



## Investigation of drought processes under climate change conditions in the future period using IPCC sixth assessment report (Case study: Qaen synoptic station)

Majid Havangi, Mahdi Amirabadizadeh, Mahdi Dastourani\*

Department of Water Sciences and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand, Iran

\*Corresponding author: [mdastourani@birjand.ac.ir](mailto:mdastourani@birjand.ac.ir)

(Received: 06 July 2024

Revised: 19 November 2024

Accepted: 11 December 2024)

### Extended abstract

**Introduction:** The phenomenon of climate change, as one of the main drivers of the increase in greenhouse gases, has a significant impact on extreme events such as floods and droughts. Therefore, investigating the impact of climate change on these extreme phenomena is crucial for the planning and management of water resources in the future. Drought, along with its effects on natural resources, agricultural production, and economic and social development, is one of the fundamental challenges facing both Iran and the world. Since drought impacts various sectors of society—such as water resources, agriculture, and industry—it is essential to monitor and assess this phenomenon both now and, in the future, to plan effectively across different sectors. Considering that previous research relied on only one AOGCM model, primarily using the fourth or fifth reports, this study utilizes five CMIP6 climate models while incorporating the sixth assessment report. This research, therefore, discusses drought forecasting under climate change conditions using five climate models and two emission scenarios at the Qaen synoptic station.

**Materials and Methods:** In this research, five large-scale models were used: ACCESS-ESM1-5, CNRM-CM6-1, HadGEM3-GC31-LL, MRI-ESM2-0, and MPI-ESM1-2-L-R. Two emission scenarios, SSP5-8.5 (pessimistic) and SSP2-4.5 (intermediate), along with the LARS-WG statistical downscaling method, were applied. First, the LARS-WG model was evaluated using the basic data. After calibrating and validating the model, temperature and precipitation parameters were produced for the future period. Then, the SPEI and SPI drought indices were calculated and analyzed for the base period (1990-2020) and the future period (2025-2055).

**Results and Discussion:** The  $bR^2$  values for the minimum and maximum temperatures were 0.99, and the RMSE values for these temperatures were 0.308 and 0.384, respectively, indicating the high accuracy of the model in downscaling temperature. For precipitation, the  $bR^2$  value was 0.74, and the RMSE was 4.001, showing the model's good performance in downscaling precipitation data for the base period. The amount of precipitation increased or decreased depending on the emission scenario and the month. The simulated average temperature in both scenarios shows an increasing trend compared to the base period. Based on the 12-month SPI index, the number of dry and wet months increased relative to the base period. Additionally, the number of normal months in the future period decreased compared to the base period in both the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. According to the SPEI index in both scenarios, the number of dry months in the future period decreased compared to the base period, while the number of wet months showed only a slight increase.

**Conclusion:** The LARS-WG model demonstrated good performance in downscaling precipitation and temperature for the future period. The results indicate an increasing trend in average downscaled temperature in both scenarios compared to the base period. Precipitation varied depending on the scenario and month. Findings revealed that the frequency of wet and dry periods on a short-term scale (6 months) was higher than on a longer time scale (12 months), suggesting that as the time scale increases, the frequency of wet and dry periods decreases, while their duration increases. Furthermore, in the future period (2025-2055), the frequency of droughts is expected to decrease, but with increased duration compared to the base period. The number of dry months in the future period will be significantly reduced, while the number of normal and wet months will increase slightly. The most severe drought, characterized by high continuity, is predicted to occur from 2045 to 2055.

**Keywords:** Temperature, precipitation, Ensemble models, Down scaling, LARS-WG, SPI and SPEI

Citation: Havangi, M., Amirabadizadeh, M. & Dastourani, M. (2025). Investigation of drought processes under climate change conditions in the future period using IPCC sixth assessment report (Case study: Qaen synoptic station). *Integrated Watershed Management*, 5(3), 36-52. doi= 10.22034/iwm.2024.2033468.1161

### Copyrights:

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to **Integrated Watershed Management**. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).





## بررسی روند خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره آتی با استفاده از گزارش ششم IPCC (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک قاین)

مجید هاونگی، مهدی امیرآبادیزاده، مهدی دستورانی\*

گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

\*نویسنده مسئول: [mdastourani@birjand.ac.ir](mailto:mdastourani@birjand.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶

### چکیده مبسوط

**مقدمه:** پدیده تغییر اقلیم به عنوان یکی از دلایل افزایش گازهای گلخانه‌ای تأثیر زیادی بر پدیده‌های حدی مانند سیل و خشکسالی دارد. لذا بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پدیده‌های حدی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی از اهمیت خاصی برخوردار است. خشکسالی و تأثیر آن بر منابع طبیعی، تولیدات کشاورزی، توسعه اقتصادی و اجتماعی یکی از چالش‌های اساسی ایران و جهان است و از آنجا که خشکسالی بخش‌های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، و غیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد، پیش و ارزیابی این پدیده در حال و آینده به منظور برنامه‌ریزی مناسب در بخش‌های مختلف جامعه امری ضروری و حائز اهمیت است. با توجه به اینکه در پژوهش‌های قبلی تنها از یک مدل AOGCM و عمدتاً با استفاده از گزارش‌های چهارم یا پنجم صورت گرفته است، در این تحقیق ضمن استفاده از مدل‌های گزارش ششم، از پنج مدل اقلیمی CMIP6 استفاده شده است. لذا در این تحقیق به پیش‌نگری خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از پنج مدل اقلیمی و دو سناریوی انتشار در ایستگاه سینوپتیک قاین پرداخته شد.

**مواد و روش‌ها:** در این تحقیق از ترکیب پنج مدل بزرگ مقیاس شامل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1، HadGEM3-GC31-LL، MRI-ESM2-0 و MPI ESM 1-2-L-R و دو سناریوی SSP5.8-5 (سناریوی بدبینانه) و SSP2.4-5 (سناریوی حد واسط) و روش ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG استفاده شد. ابتدا با استفاده از داده‌های پایه، مدل LARS-WG مورد ارزیابی قرار گرفته و پس از واسنجی و صحت‌سنجی مدل، پارامترهای دما و بارش برای دوره آتی تولید شدند؛ سپس شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPI در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) محاسبه و تحلیل گردید.

**نتایج و بحث:** مقادیر  $br^2$  برای دمای کمینه و بیشینه مقدار ۰/۹۹ به دست آمد و مقادیر RMSE برای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب ۰/۳۰۸ و ۰/۳۸۴ درجه سانتی‌گراد و ضریب نش‌ساتکلیف برای دمای کمینه و بیشینه ۰/۹۹۸ به دست آمد که نشانگر دقت بالای مدل در ریزمقیاس نمایی دمای کمینه و بیشینه می‌باشد. برای متغیر بارش مقدار  $br^2$  برابر ۰/۷۴ و مقدار RMSE برابر ۴/۰۰۱ میلی‌متر و ضریب نش‌ساتکلیف ۰/۸۳۴ به دست آمد که نشانگر عملکرد خوب مدل در ریزمقیاس‌سازی داده‌های بارش دوره پایه می‌باشد. پیش‌نگری دوره آتی نشان داد که مقدار بارش بسته به سناریوی انتشار و ماه مدنظر افزایش یا کاهش دارد و دمای میانگین ریزمقیاس‌سازی شده در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه روند صعودی دارد. بر اساس شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه، تعداد ماه‌های خشک و مرطوب نسبت به دوره پایه افزایش و تعداد ماه‌های نرمال در دوره آتی بر اساس سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 نسبت به دوره پایه کاهش داشته است در حالی که بر اساس شاخص SPEI تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی بر اساس هر دو سناریو نسبت به دوره پایه کاهش و تعداد ماه‌های مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه تغییر چندانی نداشته و به میزان یک ماه افزایش داشت.

**نتیجه‌گیری:** مدل LARS-WG داری عملکرد مناسبی در ریزمقیاس‌سازی بارش و دما برای دوره آتی می‌باشد که بر اساس نتایج آن دمای میانگین ریزمقیاس‌سازی شده در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه روند افزایشی دارد. مقدار بارش بسته به سناریو و ماه مدنظر افزایش یا کاهش داشت. نتایج نشان داد افزایش تداوم خشکسالی و فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب به ترتیب با افزایش مقیاس‌های زمانی رابطه مستقیم و معکوس دارد و با افزایش مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش و تداوم این دوره‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) تکرار دوره‌های خشکسالی‌ها باتداوم بالا نسبت به دوره پایه دارای روند کاهشی است و تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی بر اساس هر دو سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه به طور قابل توجهی کمتر شده و تعداد ماه‌های نرمال و مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمی افزایش را نشان می‌دهند. شدیدترین خشکسالی با تداوم زیاد در دوره آتی از سال ۲۰۴۵ تا ۲۰۵۵ پیش‌نگری می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** دما، بارش، اجرای گروهی، ریزمقیاس نمایی، LARS-WG، SPI، SPEI

**استناد:** هاونگی، م.، امیرآبادیزاده، م.، و دستورانی، م. (۱۴۰۴). بررسی روند خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم در دوره آتی با استفاده از گزارش ششم IPCC (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک قاین). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۳۶-۵۲، (۳).

### حق چاپ:



حق چاپ برای نویسنده (گان) این مقاله محفوظ است. بر اساس قوانین انتشارات با دسترسی آزاد، تمام مطالعات چاپ شده در این نشریه به صورت آزاد در وبسایت نشریه برای عموم بدون پرداخت هزینه قابل دسترس است.

## مقدمه

بررسی روند خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و مطالعات مختلفی در این زمینه در ایران و سایر نقاط جهان صورت گرفته است. شاخص‌های متعددی برای پایش خشکسالی وجود دارد که شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)<sup>۱</sup> و بارش-تبخیر تعرق استاندارد شده (SPEI)<sup>۲</sup> از آن جمله هستند که در مطالعات مختلف به ارزیابی پدیده خشکسالی با استفاده از این دو شاخص پرداخته شده است از جمله Sayari و همکاران (۲۰۱۲) روند خشکسالی را تحت شرایط تغییر اقلیم در حوضه کشف‌رود (ایستگاه مشهد) در دوره‌های آتی با استفاده از مدل HadCM3 و دو سناریوی A2 و B2 بررسی و نشان دادند که میانگین بارندگی و دما برای هر دو سناریو، افزایش خواهد داشت. همچنین فراوانی وقوع خشکسالی هم برای هر دو سناریو روند صعودی خواهد داشت. Zare Abyane و همکاران (۲۰۱۵) به پایش خشکسالی بر مبنای شاخص SPEI تحت تأثیر تغییر اقلیم در منطقه همدان پرداختند. نتایج نشان داد که بر اساس نتایج سناریوی محتمل A2 طی سه دهه آینده دمای متوسط و بارش نسبت به دوره پایه به ترتیب ۰/۸۲ درجه سانتی‌گراد و ۲/۵ درصد افزایش می‌یابند. پایش وضعیت رطوبتی بر مبنای شاخص SPEI نیز نشان دهنده تغییرات زیاد شرایط رطوبتی در دهه اول پیش‌نگری نسبت به دهه‌های دوم و سوم بود. Kim و همکاران (۲۰۱۶) به پیش‌بینی شرایط خشکسالی آینده در منطقه‌ای در کره جنوبی بر اساس مدل HadGEM3-RA و سناریوهای تغییر اقلیم RCP8.5 با استفاده از شاخص SPEI پرداختند. نتایج نشان داد که مقیاس، فراوانی و شدت خشکسالی به دلیل تغییر اقلیم در آینده شدیدتر می‌شود. در پژوهشی دیگر Saeidipour و همکاران (۲۰۱۹) به تحلیل منطقه‌ای خشکسالی در

پدیده تغییر اقلیم که یکی از دلایل وقوع آن افزایش گازهای گلخانه‌ای است تأثیر به‌سزایی بر پدیده‌های حدی همچون سیل و خشکسالی دارد (van Pelt & Swart, 2011). لذا بررسی پدیده‌های حدی جهت مقابله، برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب در دوره‌های آتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خشکسالی یکی از پدیده‌های شدید آب‌وهوایی است که بیشترین تأثیر را بر جمعیت جهان دارد و این پدیده تأثیرات جدی بر دسترس بودن آب و در نتیجه بر فعالیت‌های اقتصادی مانند کشاورزی، گردشگری، سلامت انسان و اکوسیستم‌ها خواهد داشت (Rajaie, 2022). خشکسالی و پیامدهای نامطلوب آن برای منابع طبیعی، تولیدات کشاورزی، توسعه اقتصادی و اجتماعی یکی از چالش‌های اساسی ایران و سایر مناطق مستعد خشکسالی است و با توجه به فراوانی وقوع و گستره قابل توجه آن سازوکارهای مقابله جهت‌دار با آن ضروری است (Kheyri et al., 2021). در دهه‌های اخیر در میان حوادث طبیعی که جمعیت انسانی را تحت تأثیر قرار داده است زیان‌بارترین آنها از نظر شدت، مدت، گستره تحت پوشش، خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی وارد شده، پدیده خشکسالی بوده است. اگرچه امروزه به دلیل پیشرفت‌های علمی و گسترش ارتباطات و حمل‌ونقل، بروز آثار خشکسالی به شکل قحطی و مرگ دسته‌جمعی کمتر بروز می‌کند، ولی آثار و تبعات خشکسالی همچنان پابرجاست (Hayes et al., 1996; Bazrafshan et al., 2011). از آنجا که خشکسالی بخش‌های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، اقتصاد، بهداشت و غیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بنابراین پایش و ارزیابی این عامل در حال و آینده به منظور ارائه برنامه‌ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه امری ضروری است.

<sup>2</sup> Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

<sup>1</sup> Standardized Precipitation Index

پرداختند. نتایج نشان از افزایش ۰/۸۵ تا ۱/۵۴ درجه سانتی‌گرادی میانگین دمای ماهانه تحت سناریوی RCP8.5 و افزایش ۰/۲۵ تا ۱/۴۵ درجه سانتی‌گرادی آن تحت سناریوی RCP4.5 و کاهش ۳۱ تا ۱۰۰ میلی‌متری متوسط بارش سالانه داشت. همچنین تحلیل شاخص SPEI نشان داد که ۶۵ درصد سال‌ها وضعیتی نرمال دارد. Hajiabadi و همکاران (۲۰۲۰) به پیش‌نگری خشکسالی با استفاده از داده‌های گزارش پنجم تغییر اقلیم در منطقه بیرجند پرداختند. نتایج نشان داد که طی سال‌های آینده خشکسالی نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. Abadeh و Khosrowshahi (۲۰۲۱) در پژوهشی به ارزیابی و پایش پدیده خشکسالی بر اساس دو شاخص SPI و SPEI در استان هرمزگان پرداختند. نتایج نشان داد هرچند مقادیر شاخص SPI و SPEI دارای همبستگی بوده‌اند، اما شاخص SPEI نسبت به خشکی حساس‌تر بوده و پاسخ سریعتری نسبت به آن داشته است و پراکنش شاخص SPI در منطقه مورد مطالعه یکنواخت‌تر از پراکنش شاخص SPEI بوده است. Issaharou-Matchi و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی ویژگی‌های خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI مناطق نیمه‌خشک نیجر جنوبی پرداختند. نتایج نشان داد فراوانی خشکسالی در مناطقی از حوضه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. Azareh و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آتی با استفاده از دو مدل گردش عمومی BNU-ESM و HADGEM2 کاهش می‌یابد و مقادیر SPI سالانه برای هر دو مدل در هر دو دوره آتی تحت هر سناریو نسبت به دوره پایه پرداختند. نتایج نشان داد در تمامی سناریوها در هر دو مدل دمای متوسط سالانه افزایش و بارش متوسط سالانه کاهش یافته و متعاقباً خشکسالی هواشناسی افزایش می‌یابد. Rajaie (۲۰۲۲) به پیش‌بینی شرایط خشکسالی

حوزه آبریز کارون با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که برای تمامی ایستگاه‌ها، همبستگی دو شاخص به صورت مثبت و معنی‌دار است و با افزایش دوره زمانی، میزان ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی افزایش یافته است. Pirnia و همکاران (۲۰۱۸) به ارزیابی وضعیت خشکسالی در حوزه آبریز تمر (بالادست سد گلستان) با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI تحت شرایط اقلیمی حال و آینده در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۴۹) پرداختند؛ نتایج شاخص SPI نشان داد در هر دو دوره پایه و آتی بیشتر خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها به ترتیب در اواخر و نیمه ابتدایی دو دوره رخ داده‌اند و نتایج شاخص SPEI در مقایسه با شاخص SPI روند منطقی‌تر و واقعی‌تری داشت. Jafari و همکاران (۲۰۱۹) به پیش‌بینی خشکسالی‌های استان خراسان شمالی با مدل HadCM3 و شاخص‌های SPI و RDI<sup>1</sup> در دوره آتی (۲۰۳۲-۲۰۱۳) پرداختند. نتایج نشان داد که درصد فراوانی خشکسالی‌های دوره پیش‌بینی شده نسبت به دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۹۳) تحت هر سه سناریو در مقیاس یک ماهه و سالانه کاهش داشته است. از طرف دیگر درصد فراوانی ترسالی افزایش داشته است. Ashrafzade و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی حوزه آبریز حبله‌رود با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 و نمایه‌های SPI و RDI پرداختند. نتایج نشان داد میانگین دمای سالانه به میزان ۰/۴۷ درجه سانتی‌گراد و دمای کمینه ۰/۵۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج، بیانگر کاهش وقوع خشکسالی‌های شدید در بیشتر سال‌های سه دهه آینده می‌باشد. Farrokhzadeh و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص SPEI در حوزه آبخیز لتیان با استفاده از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 در دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۵۰

<sup>1</sup> Reconnaissance Drought Index

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شهرستان قاینات یکی از شهرهای استان خراسان جنوبی است که بین  $12^{\circ}59'$  تا  $14^{\circ}59'$  طول شرقی و  $42^{\circ}33'$  تا  $45^{\circ}33'$  عرض شمالی و در ارتفاع متوسط  $1440$  متر از سطح دریا قرار دارد. میانگین سالانه بارندگی بلندمدت آن  $173$  میلی‌متر و میانگین دماهای کمینه و بیشینه آن به ترتیب  $6/3$  و  $22/3$  درجه سانتی‌گراد می‌باشد (Amirabadizadeh *et al.*, 2019). ایستگاه هواشناسی مورد مطالعه (سینوپتیک قاین) در ارتفاع  $1446$  متر و عرض جغرافیایی  $42^{\circ}33'$  و طول جغرافیایی  $10^{\circ}59'$  واقع گردیده است.

### روش ریز مقیاس نمایی داده‌ها

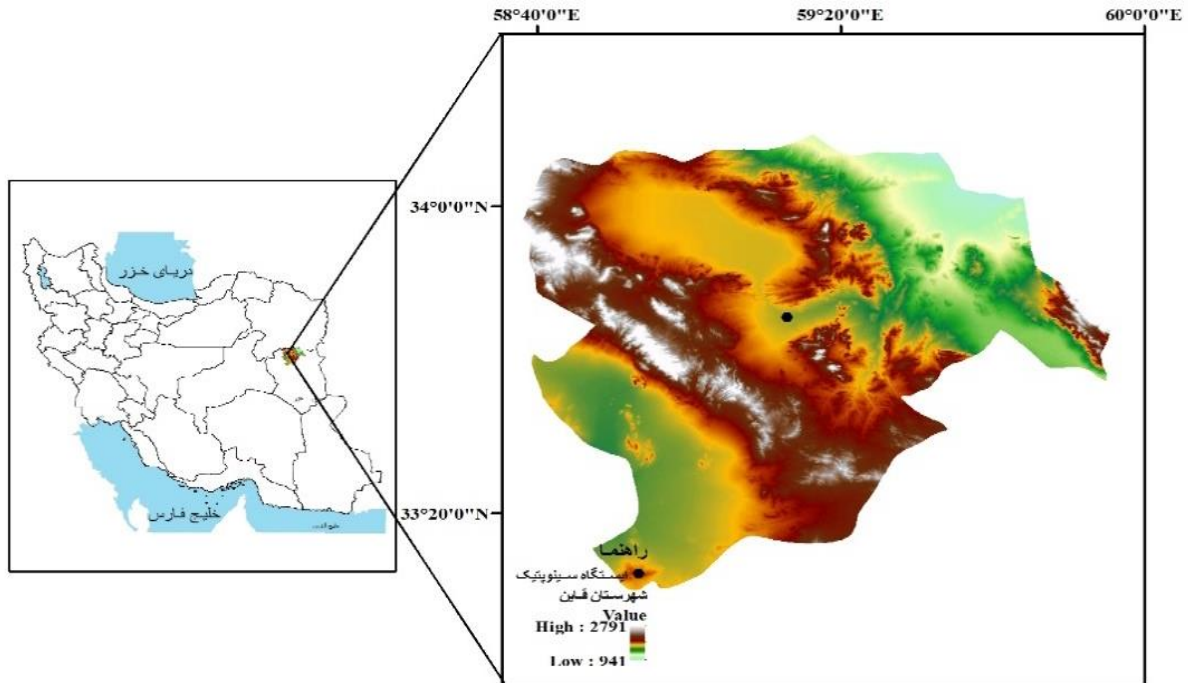
#### معرفی نرم‌افزار LARS-WG

نرم‌افزار LARS-WG<sup>۱</sup> یک تولیدکننده تصادفی اطلاعات هواشناسی<sup>۲</sup> است. این نرم‌افزار قادر به مدل‌سازی اطلاعات هواشناسی یک محل بر اساس اطلاعات فعلی است. این اطلاعات به صورت سری زمانی روزانه متغیرهای اقلیمی کمینه و بیشینه دما، بارندگی و تشعشعات خورشید است (Mardani *et al.*, 2022). خواص آماری داده‌های تولید شده مشابه دوره آماری بوده اما انحراف معیار آن‌ها به نسبت اختلاف داده‌های مدل GCM در دوره گذشته و آینده مقایسه می‌شود. داده‌ها در سری‌های زمانی روزانه برای یک سری متغیرهای اقلیمی مناسب ایجاد می‌شوند. نکته قابل توجه این است که مولدهای مصنوعی داده‌های آب و هوایی ابزاری برای پیش‌نگری نیستند که بتوان در پیش‌نگری‌های آب و هوایی استفاده کرد (Panahi *et al.*, 2021)، اما توانایی تولید سری‌های زمانی آب و هوایی یکسان با دوره دیدبانی را دارند.

تحت رویکرد تغییر اقلیم آینده در منطقه قراخیل واقع در حوزه آبریز تالار در استان مازندران پرداختند. نتایج نشان داد در دوره آتی تحت تأثیر تغییر خواهد یافت. Stathi و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی روند هیدرومتروئولوژیک و شدت خشکسالی در جزایر مدیترانه‌ای جنوب تونس پرداختند. نتایج نشان داد میانگین دمای هوای سالانه افزایش خواهد داشت و بر اساس مقادیر شاخص SPI خشکسالی شدید و خیلی‌شدید با تغییرات اندک اتفاق می‌افتد. با توجه به اینکه که ویژگی‌های خشکسالی ممکن است با گذشت زمان در اثر تغییرات اقلیمی دچار تغییر شوند، با پیش‌نگری و پایش وضعیت‌های رطوبتی متأثر از تغییرات اقلیمی در آینده می‌توان به مدیریت این پدیده جهت کاهش خسارات و شدت آن پرداخت. در اکثر مطالعات صورت گرفته تنها از یک مدل AOGCM و عمدتاً با استفاده از گزارش‌های چهارم یا پنجم صورت گرفته است. در این تحقیق ضمن استفاده از مدل‌های گزارش ششم از پنج مدل اقلیمی CMIP6 (جدول ۲) و دو سناریوی SSP5.8-5 (سناریوی بدبینانه) و SSP2.4-5 (سناریوی حد واسطه) و دو شاخص SPI و SPEI جهت بررسی روند خشکسالی استفاده شده است که این موضوع باعث افزایش اطمینان‌پذیری به نتایج می‌گردد. سناریوی SSP2.4-5 دنیایی با توسعه اقتصادی-اجتماعی در شرایط معمول را با آسیب‌پذیری و سطح واداشت تابشی متوسط در نظر می‌گیرد و سناریوی SSP5.8-5 نیز حد بالای واداشت تابشی را ارائه می‌دهد که در آن پیشرفت با استفاده از سوخت فسیلی الگوی مصرف بالای انرژی همراه است (O'Neill *et al.*, 2017; Rogelj *et al.*, 2018; Estoque *et al.*, 2020).

<sup>2</sup>-Stochastic Weather Generator

<sup>1</sup>-Long Ashton Research Station



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه  
Figure 1 - Location of the study area

در این روش ریزمقیاس‌نمایی با شبیه‌سازی و تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی در مقیاس محلی می‌توان مطالعات تغییر اقلیم در یک ایستگاه را انجام داد. مولد مصنوعی داده آب‌وهوایی است که می‌تواند برای شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک مکان واحد تحت شرایط اقلیم حال و آینده به کار رود (Munawar *et al.*, 2022). هسته اصلی این مدل استفاده از زنجیره مارکف است که یک روش مرسوم برای مدل‌سازی پدیده بارش است و در واقع هدف اصلی از کاربرد مدل LARS-WG برطرف نمودن محدودیت‌های زنجیره مارکف است. زنجیره مارکف همیشه قادر نیست به طور صحیح طول دوره خشکی را شبیه‌سازی نماید. طول دوره خشکی برای ارزیابی عملکرد محصولات کشاورزی در مناطق مختلف جهان بسیار مهم است (Mohammed & Hassan, 2022). در این مدل وقوع بارش به صورت سری‌های تر و خشک مدل‌سازی می‌شود، به طوری که

$$EMP = \{a_0, a_i, h_i, i = 1, 2, 3, \dots, 10\} \quad (1)$$

### بررسی تغییرات اقلیمی

در این مطالعه با در نظر گرفتن دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰ به عنوان دوره پایه، عوامل اقلیمی مورد نیاز برای مدل ریزمقیاس LARS-WG جمع‌آوری و برای تولید داده‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مدل برای دوره پایه اجرا شده و بدین ترتیب مرحله واسنجی صورت گرفت. با توجه به اینکه نتایج حاصل از مدل‌های اقلیمی صرفاً در مناطق آزمون از اعتبار لازم برخوردار است، مرحله اعتبارسنجی مدل متناسب با داده‌های منطقه مطالعاتی صورت گرفت (Farrokhzadeh et al., 2020). به منظور اطمینان از صحت مدل، ابتدا یک سناریوی حالت پایه برای دوه پایه تدوین و مدل برای این دوره اجرا شد. سپس خروجی‌های مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش با داده‌های ۳۰ ساله مشاهده شده ایستگاه مورد مطالعه مقایسه شدند. در نهایت به منظور ارزیابی و مقایسه دقت مدل‌های کوچک مقیاس استفاده شده از مقایسه داده‌های دوره پایه و داده‌های تولید شده توسط مدل با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای و پارامترهای ارزیابی RMSE<sup>۱</sup>، bR<sup>۲</sup> (ضریب تعیین (R<sup>۲</sup>) ضرب در ضریب خط رگرسیون) و NSE<sup>۳</sup> صورت گرفت. مقدار پارامتر NSE بین منهای بی‌نهایت و ۱ متغیر می‌باشد و هرچه این مقدار به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان دهنده بیش‌تر بودن دقت مدل است. پارامتر RMSE خطای مدل را نشان می‌دهد و پایین‌تر بودن مقادیر مربوط به این دو معیار نشان کارایی بهتر مدل می‌باشد. همچنین ضریب تعیین اصلاح‌شده (bR<sup>۲</sup>) بین ۰ و ۱ است. مقدار ۱ نشان‌دهنده تطابق بیشتر داده‌های مشاهده‌ای و ریزمقیاس شده‌است. شاخص‌های مذکور با استفاده از روابط ۲ تا ۴ محاسبه می‌شوند (Farrokhzadeh et al., 2020):

$$[a_{i-1}, a_i] a_{i-1} < a_i$$

که در اینجا EMP یک هیستوگرام با ۱۰ بازه با شدت‌های مختلف بارش است.  $h_i$ : تعداد رخداد بارش در  $i$ امین فاصله و  $a_i$  شدت‌های مختلف بارش را نشان می‌دهد. فاصله‌ها برای طول روزهای تر و خشک و بارش افزایشی هستند. فرآیند تولید داده‌ها توسط مدل LARS-WG در سه مرحله انجام می‌گیرد که عبارتند از واسنجی، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده (Panahi et al., 2023).

**الف) واسنجی مدل:** در این مرحله مدل با دریافت داده‌های هواشناسی مشاهداتی منطقه در مقیاس روزانه و همچنین اطلاعات جغرافیایی منطقه تنظیم شده و داده‌های آب و هوایی مشاهداتی برای تعیین مشخصات آماری آن آنالیز می‌شود.

**ب) ارزیابی مدل:** در این مرحله با تولید داده‌های آب و هوایی مصنوعی برای دوره مشاهداتی در منطقه مطالعاتی (بدون اعمال تغییر اقلیم) و مقایسه مشخصات داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل با داده‌های مشاهداتی، توانایی مدل در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی روزانه مورد ارزیابی و تصدیق قرار می‌گیرد.

**ج) تولید داده‌های آب و هوایی آینده:** در این مرحله پارامترهای اقلیمی دوره‌های آتی با توجه به مدل GCM و سناریوهای تعیین شده مدل‌سازی می‌شوند (Panahi et al., 2023). در مدل LARS-WG (نسخه ۷) با دارا بودن پنج مدل از گردش عمومی جو مرتبط با CMIP6 امکان اجرای گروهی مدل‌های تغییر اقلیم به منظور کاهش عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های اقلیمی را فراهم می‌سازد.

<sup>3</sup> -Nash-Sutcliffe efficiency

<sup>1</sup> -Root-Mean-Square Error

<sup>2</sup> - Coefficient of Determination

اقلیمی را فراهم می سازد. در این تحقیق از همه مدل‌های موجود در مدل LARS-WG7 شامل ACCESS-ESM1-MPI و MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL، ESM 1-2-L-R و CNRM-CM6-1 که سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 را دارا بودند، برای بررسی تغییرات اقلیمی بر مبنای فرآیند اجرای گروهی مدل‌ها، استفاده شدند. روش‌های مختلفی برای اجرای فرآیند گروهی وجود دارد که عمده‌ترین آن‌ها میانگین حسابی، میانگین وزنی و رگرسیون چندگانه می‌باشد؛ در این پژوهش از روش میانگین‌گیری حسابی به منظور اعمال وزن مساوی به برون‌داد مدل‌ها استفاده شده است. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در جدول ۲ آورده شده است.

### بررسی خشکسالی منطقه با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI

محققان طی دهه‌های گذشته، شاخص‌های مختلفی را به منظور پایش وضعیت خشکسالی و بررسی اثرات کمی ناشی از آن توسعه داده‌اند. در تحقیق حاضر به منظور پایش دوره‌های رطوبتی، شاخص‌های SPEI و SPI انتخاب شدند. شاخص SPI به منظور پایش خشکسالی اقلیمی ایالت کلرادوی آمریکا توسط Mckee و همکاران (۱۹۹۳) پیشنهاد گردید (Mckee et al., 1993).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n ((O_i - S_i)^2)}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (۳)$$

$$bR^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(N - 1)}{N - P - 1} \quad (۴)$$

در روابط بالا  $S_i$  مقادیر شبیه‌سازی‌شده،  $O_i$  مقادیر مشاهده‌ای،  $N$  تعداد کل داده‌های مشاهداتی،  $P$  تعداد متغیرهای پیش‌بینی و  $R^2$  ضریب تعیین است. پس از اطمینان از قابلیت مدل LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی، این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو (جدول ۲) مربوط به گزارش ششم تغییر اقلیم و تولید داده‌های مصنوعی جهت پیش‌بینی اقلیم دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۱ اجرا شد. پس از اجرای مدل‌های مذکور و تولید مقادیر روزانه پارامترهای بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه برای دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۱ پارامترهای مذکور مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و شرایط اقلیمی دوره آتی پیش‌نگری گردید. بنا به جدیدترین توصیه IPCC در شبیه‌سازی‌های اقلیمی استفاده از چندین مدل به جای اجرای منفرد مدل‌ها می‌تواند در کاهش عدم قطعیت‌ها در مدل‌ها مؤثر باشد، LARS WG-7 با تجمیع ۵ مدل گردش عمومی در IPCC AR6 امکان اجرای گروهی مدل‌های تغییر اقلیم به منظور کاستن از عدم قطعیت‌های موجود در مدل‌های

### جدول ۲- مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو IPCC AR6

Table2- Characteristics of Atmospheric General Circulation Models (IPCC AR6)

نام مدل	کشور سازنده	تفکیک افقی (km)
ACCESS-ESM1-5	استرالیا	250
CNRM-CM6-1	فرانسه	250
HadGEM3 GC31- LL	بریتانیا	250
MRI-ESM2-0	ژاپن	100
MPI ESM 1-2 –L-R	آلمان	100

با در اختیار داشتن  $F(x)$ ، برای تبدیل توزیع آماری لجستیک به توزیع آماری نرمال، SPEI می‌تواند به سادگی به عنوان مقادیر استاندارد شده  $F(x)$  به دست آید. با توجه به اینکه SPEI یک متغیر استاندارد شده است طبقه‌بندی SPEI همانند SPI بوده و برای طبقه‌بندی مقادیر آن می‌توان از آستانه‌های مندرج در جدول ۳ استفاده کرد. مقدار میانگین عدد SPEI، صفر و انحراف معیار آن برابر یک است. SPEI یک متغیر استاندارد شده است و می‌تواند با سایر مقادیر SPEI در مکان و زمان مقایسه شود (Samti et al., 2019). به منظور محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی زمانی ۶ و ۱۲ ماهه از برنامه‌نویسی و پیش گفته و استفاده از پکیج SPEI در محیط نرم‌افزار برنامه‌نویسی R (Vicente-Serrano et al., 2010) استفاده شد.

جدول ۳- طبقه‌های مختلف شدت خشکسالی بر اساس

#### شاخص‌های SPI و SPEI

Table3- Different categories of drought intensity based on SPI and SPEI indices

SPEI	طبقه‌بندی Classification
>2	ترسالی خیلی شدید
1.5-2	ترسالی شدید
1-1.5	ترسالی متوسط
0.5-1	ترسالی خفیف
-0.5-0.5	نرمال
-0.5- -1	خشکسالی خفیف
-1- -1.5	خشکسالی متوسط
-1.5- -2	خشکسالی شدید
<-2	خشکسالی خیلی شدید

#### نتایج

##### ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG

نتایج ارزیابی مقادیر ریزمقیاس شده توسط مدل LARS-WG و مشاهداتی در دوره پایه بر مبنای آماره‌های ارزیابی عملکرد، در جدول ۴ آورده شده است.

برای محاسبه این شاخص، ابتدا با برازش توزیع گاما بر داده‌های بارندگی ماهانه یا مجموع بارندگی در هر بازه‌ی زمانی دلخواه، تابع احتمال تجمعی آن را با استفاده از نرم‌افزار R محاسبه شده سپس با انتقال احتمال تجمعی به دست آمده به توزیع تجمعی نرمال استاندارد شده مقادیر شاخص SPI محاسبه می‌شود (Lloyd-Hughes & Saunders., 2022). مهمترین مزیت شاخص SPI قابلیت محاسبه در مقیاس‌های زمانی مختلف است که باعث می‌شود این شاخص بتواند اثرات دوره‌های کوتاه‌مدت ذخیره آب (از جمله رطوبت خاک که در تولیدات کشاورزی نقش مهمی دارد) و اثرات دوره‌های طولانی‌مدت منابع آب را پیش نماید (Mishra & Singh, 2010). شاخص دیگر شاخص SPEI است که توسط Vicente-Serrano و همکاران (۲۰۱۰) پیشنهاد شده است، از معادله ساده بیلان آب یعنی اختلاف بین مقدار بارندگی (P) و تبخیر تعرق پتانسیل (PE) برای ماه  $i$  مطابق رابطه ۵ استفاده می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010).

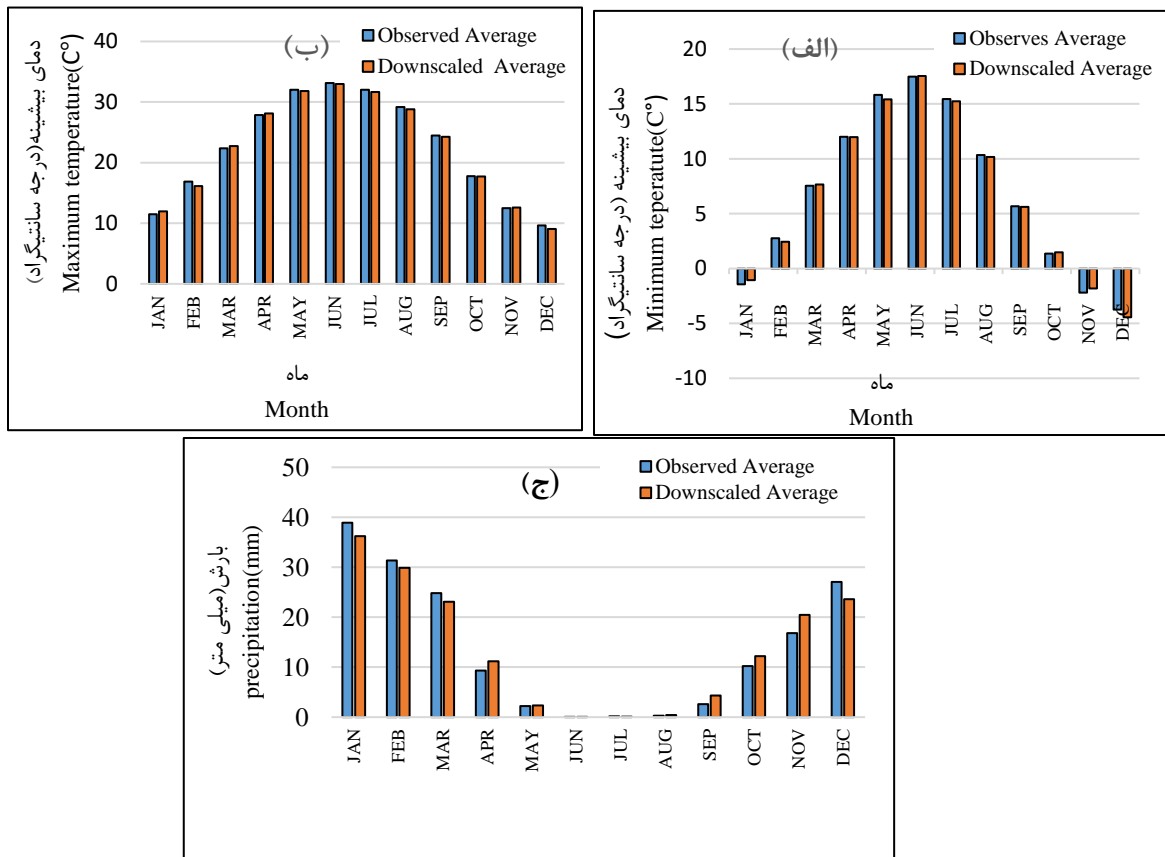
$$D_i = P_i - PE_i \quad (5)$$

در این پژوهش برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل از روش تورنت‌وایت استفاده شد. همانند روش محاسباتی شاخص SPI، در این شاخص نیز باید یک تابع چگالی احتمال مناسب بر مقادیر احتمال تجمعی  $D_i$  برازش داده شود. به منظور پوشش دادن مقادیر منفی  $D_i$ ، لازم است که یک توزیع سه پارامتری  $D_i = P_i - PE_i$  را انتخاب نمود. نتایج نشان داده است از بین توابع مختلف، تابع چگالی احتمال لوگ لجستیک سه پارامتری برازش خوبی بر سری داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد (Sameti et al., 2018). شکل کلی این تابع به صورت رابطه (۶) است:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[ 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (6)$$

جدول ۴- ارزیابی مدل LARS-WG در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) با استفاده از آماره‌های ارزیابی عملکرد  
**Table 4- Evaluation of the LARS-WG model in the base period (1990-2020) using performance evaluation measurement statistics**

بارش Precipitation	دمای بیشینه Maximum temperature	دمای کمینه Minimum temperature	شاخص ارزیابی Evaluation index
0.7	0.99	0.99	bR <sup>2</sup>
4.001	0.384	0.308	RMSE
0.834	0.998	0.998	NSE



شکل ۲- میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (الف) دمای بیشینه (ب) دمای کمینه (ج) بارش  
**Figure 2- Average observed and downscaled values (a) maximum temperature (b) minimum temperature (c) precipitation**

دماهای کمینه و بیشینه می‌باشد. با وجود آنکه بارش از تغییرپذیرترین متغیرهای اقلیمی می‌باشد، اما میانگین مقادیر ریزمقیاس شده تطابق خوبی با مقادیر مشاهداتی دارند به طوریکه مقدار bR<sup>2</sup> برابر ۰/۷۴ و مقدار RMSE برابر ۴/۰۰۱ میلی‌متر و ضریب نش ۰/۸۳۴ به دست آمد که نشانگر عملکرد خوب مدل در ریزمقیاس کردن داده‌های بارش دوره پایه می‌باشد. لذا مدل مورد بحث از

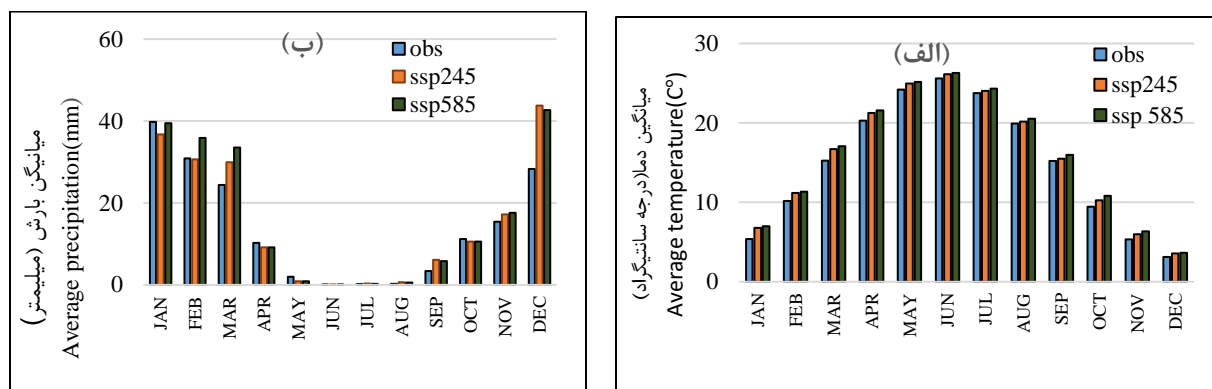
بر اساس نتایج به دست آمده (شکل ۲) تطابق بالایی بین نمودارهای میانگین مشاهداتی و ریزمقیاس شده وجود دارد. مقادیر bR<sup>2</sup> برای دمای کمینه و بیشینه بطور مشابهی ۰/۹۹ به دست آمد و مقادیر RMSE برای دمای کمینه و بیشینه به ترتیب به میزان ۰/۳۰۸ و ۰/۳۸۴ و ضریب نش برای دمای کمینه و بیشینه ۰/۹۹۸ به دست آمد که نشانگر دقت بالای مدل در ریزمقیاس‌سازی

SSP2-4.5 بر مبنای دو سناریوی MPI-ESM1-2-LR (سناریوی متوسط) و SSP5-8.5 (سناریوی بدبینانه) اجرا گردید. در این تحقیق با میانگین‌گیری از نتایج ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای دما و بارش از مدل‌های مختلف به روش میانگین حسابی، مقادیر روزانه پارامترهای دمای کمینه، دمای بیشینه در دوره آینده ریزمقیاس‌سازی گردیدند. در ادامه میانگین ماهانه دما و بارش برای دوره مذکور محاسبه و به صورت مقایسه‌ای نسبت به دوره پایه بر مبنای سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 در شکل ۳ نشان داده شده‌اند.

عملکرد خوبی برای ریزمقیاس‌کردن دمای کمینه و بیشینه و بارش برخوردار می‌باشد.

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵)

با توجه به توانایی مدل LARS-WG در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی دوره پایه، مدل مذکور برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی شامل دمای کمینه، دمای بیشینه و بارندگی در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) با استفاده از پنج مدل GCM شامل CNRM، ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL، CM6-1 و



شکل ۳- میانگین ماهانه متوسط دما (الف) و بارش (ب) در دوره ۲۰۲۵-۲۰۵۵ بر اساس اجرای گروهی مدل‌ها و سناریوهای انتشار در مقایسه با دوره پایه

Figure 3- Average monthly temperature (a) and average monthly precipitation (b) in the period 2025-2055 based on the group implementation of models and emission scenarios in comparison to the base period

می‌دهد. همچنین بر اساس نتایج (شکل ۳-الف) دمای میانگین ریزمقیاس‌سازی شده در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه روند صعودی دارد. به طوریکه میانگین این افزایش برای سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 به ترتیب ۰/۷۴ و ۱/۰۳ درجه سانتی‌گراد برآورد شده است.

نتایج محاسبه شاخص‌های خشکسالی

نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص SPI

با توجه به جدول ۵ براساس شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه، تعداد ماه‌های خشک و تعداد ماه‌های مرطوب

بر پایه نتایج (شکل ۳-ب) مقدار بارش بر اساس سناریوی SSP2.4-5 در ماه‌های ژانویه، فوریه، آوریل و اکتبر نسبت به دوره پایه کاهش و در ماه‌های مارس، سپتامبر، نوامبر و دسامبر نسبت به دوره پایه روند افزایشی دارد. بر اساس سناریوی SSP5.8-5 در ماه‌های فوریه، مارس و نوامبر بارش نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و در سایر ماه‌های دارای بارندگی روند نزولی دارد. به طور کلی میانگین بارش آتی در سه دهه دوره آتی ۱۱ درصد بر مبنای سناریوی SSP2.4-5 و ۱۸ درصد بر مبنای سناریوی SSP5.8-5، نسبت به دوره پایه افزایش نشان

تعداد ماه‌های نرمال در در دوره آتی بر اساس سناریوی SSP2.4-5 نسبت به دوره پایه افزایش و بر اساس سناریوی SSP5.8-5 نسبت به دوره پایه مقدار کمی کاهش داشته است. همچنین تغییری در ماه‌های خشک، نرمال و مرطوب به ازای تغییر سناریوهای مذکور مشاهده نگردید.

نسبت به دوره پایه افزایش و تعداد ماه‌های نرمال در دوره آتی بر اساس سناریوهای SSP 2.4-5 و SSP 5.8-5 نسبت به دوره پایه کاهش داشته است؛ در حالی که بر اساس شاخص SPEI تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی بر اساس هر دو سناریو نسبت به دوره پایه کاهش و تعداد ماه‌های مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه تغییر چندانی نداشته و یک واحد (ماه) افزایش داشته است.

جدول ۵- خصوصیات مقادیر مورد بررسی در مقیاس زمانی مختلف در دوره پایه و آتی با شاخص های SPI و SPEI

Table5- Characteristics of the investigated values in different time scales in the base and future periods with SPI and SPEI indices

SPEI		SPI		آماره	مقیاس زمانی	
دوره آتی		دوره پایه				
SSP585	SSP245	SSP585	SSP245			
-2	-2	-2.17	-3.36	-3.36	-2.24	حداقل
2.3	2.3	2.03	1.94	1.94	2.2	حداکثر
119	119	124	109	109	104	تعداد ماه‌های خشک
119	119	117	116	116	97	تعداد ماه‌های مرطوب
111	111	108	124	124	148	تعداد ماه‌های نرمال
-1.97	-1.97	-3.21	-3.22	-3.22	-3.61	حداقل
2.64	2.64	2.24	2.12	2.12	2.52	حداکثر
112	112	104	105	105	105	تعداد ماه‌های خشک
112	112	102	105	105	106	تعداد ماه‌های مرطوب
131	131	149	145	145	144	تعداد ماه‌های نرمال

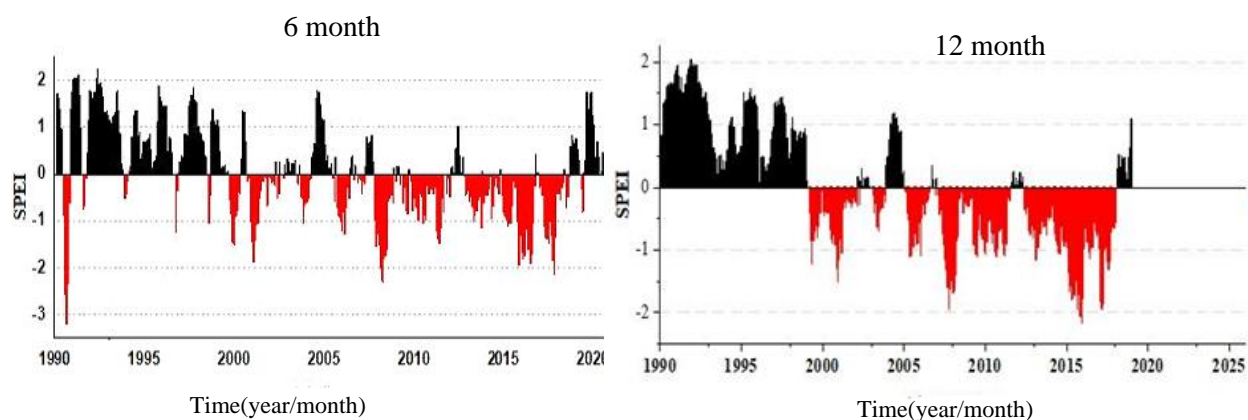
و بلندمدت (۶ و ۱۲ ماهه) در دوره پایه (۲۰۲۰-۱۹۹۰) در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۵ دوره‌های ترسالی عمدتاً در دهه اول دوره پایه رخ داده‌اند به طوری که در مقیاس ۱۲ ماهه در دهه اول دوره پایه به طور کامل ترسالی رخ داده است. در دو دهه دوم دوره پایه خشکسالی‌ها با تداوم زیاد به ویژه در مقیاس ۱۲ ماهه رخ داده است و شدیدترین خشکسالی در مقیاس شش‌ماهه در دسامبر سال ۱۹۹۱ رخ داده است و شدیدترین دوره ترسالی در ماه نوامبر ۲۰۰۵ رخ داده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود فراوانی دوره‌های مرطوب و خشک در مقیاس کوتاه‌مدت (۶ ماهه)

### نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص SPEI

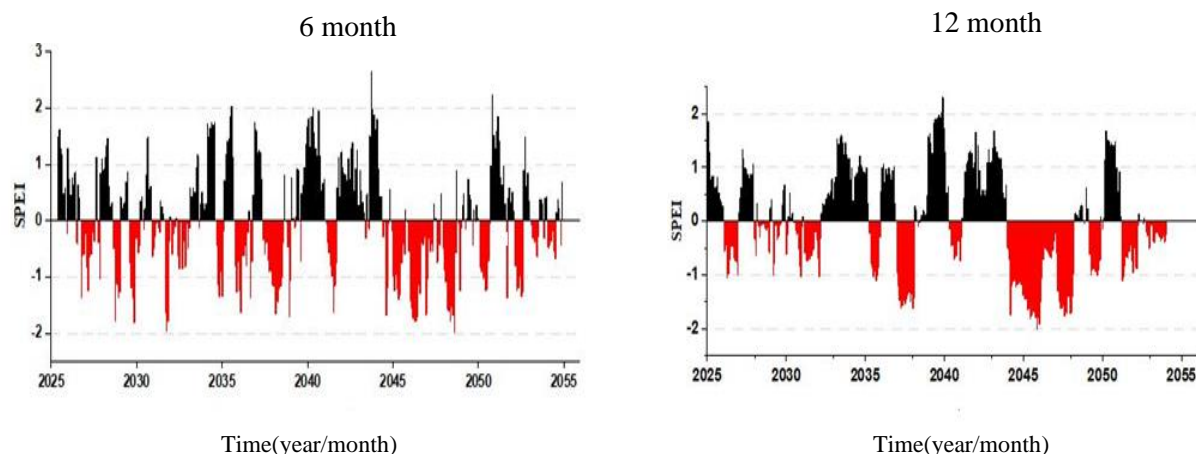
با توجه به اینکه شاخص مبتنی بر بارندگی نظیر SPI نمی‌تواند اثر افزایش دما را برای نوسانات اقلیمی در نظر بگیرند و از طرفی با توجه به افزایش دما به مقدار ۰/۷۴ و ۱/۰۳ درجه سانتی‌گراد بر اساس سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 نسبت به دوره پایه (شکل ب)، در ادامه این تحقیق از شاخص SPEI به عنوان یک شاخص مناسب برای بررسی پیامدهای ناشی از گرمایش جهانی در شرایط خشکسالی در ایستگاه مورد بررسی استفاده شده است. از این رو در ادامه نتایج پایش خشکسالی بر اساس شاخص SPEI برای مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت

مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش و تداوم این دوره‌ها افزایش می‌یابد. در دوره آتی (۲۰۵۵-۲۰۲۵) تکرار دوره‌های خشک‌سالی‌ها باتداوم بالا نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. همچنین تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی براساس هر دو سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه کاهش قابل توجهی می‌یابد. تعداد ماه‌های نرمال و مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمی افزایش می‌یابد. شدیدترین خشک‌سالی با تداوم زیاد در دوره آتی از سال ۲۰۴۵ تا ۲۰۵۵ پیش‌نگری می‌شود.

نسبت به مقیاس زمانی (۱۲ ماهه) زیاد می‌باشد. همچنین با افزایش مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد. از طرفی تداوم این دوره‌ها افزایش می‌یابد. در ادامه بر اساس میانگین مدل‌های مورد بررسی و تحت سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 سری زمانی شاخص SPEI در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) محاسبه گردید و نمودار آن مطابق شکل‌های ۵ و ۶ ترسیم گردید. براساس شکل‌های ذکر شده و مشابه دوره پایه بر اساس هر دو سناریو با افزایش

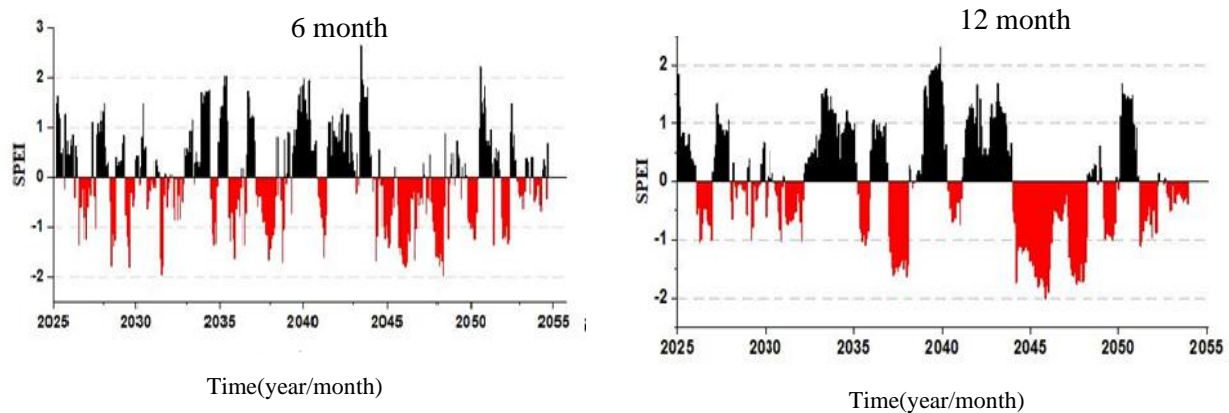


شکل ۴- سری زمانی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استانداردشده در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه  
Figure 4- Time series of potential evaporation and transpiration index in the base period (1990-2020) in time scales 6 and 12 months



شکل ۵- سری زمانی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI) در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۵) در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه بر اساس سناریوی SSP2.4-5

Figure 5- Time series of potential evaporation and transpiration index (SPEI) in the future period (2025-2055) in time scales 6 and 12 months based on SSP2.4-5 scenario



شکل ۶- سری زمانی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۵) در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۶ ماهه براساس سناریوی SSP5.8-5

Figure 6- Time series of potential evaporation and transpiration index (SPEI) in the future period (2025-2055) in time scales 12 and 6 months using SSP5.8-5scenario

هر دو سناریوی SSP2.4-5 و SSP5.8-5 در تعدادی از ماه‌ها نسبت به دوره پایه روند کاهشی و در تعدادی روند افزایشی دارد که مشابه نتایج پژوهش (Zare abyane et al., 2015) در استان همدان می‌باشد. با توجه به اینکه میانگین بارش در سه دهه دوره آتی ۱۱ درصد بر مبنای سناریوی SSP2.4-5 و ۱۸ درصد بر مبنای سناریوی SSP5.8-5، نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و میانگین دما هم بر اساس سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5.8-5 به ترتیب ۰/۷۴ و ۱/۰۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و از طرفی با در نظر گرفتن این موضوع که شاخص‌های مبتنی بر بارندگی نظیر SPI نمی‌توانند اثر افزایش دما را برای نوسانات اقلیمی در نظر بگیرند، لذا از شاخص SPEI برای پایش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۶ ماهه و یکساله برای دوره‌های پایه و آتی استفاده گردید. نتایج نشان داد فراوانی دوره‌های مرطوب و خشک در مقیاس کوتاه‌مدت (۶ ماهه) نسبت به مقیاس زمانی (۱۲ ماهه) زیاد می‌باشد و با افزایش مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش و تداوم این دوره‌ها افزایش می‌یابد. نتایج پژوهش Rahnama و همکاران (۲۰۲۳) در استان فارس نیز نشان داد که افزایش تداوم خشکسالی و فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب به ترتیب با افزایش

## بحث

بررسی نحوه تغییر شرایط خشکسالی بر اساس تغییرات اقلیمی از جنبه‌های گوناگون دارای اهمیت است. زیرا در بسیاری از برنامه‌های بلندمدت لازم است چشم‌اندازی از وضعیت آبی بارندگی و دوره‌های خشکسالی و ترسالی در منطقه ترسیم گردد. در این تحقیق ریزمقیاس‌نمایی شرایط اقلیمی آتی در ایستگاه سینوپتیک قاین با اجرای مدل ۵ شامل GCMS، ACCESS-ESM1-5، CNRM، MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL، CM6-1، MPI ESM 1-2 -L-R بر مبنای سناریوهای انتشار SSP2.4-5 و SSP5.8-5 در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) انجام گردید. در ادامه وضعیت خشکسالی در دوره آتی تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI بررسی گردید که نتایج آن به صورت زیر می‌باشد: با توجه به نتایج به دست آمده در ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG (جدول ۴) و تطابق بالا بین نمودارهای میانگین مشاهداتی و ریزمقیاس‌شده، این مدل دارای عملکرد مناسبی در ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما برای دوره آتی می‌باشد که بر اساس نتایج آن دمای میانگین ریزمقیاس‌سازی شده در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه روند صعودی دارد. همچنین مقدار بارش بر اساس

(۶ ماهه) نسبت به مقیاس زمانی (۱۲ ماهه) زیاد می‌باشد و با افزایش مقیاس زمانی فراوانی دوره‌های خشک و مرطوب کاهش می‌یابد. از طرفی تداوم این دوره‌ها افزایش می‌یابد. تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی بر اساس هر دو سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه کاهش قابل توجهی می‌یابد و تعداد ماه‌های نرمال و مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمی افزایش می‌یابد. شدیدترین خشکسالی با تداوم زیاد در دوره آتی از سال ۲۰۴۵ تا ۲۰۵۵ پیش‌نگری می‌شود. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی به منظور اعمال دقیق‌تر فرآیند تبخیر و تعرق، از شاخص اصلاح‌شده SPEI که در آن رطوبت خاک نیز جز پارامترهای مؤثر بر مقدار SPEI می‌باشد، استفاده شود. همچنین در مطالعات آتی از چندین ایستگاه سینوپتیک در اقلیم‌های متفاوت استفاده شود که در این تحقیق، به دلیل محدودیت‌های زمانی و عدم دسترسی به داده‌های موردنیاز از داده‌های یک ایستگاه استفاده گردید.

**سپاسگزاری:** از مدیریت مطالعات پایه منابع آب شرکت آب منطقه‌ای خراسان جنوبی به دلیل در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات تشکر و قدردانی می‌گردد.

## References

- Abadeh, M., & Khosrowshahi, M. (2021). Assessment and drought monitoring using Standardized Precipitation (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration (SPEI) Indices in Hormozgan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4), 718-732. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125248> (In Persian)
- Amirabadizadeh, M., Yaqubzadeh, M., Hashemi, S., & Khozimejad, H. (2019). Assessment linear and data-driven models in downscaling of precipitation and temperature in South Khorasan province. *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 2(1), 68 - 82 (In Persian)

مقیاس‌های زمانی رابطه مستقیم و معکوس دارد که مشابه یافته‌های این پژوهش است. شدت خشکسالی‌ها در دوره آتی نسبت به دوره پایه تغییر چندانی پیدا نمی‌کند به طوریکه حداکثر مقدار شاخص SPEI ۲- و در محدوده خیلی‌شدید مشابه دوره پایه می‌باشد. در دوره آتی (۲۰۲۵-۲۰۵۵) تکرار دوره‌های خشکسالی با تداوم بالا نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. به علاوه تعداد ماه‌های خشک در دوره آتی بر اساس هر دو سناریوی مورد بررسی نسبت به دوره پایه کاهش قابل توجهی می‌یابد و تعداد ماه‌های نرمال و مرطوب در دوره آتی نسبت به دوره پایه کمی افزایش می‌یابد. شدیدترین خشکسالی با تداوم زیاد در دوره آتی از سال ۲۰۴۵ تا ۲۰۵۵ پیش‌نگری می‌شود.

## نتیجه‌گیری کلی

به طور کلی نتایج این پژوهش نشان داد دمای میانگین ریزمقیاس‌سازی شده در هر دو سناریو نسبت به دوره پایه روند افزایشی دارد، مقدار بارش بر اساس هر دو سناریو در بعضی از ماه‌ها نسبت به دوره پایه افزایش و در بعضی از ماه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد فراوانی دوره‌های مرطوب و خشک در مقیاس کوتاه‌مدت

- Ashrafzade, A., Salehpoor, J., & Sharifi, A. (2022). Investigating the Effects of Climate Change on Meteorological Drought Characteristics of Hablehrood Basin Using the HADCM3 General Circulation Model and the SPI and DI Index. *Human & Environment*, 20(2), 217-233. (In Persian)
- Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., & Jafari Gadaneh M. (2021). Investigating the Effect of Climate Change on Future Temperature, Precipitation, and Droughts Using BNU-ESM and HadGEM2. Models. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 10(31), 95-110. <https://doi.org/10.22052/DEEJ.2021.10.31.51> (In Persian)
- Bazrafshan, O., Mohseni Saravi, M., Malekian, A., & Moeini A. (2011). A study on drought

- characteristics of Golestan Province using Standardized Precipitation Index (SPI). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 18 (3):395-407. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2011.102169> (In Persian)
- Estoque, R. C., Ooba, M., Togawa, T., & Hijioka, Y. (2020). Projected land-use changes in the Shared Socioeconomic Pathways: Insights and implications. *Ambio*, 49(12): 1972-1981. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01338-4>
- Farrokhzadeh, B., Choobeh, S., & Bazrafshan, O. B. (2020). Assessing the climate change effects on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), case study: Latian dam [Research]. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 8(3), 59-72. <http://jircsa.ir/article-1-398-en.html> (In Persian)
- Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., & Hammami, M. (2020). Projection of agricultural drought using fifth IPCC assessment report data (Case study: Birjand Region). *Journal of Agricultural Meteorology*, 8(1), 51-61 <https://doi.org/10.22125/AGMJ.2020.221273.1091> (In Persian)
- Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite, D.A., & Vanyarkho, O. (1996). Monitoring the drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society (BAMS)*, 1999; 80 (3), 429-438 [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2)
- Issaharou, Matchi, I., Habou, R., Moussa Mamoudou, B., Idrissa, S., Saley, K., Mahamane, A., & Saadou, M. (2021). Assessment of Drought Characteristics under Changing Climatic Conditions using SPI and SPEI Indices in Semi-Arid Environment of Southeastern Niger. *International Journal of Environment and Climate Change*, 11, 146-157. <https://doi.org/10.9734/IJECC/2021/v11i1030502>
- Jafari, G., Shahkooeei, E., & Ghanghermeh, A. (2019). North Khorasan Province HadCM3 droughts predicted by models and indicators of SPI and RDI. *Geographical Planning of Space Quarterly Journal*, 8(30), 159-174. <https://doi.org/10.30488/GPS02019.85842> (In Persian)
- Kheyri, R., Mojarrad, M., Masompour, J., & Farhadi, B. (2021). Evaluation of drought changes in Iran using SPEI and SC-PDSI. *Journal of Spatial Planning*, 25(1), 143-174. (In Persian)
- Kim, B. S., Chang, I. G., Sung, J. H., & Han, H. J. (2016). Projection in Future Drought Hazard of South Korea Based on RCP Climate Change Scenario 8.5 Using SPEI. *Advances in Meteorology*, 2016(1), 4148710. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2016/4148710>
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M.A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal Climatology*, 22: 1571-1592. <https://doi.org/10.1002/joc.846>
- McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the Eighth Conference on applied Climatology. *American Meteorological Society, Boston*, 22(17), 179-184.
- Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- O'Neill, B. C., Krieger, E., Ebi K. L., Kemp Benedict, E., Riahi, K., Rothman D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren D.P., Birkmann, J., Kok, K., & Levy M. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*. 42: 169-180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- Panahi, H. r., Montaseri, H., zadeh, A. H., & Khalili, R. (2023). Investigating the effect of climate change on temperature and precipitation using the LARS-WG model (case study: Bashar river basin). *Journal of*

- Environmental Research and Technology*, 7(12), 129-142. (In Persian)
- Pirnia, A., Golshan, M., Bigonah, S., & Solaimani, K. (2018). Investigating the drought characteristics of Tamar basin (upstream of Golestan Dam) using SPI and SPEI indices under current and future climate conditions. *Iranian Journal of Eco Hydrology*, 5(1), 215-228. <https://doi.org/10.22059/IJE.2018.239226.689>
- Rahnama, S., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., & Mehran, A. (2023). Investigating the drought trend using the modified SPEI and MSPI indices in different time scales (case study: Fars Province). *Journal of Climate Change Research*, 4(13), 89-104. <https://doi.org/10.30488/CCR.2023.393409.1125>
- Rajaie, f. (2022). Drought forecasting under the approach of future climate change (Case study: Qarakhil). *Journal of Environmental Science Studies*, 7(2), 4990-5001. <https://doi.org/10.22034/JESS.2022.330098.1724>
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Streffer, J., Hasegawa, T., Marangoni, G., & Krey, V. (2018). Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325-332.
- Saeidipour, M., Radmanesh, F., Eslamian, S., & Sharifi, M. R. (2019). Regionalization Analysis of SPI and SPEI Drought Indices for Karoon Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 23(2), 397-415. <https://doi.org/10.29252/jstnar.23.2.397> (In Persian)
- Samti, M., Sanainejad, S. H., Kahraman, B., & Rivaz, F. (2019). Spatio-temporal prediction of drought using SPEI index in north-east of Iran. *Journal of Water and Soil Conservation Research*, 26(4), 115-133. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.15898.3116>(In Persian)
- Stathi, E., Kastridis, A., & Myronidis, D. (2023). Analysis of Hydrometeorological Trends and Drought Severity in Water-Demanding Mediterranean Islands under Climate Change Conditions. *Climate*, 11(5), 106. <https://www.mdpi.com/2225-1154/11/5/106>
- Sayari, N., Alizadeh, A., Bannayanaval, M., FaridHosseini, A.R., & Hessami Kermani, M.R. (2012). Drought Monitoring under Climate Change Conditions in Kashafrood Basin (Mashad Station) in Future Periods Using HadCM3 Model under A2 and B2 Emission Scenarios. *Journal of Climate Research*, 2(7), 21-42 (In Persian)
- van Pelt, S.C., & Swart, R.J. (2011). ClimateChange Risk Management in Transnational River Basins: The Rhine. *Water Resources Management* 25, 3837-3861. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9891-1>
- Vicente –Serrano, S.M., Begueria, S., & Lopez –Moreno, J.I (2010). A multi –scalar drought index sensitive e to global warming: the Standardized precipitation Evapotranspiration Index –SPEI. *Journal of Climate*, 23(7):1696-1718 . <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Zare abyane, H., Ghobaie sogh, M. & Mosaedi, A. (2015). Drought Monitoring Based on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) Under the, Effect of Climate Change. *Journal of water and soil*, 29(2), 374-392. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.36472>