۹۱	Fatigue Life (3P)	۵
۸۴/۶۲	۷۴/۴۰	۷۰/۲۳	۶۵/۳۱	۵۷/۶۲	۵۰/۶۱	۳۹/۶۰	Gen Pareto	۶
۱۱۰/۵۱	۹۳/۴۳	۸۶/۴۱	۷۸/۶۳	۶۶/۹۱	۵۷/۲۲	۴۳/۵۰	Johnson SB	۷
۶۸/۲۲	۵۶/۸۲	۵۳/۴۴	۴۹/۹۱	۴۵/۴۰	۴۱/۸۲	۳۶/۷۳	Inv Gaussian (3P)	۸
۲۳۹/۴۹	۱۲۵/۵۱	۱۰۴/۲۰	۸۶/۹۲	۶۸/۹۲	۵۸/۱۲	۴۵/۹۲	Pearson 5 (3P)	۹
۱۰۵/۳۴	۹۱/۴۱	۸۵/۹۱	۷۹/۴۳	۶۹/۵۱	۶۰/۶۰	۴۶/۸۴	Gen Pareto	۱۰
۶۹/۸	۵۴/۶۲	۴۹/۵۲	۴۴/۱۱	۳۶/۷۱	۳۰/۶۰	۲۲/۲۴	Wakeby	۱۱

جدول ۱۱. حداکثر بارندگی روزانه به ازای دوره بازگشت‌های مختلف در دوره آینده و تحت سناریو SSP5-8.5

ایستگاه	تابع توزیع احتمالاتی	دوره بازگشت						
		۱۰۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵	۲
۱	Johnson SB	۸۳/۵۲	۷۲/۲۲	۶۶/۸۲	۶۰/۱۱	۴۹/۶۱	۴۱/۱۰	۳۰/۴۲
۲	Log Pearson (3P)	۱۴۴/۹۰	۹۳/۲۱	۸۰/۹۰	۶۹/۸۲	۵۶/۸۲	۴۷/۸۳	۳۶/۴۱
۳	Johnson SB	۸۵/۱۲	۷۳/۹۳	۶۸/۴۳	۶۱/۷۳	۵۱/۲۱	۴۲/۵۳	۳۱/۶۲
۴	Inv Gaussian (3P)	۱۲۷/۳۳	۸۵/۳۰	۷۳/۶۰	۶۲/۵۴	۴۸/۹۲	۳۹/۷۱	۲۹/۰۰
۵	Fatigue Life (3P)	۱۳۵/۷۳	۹۴/۷۴	۸۲/۷۲	۷۰/۹۵	۵۵/۹۹	۴۵/۲۲	۳۲/۲۲
۶	Gen Pareto	۸۱/۲۲	۶۷/۴۳	۶۲/۲۵	۵۶/۳۲	۴۷/۵۳	۳۹/۸۲	۲۸/۴۱
۷	Johnson SB	۱۲۱/۲۳	۱۰۷/۳۲	۱۰۰/۳۴	۹۱/۵۱	۷۷/۴۱	۶۵/۴۴	۵۰/۲۳
۸	Inv Gaussian (3P)	۸۸/۵۳	۵۹/۲۱	۵۱/۱۳	۴۳/۳۴	۳۳/۸۱	۲۷/۳۳	۱۹/۷۳
۹	Pearson 5 (3P)	۲۴۶/۳۶	۱۱۸/۲۲	۹۴/۹۳	۷۶/۲۳	۵۶/۹۱	۴۵/۵۱	۳۲/۹۱
۱۰	Gen Pareto	۱۰۱/۶۲	۸۲/۶۳	۷۵/۶۲	۶۷/۹۲	۵۶/۷۲	۴۷/۲۰	۳۳/۲۳
۱۱	Wakeby	۹۶/۰۰	۶۷/۳۴	۵۹/۴۴	۵۱/۷۰	۴۲/۱۲	۳۵/۱۰	۲۶/۳۲

با بررسی نتایج درج شده در جداول ۹ تا ۱۱ مشخص می‌شود که تحت سناریو SSP1-2.6، حداکثر بارندگی روزانه در ایستگاه شماره ۲ برای دوره بازگشت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ سال به ترتیب ۱/۷۵، ۱۲/۴۷ درصد، برای ایستگاه شماره ۶ و تحت دوره بازگشت ۲ و ۵ ساله به ترتیب ۷/۹ و ۲/۲۲ درصد و در ایستگاه شماره ۱۰ برای دوره بازگشت‌های ۲، ۵ و ۱۰ سال به ترتیب ۲۲/۴۲، ۹/۷۸ و ۰/۵۸ درصد افزایش می‌یابد و در باقی حالت‌ها حداکثر بارندگی روزانه کاهش یافته است. تحت سناریو SSP5-8.5، حداکثر بارندگی روزانه در ایستگاه شماره ۱ و در دوره بازگشت ۲ و ۵ سال به ترتیب ۲/۰۱ و ۰/۹۸ درصد، برای ایستگاه شماره دو و تحت دوره بازگشت ۲۵ تا ۱۰۰۰ سال به ترتیب ۶/۴، ۱۱/۵۹، ۱۶/۷۹ و ۳۴/۷۹ درصد و در ایستگاه شماره ۷ و در دوره بازگشت ۱۰۰۰ ساله حداکثر بارندگی روزانه ۳/۶۸ درصد افزایش یافته است. نتایج حاصل از این پژوهش با تحقیق انجام شده توسط توکلی و همکاران (۲۰۱۸) همخوانی دارد. در پژوهش مذکور نیز به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه آبخیز سد ایلام در سه دوره شبیه‌سازی تا سال ۲۰۹۹ پرداخته شد. نتایج پژوهش نیز نشان داد که میانگین دراز مدت بارش تا سال ۲۰۹۹ نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. در پژوهش دیگری توسط رضایی اعتدالی و همکاران (۲۰۲۲)، چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی استان ایلام بررسی شد که در این تحقیق نیز بر کاهش مقدار بارش در این استان تأکید شده و بیان گردید که در شرایط اقلیمی آینده برای دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۱۰۰، کاهش بارش ۶/۸ درصدی محتمل خواهد بود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی اثر تغییر اقلیم بر تغییر الگوی بارندگی استان ایلام از برون‌داد ۱۲ مدل اقلیمی گزارش ششم تغییر اقلیم موسوم به مدل‌های CMIP6 بهره گرفته شد و پس از انتخاب برترین مدل‌ها، بارندگی روزانه تا انتهای سال ۲۰۴۹ با استفاده از مدل IPSL-CM6A-LR برای موقعیت مکانی ایستگاه‌های خوشه شماره یک و از مدل IITM-ESM برای موقعیت مکانی ایستگاه‌های خوشه شماره دو، تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج گردید و با استفاده از تابع توزیع برنولی-لوگ نرمال ریزمقیاس‌نمایی شد. پس از تعیین بارندگی روزانه تا انتهای سال ۲۰۴۹ تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5، تغییرات میانگین بارندگی سالانه و فصلی دوره آینده (۲۰۴۹-۲۰۱۵) تحت دو سناریو نام برده شده نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۵) تعیین گردید. نتایج نشان داد که متوسط بارندگی سالانه در دوره مشاهداتی در خوشه یک و دو به ترتیب برابر با ۳۱۶/۵ و ۴۳۱/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد که برای

خوشه یک، طبق سناریو SSP1-2.6 میانگین بارندگی سالانه تا سال ۲۰۴۹، ۴/۱ درصد کاهش یافته و به ۳۰۳/۵۲ میلیمتر در سال خواهد رسید و طبق سناریو SSP5-8.5 این کاهش ۴/۷ درصد بوده و میزان بارندگی سالانه طی این دوره ۳۰۱/۵۶ میلیمتر در سال خواهد بود. برای خوشه دو، طبق دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 میانگین بارندگی سالانه به ترتیب ۳ و ۲/۸ درصد تا سال ۲۰۴۹ افزایش خواهد یافت و از میزان ۴۳۱/۱۰ به ۴۴۴/۰۴ و ۴۴۳/۳۱ میلیمتر در سال خواهد رسید. همچنین نتایج نشان داد، در خوشه شماره یک، میزان میانگین بارندگی سالانه، فصلی پاییز و بهار در دوره آینده با کاهش روبرو می‌شود و میانگین بارندگی فصل زمستان افزایش خواهد یافت. برای خوشه شماره دو، میانگین بارندگی سالانه، فصل زمستان و فصل پاییز در سناریو SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت و طی فصل پاییز تحت سناریو SSP1-2.6 و بهار بارندگی کاهش خواهد یافت.

با توجه به نتایج این پژوهش، تغییر اقلیم در استان ایلام منجر به کاهش بارش و در نتیجه به خطر افتادن منابع آب این استان می‌گردد. لذا پیشنهاد می‌شود تا سناریوهای مقابله و سازگاری با پدیده اقلیم در این استان با رویکرد کاهش بارش‌ها تهیه و تدوین گردد تا بتوان مدیریت پایدار منابع آب را در سال‌های مواجهه با کم آبی محقق نمود.

"هیچگونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد"

مراجع

- بایرزاده، کاوه؛ سیدکابلی، حسام و نجفی، لیلا (۱۴۰۱). مطالعه مقایسه‌ای روش‌های نگاشت چندک برای تصحیح اریبی داده‌های بارش با تحلیل ERA5. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۹ (۲)، ۲۱-۳۴.
- بهزادی، فرهاد؛ جوادی، سامان؛ یوسفی، حسین؛ مریدی، علی و هاشمی شاهدانی، سید مهدی (۱۴۰۱). تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی آب زیرزمینی با استفاده از برونداد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت شهرکرد). *اکوهیدرولوژی*. ۹ (۲)، ۴۱۹-۴۳۶.
- پرینز، وحیده و اسماعیلی، عبدالکریم (۱۳۸۷). مقایسه روش‌های مختلف جهت پیش‌بینی واردات ادویه‌جات در ایران مطالعه موردی دارچین، هل و زردچوبه. *اقتصاد کشاورزی و توسعه*. ۱۶ (۶۴)، ۱۹-۴۰.
- توکلی، محسن؛ کریمی، حاجی و نورالهی، هادی (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب حوزه آبخیز سد ایلام. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۰ (۲)، ۱۵۷-۱۷۰.
- جهانگیر، محمد حسین و محمدی، علی (۱۳۹۷). پهنه‌بندی دما و بارش استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل ریزمقیاس LARS-WG برای سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۶۵. *فصلنامه جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)*. ۸ (۳۰)، ۱۱۹-۱۳۰.
- خادمی، مهسا؛ معینی، حمید؛ بنکداری، حسین و ابتهج، عیسی (۱۳۹۶). تأثیر تفاضل گیری در ایستایی و دقت مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی تراز سطح دریاچه. *مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*. ۳۴ (۳)، ۵۹-۷۶.
- رستم نیا، محمد و آخوندزاده هنزائی، مهدی (۱۳۹۵). بررسی خشکیدگی مخاطره آمیز درختان جنگلی استان ایلام با استفاده از تصاویر ماهواره لندست. *علوم و فنون نقشه برداری*. ۶ (۲)، ۱۴۴-۱۳۱.
- رمضانی اعتدالی، هادی؛ خدابخشی، فریبا و کنعانی، الهه (۱۴۰۱). چشم‌انداز اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی بر اساس گزارش پنجم IPCC (مطالعه موردی شهر ایلام). *نشریه حفاظت منابع آب و خاک*. ۱ (۱۲)، ۸۷-۱۰۷.
- صادقی، سیدهادی؛ قاسمیه، هدی و ساداتی نژاد، سیدجواد (۱۳۹۴). ارزیابی کارایی مدل هیدرولوژیکی IHACRES در مناطق مرطوب (مطالعه موردی حوزه ناورود، گیلان). *علوم آب و خاک*. ۱۹ (۷۳)، ۸۳-۷۳.

عسگری، شمس اله؛ رضیئی، طیب؛ جعفری، محمدرضا و نوروزی، علی اکبر (۱۴۰۴). بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی در خشکیدگی جنگل های بلوط محدوده استان ایلام. *نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*. ۲۵ (۷۶)، ۳۰۸-۳۲۵.

فغانی، منیره؛ قربانی، خلیل و سالاری جزی، میثم (۱۳۹۵). تحلیل تغییرات زمانی- مکانی خشکسالی های فصلی هواشناسی. *هواشناسی کشاورزی*. ۱۱-۱ (۱)۴.

کریمی احمدآباد، مصطفی و نبی زاده، عادل (۱۳۹۷). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سالهای ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل LARS-WG. *جغرافیا و برنامه ریزی*. ۲۲ (۶۵)، ۲۶۵-۲۸۵.

محمدی، پروا؛ فاخری فرد، احمد؛ دین پژوه، یعقوب و اسدی، اسماعیل (۱۳۹۶). پهنه بندی تأثیر بارش های فصلی بر عملکرد دیم در شرق دریاچه ارومیه با روش وارد و K-means. *اکوهیدرولوژی*. ۴ (۲)، ۴۸۹-۴۹۸.

مرتضی پور، سامان؛ اسعدی اسکویی، ابراهیم و عباسی، فائزه (۱۳۹۹). ارزیابی کارایی چند آزمون همگنی در شناسایی جهش در داده های اقلیمی دما، بارش و فشار؛ مطالعه موردی: ایستگاه فرودگاهی رشت. *نیوار*. ۴۴ (۱۰۸-۱۰۹)، ۱۲-۳۲.

ناظری تهرودی، محمد و رضانی، یوسف (۱۳۹۷). تحلیل فراوانی خشکی رودخانه با استفاده از توزیع های آماری رایج و پیشرفته، مطالعه موردی: رودخانه های غرب دریاچه ارومیه. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۰ (۳)، ۳۰۴-۳۱۷.

ناظری تهرودی، محمد؛ خلیلی، کیوان و بهمنش، جواد (۱۳۹۴). ارزیابی توابع توزیع آماری رایج و روش های محاسبه پارامترهای آنها در برآورد احتمال رویدادهای خشکسالی هیدرولوژیکی (مطالعه موردی: رودخانه های غرب حوضه دریاچه ارومیه). *دانش آب و خاک*. ۲۵ (۳)، ۱۵۵-۱۶۸.

References

Adnan, S., & Ullah, K. (2022). Long-term trends in climate parameters and multiple indices for drought monitoring over Pakistan. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(4), 75.

Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzan, M. (2024). Projected Climate Change Impacts on the Number of Dry and Very Heavy Precipitation Days by Century's End: A Case Study of Iran's Metropolises. *Water*, 16(16), 2226.

Alam, M. S., & Paul, S. (2020). A comparative analysis of clustering algorithms to identify the homogeneous rainfall gauge stations of Bangladesh. *Journal of Applied Statistics*, 47(8), 1460-1481.

Alexander, L. V. (2016). Global observed long-term changes in temperature and precipitation extremes: A review of progress and limitations in IPCC assessments and beyond. *Weather and Climate Extremes*, 11, 4-16.

Asgari, Shamsollah., Raziei, Tayeb., Jafari, Mohamad Reza., Noroozi., Ali Akbar. (2025). The effects of meteorological drought on oak forest dieback in Ilam province. *Applied Researches in Geographical Sciences*, 76(25), 308-325. (In Persian)

Bapirzadeh, K., SeyedKaboli, H., & Najafi, L. (2022). A comparative study of quantitative mapping methods for bias correction of ERA5 reanalysis precipitation data. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(2): 21-34. (In Persian)

Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A., ... & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14(1), 5027.

Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Moridi, A., & Hashemy Shahdany, S. M. (2022). Determining the Impact of Climate Change on Groundwater Drought Using CMIP6 Models (Case Study: Shahrekord Plain). *Iranian journal of Ecohydrology*, 9(2), 419-436. (In Persian)

- Behzadi, F., Yousefi, H., Javadi, S., Moridi, A., Shahedany, S. M. H., & Neshat, A. (2022). Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1297-1315.
- Cabana, D., Rölfer, L., Evadzi, P., & Celliers, L. (2023). Enabling climate change adaptation in coastal systems: A systematic literature review. *Earth's Future*, 11(8), e2023EF003713.
- Cetin, M. (2020). The changing of important factors in the landscape planning occur due to global climate change in temperature, Rain and climate types: A case study of Mersin City. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 8(12), 2695-2701.
- De Jong, P., Tanajura, C. A. S., Sánchez, A. S., Dargaville, R., Kiperstok, A., & Torres, E. A. (2018). Hydroelectric production from Brazil's São Francisco River could cease due to climate change and inter-annual variability. *Science of the Total Environment*, 634, 1540-1553.
- Elnashar, W., & Elyamany, A. (2023). Managing risks of climate change on irrigation water in arid regions. *Water Resources Management*, 37(6), 2429-2446.
- El-Rawy, M., Batelaan, O., Al-Arifi, N., Alotaibi, A., Abdalla, F., & Gabr, M. E. (2023). Climate change impacts on water resources in arid and semi-arid regions: a case study in Saudi Arabia. *Water*, 15(3), 606.
- Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401-419.
- Faghani, M., Ghorbani, K., & Salarijazi, M. (2016). Spatial-temporal analysis of seasonal meteorological drought. *Journal of Agricultural Meteorology*, 4(1), 1-11. (In Persian)
- Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18, 2069-2094.
- Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024013.
- Gudmundsson, L., Bremnes, J. B., Haugen, J. E., & Skaugen, T. E. (2012). Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping—a comparison of methods. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 9(5), 6185-6201.
- Islam, M. R., Fereshtehpour, M., Najafi, M. R., Khaliq, M. N., Khan, A. A., Sushama, L., ... & Khan, M. S. (2024). Climate-resilience of dams and levees in Canada: a review. *Discover Applied Sciences*, 6(4), 174.
- Jahangir, M. H., & Mohammadi, A. (2018). Climatic zoning of East Azerbaijan by LARS-WG down scaling model for 2011-2065. *Geography (Regional Planning)*, 8(30), 119-130. (In Persian)
- Karimi Ahmad Abad, M., & Nabizadeh, A. (2018). assessment of climate change impacts on climate parameters of Urmia Lake basin during 2011-2040 years by using LARS-WG model. *Journal of Geography and Planning*, 22(65), 265-285. (In Persian)
- Khademi, M., Moeini, H., Bonakdari, H., & Ebtehaj, I. (2017). The Effect of Differencing in Stationary and Accuracy of Time Series in Predicting of Lake Level. *Journal of Water and Soil Conservation*, 24(3), 59-76. (In Persian)
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.
- Kuttippurath, J., Murasingh, S., Stott, P. A., Sarojini, B. B., Jha, M. K., Kumar, P., ... & Pandey, P. C. (2021). Observed rainfall changes in the past century (1901–2019) over the wettest place on Earth. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024018.
- Lee, D., Lee, G., Kim, S., & Jung, S. (2020). Future runoff analysis in the Mekong river basin under a climate change scenario using deep learning. *Water*, 12(6), 1556.

- Li, Q., Ye, A., Wada, Y., Zhang, Y., & Zhou, J. (2024). Climate change leads to an expansion of global drought-sensitive area. *Journal of Hydrology*, 632, 130874.
- Mohammadi, A., Javadi, S., Yousefi, H., Pouraram, H., & Randhir, T. O. (2024). A Framework for Assessing Food Baskets Based on Water and Carbon Footprints. *Water*, 16(9), 1196.
- Mohammadi, P., Fakherifard, A., Dinpazhoh, Y., & Asadi, E. (2017). Regionalization of the East part of Lake Urmia Basin based on impact of seasonal precipitation on rainfed yield using the ward and K-means methods. *Iranian journal of Ecohydrology*, 4(2), 489-498. (In Persian)
- Mortezapoor, S., Asadi Oscouei, E., & Abasi, F. (2020). Evaluation of Some Homogeneity Tests on Mutation Detection in Climatic Data, Case Study: Rash Station. *Nivar*, 44(108-109), 12-32. (In Persian)
- Nazeri Tahrudi, M., & Ramezani, Y. (2018). Frequency analysis of river drought by common and advanced statistical distributions, case study: western rivers of Urmia Lake. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 304-317 (In Persian)
- Nazeri Tahrudi, M., Khalili, K., & Behmanesh, J. (2015). Evaluation of Common Statistical Distribution Functions and the Calculation Methods of Their Parameters in Order to Estimate Probability of Hydrological Drought Events (Case Study: West of Urmia Lake Basin. *Water and Soil Science*, 25(3), 155-168. (In Persian)
- Otto, F. E., Zachariah, M., Saeed, F., Siddiqi, A., Kamil, S., Mushtaq, H., ... & Clarke, B. (2023). Climate change increased extreme monsoon rainfall, flooding highly vulnerable communities in Pakistan. *Environmental Research: Climate*, 2(2), 025001.
- Parizan, V., & Esmaeili, A. (2009). The comparison of different methods for forecasting spices imports in Iran Case study: cinnamon, cardamoms and curcuma. *Agricultural Economics and Development*, 16(4), 19-40. (In Persian)
- Ramezani Etedali, H., Khodabakhshi, F., & Kanani, E. (2022). Outlook for the effects of climate change on drought according to the fifth IPCC report (case study: Ilam). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 1(12), 87-107. (In Persian)
- Raziei, T. (2022). Climate of Iran according to Köppen-Geiger, Feddema, and UNEP climate classifications. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(3), 1395-1416.
- Rostamnia, M., & Akhoondzadeh Hanzaei, M. (2016). Assessment of Hazardous Drought of Ilam Province Forests using Landsat Satellite Images. *JGST*, 6(2) :131-144. (In Persian)
- Roushangar, K., & Alizadeh, F. (2018). A multiscale spatio-temporal framework to regionalize annual precipitation using k-means and self-organizing map technique. *Journal of Mountain Science*, 15(7), 1481-1497.
- Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of computational and applied mathematics*, 20, 53-65.
- Sadeghi, S. H., Ghasemieh, H., & Sadatinegad, S. J. (2015). Performance evaluation of the IHACRES hydrological model in wet areas (case study: Navrud basin, Gillan). *Journal of Water and Soil Science*, 19(73), 73-83. (In Persian)
- Sangelantoni, L., Russo, A., & Gennaretti, F. (2019). Impact of bias correction and downscaling through quantile mapping on simulated climate change signal: a case study over Central Italy. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 725-740.
- Santos, L., Thirel, G., & Perrin, C. (2018). Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4583-4591.
- Swain, D. L., Wing, O. E., Bates, P. D., Done, J. M., Johnson, K. A., & Cameron, D. R. (2020). Increased flood exposure due to climate change and population growth in the United States. *Earth's Future*, 8(11), e2020EF001778.

Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific reports*, 10(1), 13768.

Tamm, O., Saaremäe, E., Rahkema, K., Jaagus, J., & Tamm, T. (2023). The intensification of short-duration rainfall extremes due to climate change—Need for a frequent update of intensity–duration–frequency curves. *Climate Services*, 30, 100349.

Tavakoli, M., Karimi, H., & Norollahi, H. (2018). Investigation the effects of climate change on water resources of Ilam Dam Watershed. *Watershed Engineering and Management*, 10(2), 157-170. (In Persian)

Verma, R. K., Verma, S., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2021). SCS-CN-based improved models for direct surface runoff estimation from large rainfall events. *Water Resources Management*, 35(7), 2149-2175.

Xiong, J., Guo, S., Abhishek, Chen, J., & Yin, J. (2022). Global evaluation of the “dry gets drier, and wet gets wetter” paradigm from a terrestrial water storage change perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(24), 6457-6476.

Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M., & Wang, Y. (2018). Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), 609-623.

پژوهش‌های آبخیز