

Drought Simulation of Kermanshah Plain Using Statistical Downscaling Model

Fatemeh Nasrnia¹, Maryam Ehsani^{2*}

- 1- Assistant Professor of Agricultural Economics, Shiraz University, Faculty of Agricultural Economics, Shiraz, Iran. (<https://orcid.org/0009-0000-6232-3284>)
- 2- PhD student of Agricultural Economics, Department of Agricultural Economics, Shiraz University, Faculty of Agricultural Economics, Shiraz, Iran. (<https://orcid.org/0000-0001-9280-5428>)

*Corresponding Author (maryamehsani@hafez.shirazu.ac.ir)

Extended abstract

Introduction

Drought is one of the unpredictable natural disasters - especially in arid and semi-arid regions such as Iran - that is caused by climate change, especially changes in temperature and rainfall. According to projections by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Iran will face increasing temperatures, decreasing rainfall, and a significant increase in annual evapotranspiration in the coming years, and this is a serious challenge for Iran and its vulnerable regions, including Kermanshah Province. Therefore, predicting the effects of climate change on rainfall and drought in the coming years is of great importance in planning and policymaking in the agricultural sector and water resources management, and implementing management measures to reduce the negative effects of drought. The main objective of this study is to develop an accurate, region-specific, and reliable model for monitoring and analyzing drought at a local scale (Kermanshah province) in the future, and finally, future drought zoning for one of the critical plains of this province (i.e., the Kermanshah Plain) is presented.

Materials and Methods

In this study, the results of precipitation forecasting over the 40-year period 2021-2060 were downscaled using the output of the general circulation models HadGEM3-GC31, MRI-ESM2-0 and ACCESS-ESM1-5 using the LARS-WG8 statistical downscaling method under three scenarios: pessimistic, continuation of the current trend and optimistic. Then, the appropriate model for climate simulation of each station was selected using statistical tests in the form of Taylor diagrams. In the next stage, to investigate the impact of climate change on the drought situation in the region, the annual SPI drought index was used and the drought of future years was examined. Following this, drought zoning in the Kermanshah plain was carried out using drought data from the regional stations, using the IDW method in three scenarios: pessimistic, continuation of the current trend, and optimistic, in some years when severe drought conditions existed in several stations. In order to calibrate and verify the downscaling model under study, the LARS-WG8 model was first run for the base statistical period.

Results and Discussion

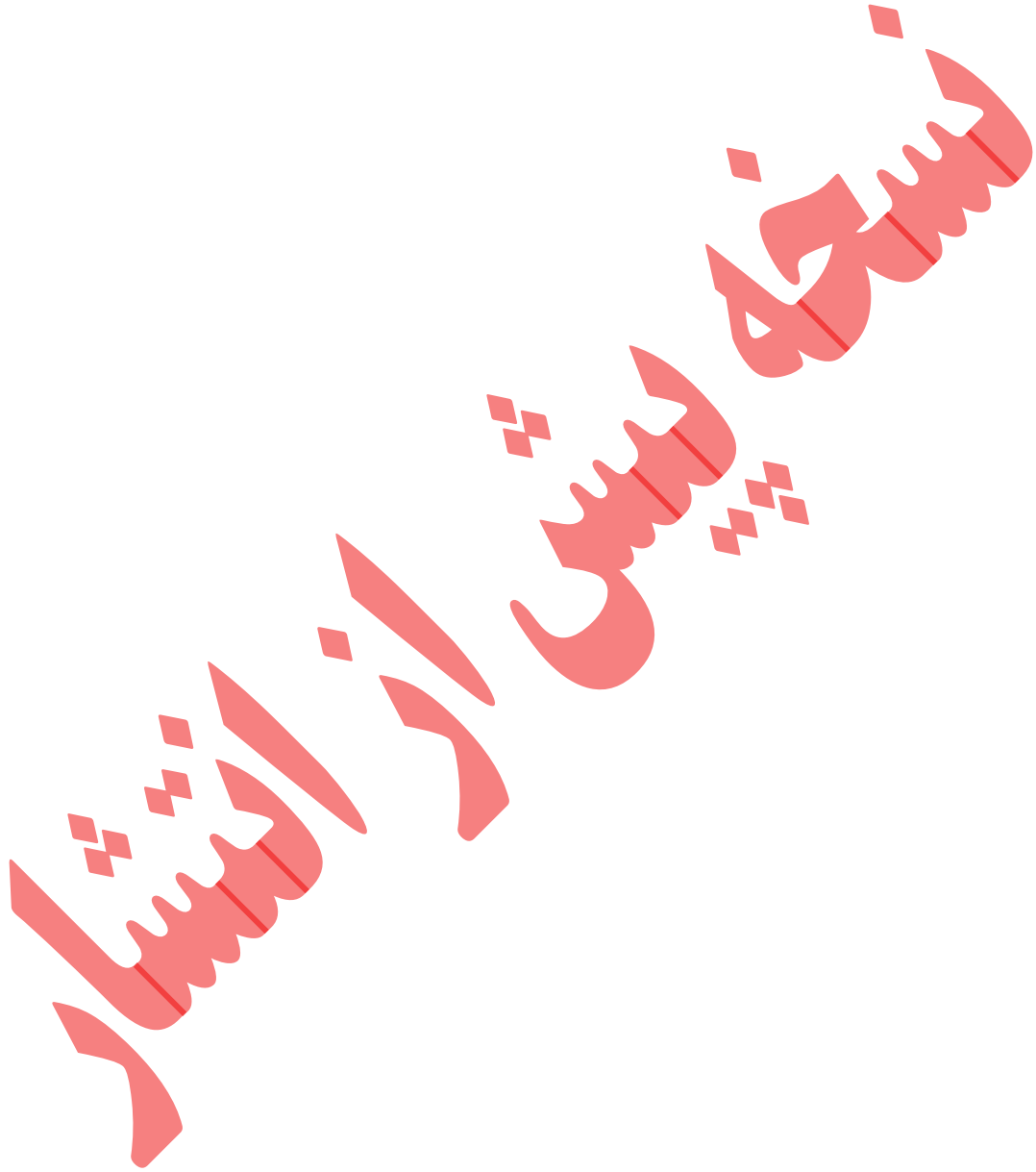
Based on the results of various evaluation criteria and the high similarity of observational data and generated data, the LARS-WG model had appropriate accuracy for downscaling climate parameters in the studied stations. According to the results of the Taylor diagram, the ACCESS-ESM1-5 model is used to simulate the precipitation of the stations of Kermanshah, Sonqor, Islamabad Gharb, Kangavar, Mahidasht, Sararud and Javanrud, and the MRI-ESM2-0 model is used to simulate the precipitation of the stations of Harsin, Ravansar and Sahneh. After ensuring the efficiency of the studied model, the amount of precipitation in future periods was predicted and its changes were calculated compared to the values of the base years., based on the results, average precipitation in most stations and scenarios shows a decreasing trend. This decline is expected to intensify drought conditions in the coming years.; in addition to the numerous adverse socio-economic effects, the intensification of drought will also have a negative impact on the agricultural performance of the region and future cropping patterns. The results of the drought zoning also showed that in the pessimistic scenario, a more severe drought is observed in the region compared to the other two scenarios.

Conclusion

Although the prediction of climate variables in the coming years is uncertain and using various models and scenarios of downscaling methods, a wide range of potential future outcomes can be predicted, it is expected that the occurrence of numerous droughts in the study area in recent years and the critical situation of water resources, especially groundwater resources, will exacerbate the possible negative effects of future climate change. Therefore, it is better for policymakers, especially in the agricultural sector, to adopt policies and strategies to adapt to climate change and water scarcity. Therefore, it is recommended that measures such as determining a cultivation pattern appropriate to the future climate of the regions, establishing early warning systems for climate events, promoting the cultivation of drought-resistant plants, encouraging polluting industries to reduce the use of fossil fuels and replace them with clean

energy, adopting carbon pricing policies in the transition towards sustainable production, and using modern irrigation methods, greatly reduce the damage caused by climate change and future droughts - which, given that a large part of the region's land is devoted to agriculture, is expected to be affected more than other economic sectors.

Keywords: Drought Management, Rainfall, Climate Change, General Circulation Models.



شبیه‌سازی خشکسالی دشت کرمانشاه با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری

فاطمه نصرنیا^{۱*}، مریم احسانی^{۲*}

۱- استادیار اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. (<https://orcid.org/0009-0000-6232>) (3284)

۲- دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشکده اقتصاد کشاورزی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران. (<https://orcid.org/0000-0001>) (9280-5428)

*نویسنده مسئول (maryamehsani@hafez.shirazu.ac.ir)

چکیده

پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر بارندگی و خشکسالی سال‌های آتی، در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب و اجرای اقداماتی در راستای کاهش اثرات منفی خشکسالی اهمیت زیادی دارد. در این مطالعه نتایج حاصل از پیش‌نگری بارش طی دوره ۴۰ ساله ۲۰۶۰-۲۰۲۱ به منظور درک تغییر اقلیم آینده در دشت کرمانشاه با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی HadGEM3-GC31، MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1-5 از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG8 تحت سه سناریوی بدبینانه، تداوم روند فعلی و خوشبینانه ریزمقیاس‌نمایی شد. پس از انتخاب مدل گردش عمومی مناسب، برای برآورد احتمال وقوع خشکسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی از شاخص خشکسالی SPI سالانه استفاده شد. نتایج نشان داد که روند بارندگی در اکثر ایستگاه‌ها و سناریوها کاهش یافته و این امر به تشدید خشکسالی طی سال‌های آینده خواهد انجامید؛ که این امر علاوه بر آثار سوء اقتصادی-اجتماعی فراوان، بر عملکرد کشاورزی منطقه و الگوهای کشت آبی نیز تاثیر منفی خواهد داشت. لذا توصیه می‌شود در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت، سیاست‌ها و راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی و کم‌آبی جهت مقابله و کاهش آثار منفی این رویداد اتخاذ شود.

واژگان کلیدی: مدیریت خشکسالی، بارندگی، تغییر اقلیم، مدل‌های گردش عمومی.

مقدمه

دمای سطح جهانی در طول قرن گذشته عمدتاً در نتیجه فعالیت‌های بشر در حال افزایش بوده و پیش‌بینی می‌شود تا زمانی که انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) به‌طور قابل توجهی کاهش یابد، روند افزایشی خواهد داشت (IPCC, 2022). از سال ۱۸۸۰ به‌طور متوسط، دما در هر دهه ۰/۰۸ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و سال ۲۰۲۰ گرم‌ترین سال ثبت‌شده با حدود ۰/۹۸ درجه سانتی‌گراد گرم‌تر از میانگین قرن بیستم در سراسر جهان بود (Lindsey & Dahlman, 2021). این افزایش دما، با تغییر بارش بر جریان رودخانه‌ها تاثیر گذاشته و منجر به حوادثی از جمله سیل و خشکسالی می‌شود (Trenberth, 2011). تغییرات اقلیمی تاثیر منفی محسوس‌تری بر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان داشته (Arias et al., 2021; Meijl et al., 2018) و می‌تواند باعث بروز تغییرات قابل توجهی بر میزان و الگوی بارش، دما، جریان آب و سایر پارامترهای اقلیمی شود (Stocker et al., 2013). در پهنه‌بندی اقلیمی جهان، ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (IPCC, 2007). بر اساس پیش‌بینی‌های هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم^۱ IPCC، ایران با افزایش دما، کاهش بارندگی و افزایش قابل توجه تبخیر-تعرق سالانه طی سال‌های آینده روبه‌رو خواهد شد و این مسئله را چالشی جدی برای ایران می‌داند. به‌گونه‌ای که بر اساس ارزیابی‌های طرح توانمندسازی تغییر آب‌وهوا، تا سال 2100 متوسط دمای ایران 1.5 تا 4.5 درجه سانتی‌گراد افزایش و میانگین بارش کشور نیز حدود 25 میلی‌متر کاهش خواهد یافت. مقدار

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

این کاهش در مقایسه با وضعیت نرمال، به‌ویژه برای فصول سرد حتی تا 50 میلی‌متر هم پیش‌بینی شده است (Hoseini et al., 2013). از سوی دیگر، مناطق مرتفع‌تر (از جمله استان کرمانشاه که در منطقه زاگرس واقع شده)، در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیرتر هستند (Buytaert et al., 2010) و به‌راحتی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی از قبیل کاهش 20 درصدی بارش که از سال 1990 تاکنون در منطقه اتفاق افتاده (Moradi et al., 2021)، قرار می‌گیرند. به‌گونه‌ای که این تغییرات بر خدمات این مناطق از جمله تامین آب برای نیروگاه‌های برق‌آبی و تولید محصولات کشاورزی تاثیر می‌گذارد (Khan & Naeem, 2023). لذا پیش‌بینی دقیق تغییرات اقلیمی آبی در مطالعات مربوط به منابع آب، کشاورزی، کیفیت هوا و انرژی باد به ویژه در مناطق آسیب‌پذیر اهمیت زیادی دارد (Xu et al., 2021).

خشکسالی یکی از بلاهای طبیعی تکرارپذیر و غیرقابل پیش‌بینی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که در نتیجه تغییر الگوهای جهانی متغیرهای آب‌وهوایی، به‌ویژه دما و بارندگی به‌وقوع می‌پیوندد (Khorrami & Gündüz, 2022). اثرات مخرب خشکسالی با روند صعودی تغییرات آب‌وهوایی، اقلیم و رشد جمعیت در ارتباط می‌باشد (Gerdener et al., 2020)؛ به نحوی که در طول قرن گذشته خشکسالی‌ها در نتیجه تغییرات اقلیمی ناشی از گرمایش جهانی بیش‌تر شده است (IPCC, 2021). در نتیجه‌ی افزایش بیش‌تر دما در آینده، الگوهای اقلیمی همچنان تغییر خواهند کرد و انتظار می‌رود فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در بسیاری از مناطق جهان افزایش یابد (Mukherjee et al., 2018). درک ویژگی‌های خشکسالی‌های آینده در زمینه تغییرات اقلیمی برای توسعه استراتژی‌های سازگاری و کاهش این رویدادها ضروری است (Behzadi et al., 2024). از این‌رو مشخص کردن دقیق روندهای مکانی-زمانی و تغییرات خشکسالی می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری و ارتقای مدیریت فعالیت‌های مقابله با خشکسالی کمک کند (Ghasempour et al., 2022). علاوه بر ارزیابی توزیع مکانی پدیده‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف، ارزیابی روند خشکسالی اهمیت قابل توجهی در تصمیم‌گیری برای اجرای اقدامات احتیاطی لازم دارد. درک شدت خشکسالی و شناسایی روند آن می‌تواند بینش ارزشمندی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و مناطق کشاورزی ارائه دهد (Nunno et al., 2024).

در پژوهش‌های بسیاری به موضوع تغییر اقلیم، آثار و عوامل موثر بر آن پرداخته شده است (Chen & Ford, 2023; Abbas et al., 2023). از جمله آثار تغییرات اقلیمی می‌توان به اثرات بلندمدت تغییر اقلیم بر فعالیت‌های اقتصادی (Kohn et al., 2019)، کاهش دسترسی به آب و در نتیجه کاهش تولید محصول و عملکرد کشاورزان (Gohar & Kashman, 2016)، تغییر سرمایه‌گذاری در سامانه‌های نوین آبیاری (Arvandi, 2024) و تاثیرگذاری بر شدت، تداوم و فراوانی وقوع خشکسالی (Alemu et al., 2024; Karatayev et al., 2022; Radmehr et al., 2024; Gaffari et al., 2022; Bong & Richard, 2019) اشاره نمود. شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی در مناطق مختلف، متفاوت است. به‌گونه‌ای که در پژوهش Abbas et al., (2023) نشان داده شد که فراوانی و شدت شاخص‌های حدی بارش با سناریوی SSP5-8.5 در پایان قرن بیست‌ویکم در مناطق جنوبی آسیا افزایش یافته و توزیع مکانی شاخص‌های حدی بارش نشان‌دهنده افزایش بیش‌تر این شاخص‌ها در قسمت‌های شرقی آسیای جنوبی نسبت به قسمت‌های غربی آن بوده است. در پهنه‌بندی اقلیمی دنیا، کشور ایران جزء مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود (IPCC, 2007). بر اساس ارزیابی‌های طرح اقدام برای توانمندسازی اقلیم²، که زیر نظر کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییر اقلیم³ در ایران صورت گرفته، چنانچه غلظت دی‌اکسیدکربن تا سال ۲۱۰۰ دو برابر شود، متوسط دمای ایران ۱/۵ تا ۴/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش و میانگین بارش کشور حدود ۱۰ درصد (تقریباً ۲۵ میلی‌متر) کاهش خواهد یافت. مقدار این کاهش در مقایسه با وضعیت نرمال به‌ویژه برای فصول سرد حتی تا ۲۰ درصد نیز پیش‌بینی شده است. شواهد فوق حاکی

² Action for Climate Empowerment (ACE)

³ UNFCCC

از غلبه شرایط اقلیمی گرم و خشک‌تر بر کشور در دهه‌های آتی نسبت به دوره تاریخی است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). در معدود مطالعات پیشین در خصوص تغییر اقلیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه، تفاوت‌هایی با پژوهش حاضر به چشم می‌خورد و در اغلب این پژوهش‌ها صرفاً به پایش تغییرات اقلیمی در یکی از ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه و بررسی توانمندی مدل LARS-WG در بازتولید داده‌های اقلیمی پرداخته شده است که از جمله این پژوهش‌ها می‌توان به (Heshmati & Ramezani, 2021)؛ Baharvand et al., 2019 و Almasi et al., 2024 اشاره نمود. همچنین در مطالعه (Heshmati & Ramezani, 2021)، پس از پیش‌بینی داده‌های اقلیمی آتی، وضعیت خشکسالی‌های آینده در ایستگاه کرمانشاه بررسی شد. در پژوهش حاضر علاوه بر پایش وضعیت اقلیمی آتی در ۱۰ ایستگاه هواشناسی استان کرمانشاه، وضعیت خشکسالی‌های آینده در این ایستگاه‌ها نیز با استفاده از شاخص SPI محاسبه شده و در انتها پهنه‌بندی خشکسالی‌های آتی در یکی از دشت‌های بحرانی استان صورت خواهد گرفت. به منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی، می‌توان از شاخص‌های خشکسالی مختلفی استفاده نمود که شاخص خشکسالی بارش استاندارد (SPI) در مطالعات مختلفی بدین منظور مورد استفاده قرار گرفته است (Alemu et al., 2024؛ Karatayev et al., 2022؛ Radmehr et al., 2024؛ Gaffari et al., 2022؛ Bong & Richard, 2019؛ Heshmati & Ramezani, 2021). لذا در این مطالعه نیز با توجه به مزایای مختلف شاخص SPI از جمله سادگی محاسبه و عدم نیاز به داده‌های متعدد، از این شاخص برای بررسی خشکسالی سال‌های آتی در منطقه دشت کرمانشاه استفاده می‌شود. بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی و تاثیر آن بر رویدادهای خشکسالی، سیلاب و غیره، به‌منظور مدیریت صحیح و کاستن از آسیب‌های احتمالی تغییرات اقلیمی به ویژه آسیب به منابع آب، بخش کشاورزی و امنیت غذایی جوامع (Emamzadeh et al., 2016)، ضروری است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه یک الگوی دقیق، منطقه‌محور و قابل اتکا برای پایش و تحلیل خشکسالی در مقیاس محلی (استان کرمانشاه) در آینده بوده و در نهایت پهنه‌بندی خشکسالی آتی برای یکی از دشت‌های بحرانی این استان (یعنی دشت کرمانشاه) ارائه شده است. فرض اصلی پژوهش نیز این است که انتظار می‌رود مانند بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، با کاهش بارندگی در سال‌های آتی، رویدادهای خشکسالی بیش‌تر و شدیدتری در منطقه دشت کرمانشاه مشاهده شود.

مواد و روش‌ها

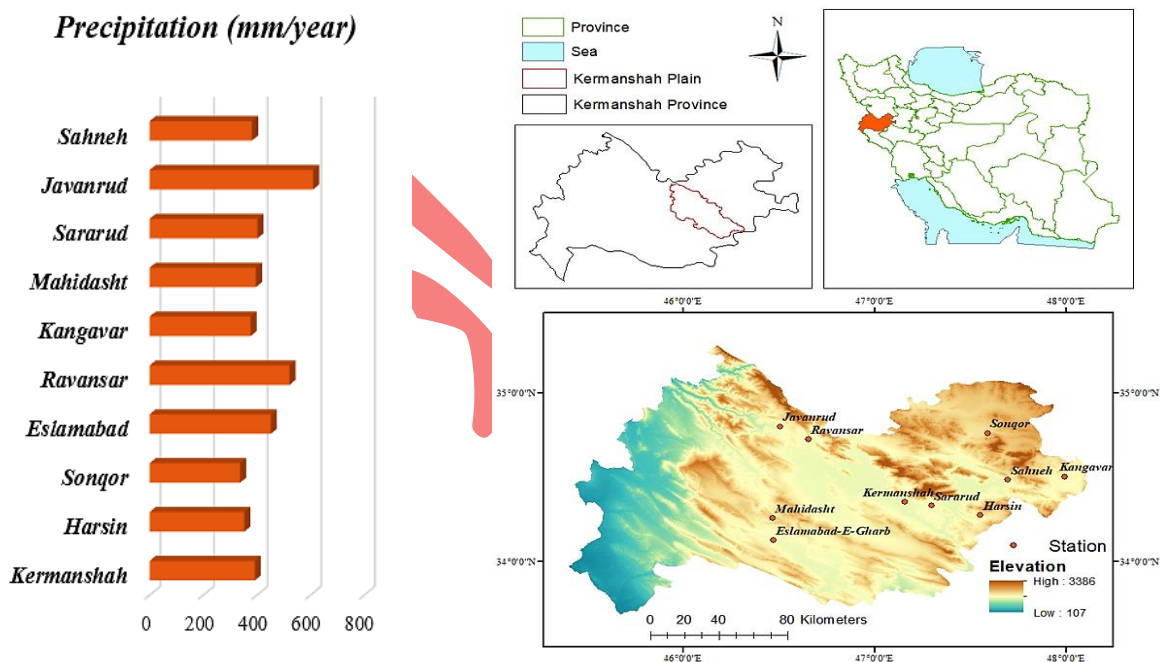
منطقه مورد مطالعه

استان کرمانشاه با وسعتی حدود ۲۵ هزار کیلومتر مربع در غرب ایران قرار گرفته و از نظر توپوگرافی عمدتاً کوهستانی است. ارتفاعات زاگرس، که بیش از نیمی از سطح استان را پوشش می‌دهند، نقش کلیدی در تغذیه منابع آب سطحی از طریق ذوب برف ایفا می‌کنند. قرارگیری استان در مسیر جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای و برخورد آن‌ها با رشته‌کوه‌های زاگرس، سبب بارندگی‌های نسبتاً زیاد در مقایسه با سایر نواحی غرب کشور شده است. بر اساس اطلاعات سازمان آب‌منطقه‌ای کرمانشاه، میانگین بارش سالانه در استان حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است.

در پژوهش حاضر از آمار و داده‌های آب‌وهوایی روزانه تعدادی از ایستگاه‌های هواشناسی استان کرمانشاه در دوره زمانی ۲۰۲۵-۱۹۹۴ استفاده شد. این ایستگاه‌ها دارای شرایط اقلیمی متفاوتی می‌باشند ولی به‌طور کلی اقلیم استان کرمانشاه معتدل کوهستانی است. در این استان سه منطقه آب‌وهوایی سردسیر، گرمسیر و معتدل وجود دارد که ارتفاع، جهت‌گیری ناهمواری‌ها، عرض جغرافیایی و فاصله از دریا از جمله عوامل محلی و ورود توده‌های هوا از جهات مختلف از عوامل بیرونی موثر بر آب‌وهوای مناطق مختلف این استان محسوب می‌شود. منطقه آب‌وهوایی سردسیر با تابستان‌های ملایم تا گرم و زمستان‌های سرد تا خیلی سرد، در مناطق مرتفع استان مشاهده می‌شود. میانگین دمای تابستان و زمستان این منطقه به ترتیب ۲۶/۶ و ۳/۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش آن ۵۳۸ میلی‌متر است که بیش‌تر آن به‌صورت برف دیده می‌شود. اراضی پست واقع در غرب استان، شامل قصرشیرین، سومار، سرپل‌ذهاب

و گیلان غرب از مناطق گرمسیری استان به شمار می‌روند که از ویژگی‌های این آب‌وهوا، تابستان‌های بسیار گرم و زمستان‌های ملایم بوده و عواملی مانند ارتفاع کم و مجاورت با بیابان‌های گرم عراق، زمینه‌ساز بروز این اقلیم بوده است. میانگین دمای تابستان و زمستان این منطقه ۳۲ و ۱۱ درجه سانتی‌گراد بوده و میانگین بارش آن نیز ۳۸۵ میلی‌متر می‌باشد که عمدتاً به صورت بارش باران است (سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه). منطقه معتدل نیز در حدفاصل دو منطقه گرمسیری غرب و سردسیری شرق و شمال شرق استان واقع شده است. موقعیت جغرافیایی و جزئیات ایستگاه‌های مورد بررسی در پژوهش حاضر به ترتیب در شکل (۱) و جدول (۱) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشخص است، اغلب ایستگاه‌های مورد بررسی در مرکز و شرق استان واقع شده‌اند و ایستگاه‌هایی که داده‌های کامل‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌های استان داشته‌اند بدین منظور انتخاب شده‌اند.

یکی از دشت‌های واقع در استان کرمانشاه، دشت کرمانشاه با وسعت ۶۷۲/۶۶ کیلومتر مربع (۶۷۲۶۶/۱۲ هکتار) بین طول جغرافیایی ۴۶/۷۷ تا ۴۷/۲۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۴/۲۹ تا ۳۴/۶۸ درجه شمالی می‌باشد. این دشت بخش بزرگی از شهر کرمانشاه با مساحت ۷۷ کیلومتر مربع را پوشش داده و در محدوده شهرستان کرمانشاه و بخش کوچکی از شهرستان‌های روانسر و هرسین قرار گرفته است. دشت کرمانشاه در معرض جبهه‌های مرطوب مدیترانه‌ای قرار داشته و میزان متوسط بارندگی آن حدود ۴۵۰ میلی‌متر در سال می‌باشد که بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، در دسته اقلیم نیمه‌خشک و استپی قرار می‌گیرد (سازمان آب منطقه‌ای کرمانشاه).



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی و موقعیت دشت کرمانشاه در استان کرمانشاه و میانگین بارش سالانه در هر ایستگاه
Fig 1. Location of the studied stations and the location of the Kermanshah Plain in Kermanshah Province and the average annual precipitation at each station

جدول ۱. جزئیات ایستگاه‌های مورد بررسی در استان کرمانشاه

Table 1. Details of the stations surveyed in Kermanshah province

نام ایستگاه Station Name	دوره مشاهداتی Observation period	عرض جغرافیایی Latitude (deg.)	طول جغرافیایی Longitude (deg.)	ارتفاع Elevation (m)
-----------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	--------------------------------------	-------------------------

کرمانشاه Kermanshah	1994/1/1-2025/1/1	34.352	47.29	1318.5
هرسین Harsin	2008/1/1-2025/1/1	34.26	47.55	1546
سنقر Songor	2005/1/1-2025/1/1	34.78	47.58	1700
اسلام آبادغرب Eslamabad-E-Gharb	1994/1/1-2025/1/1	34.12	46.47	1348.8
روانسر Ravansar	1994/1/1-2025/1/1	34.71	46.65	1380
کنگاور Kangavar	1994/1/1-2025/1/1	34.5	47.98	1468
ماهیدشت Mahidasht	1995/1/1-2025/1/1	34.28	46.85	1370
سرارود Sararud	2003/6/1-2025/1/1	34.33	47.29	1361.7
جوانرود Javanrud	2006/1/1-2025/1/1	34.76	46.5	1375.4
صحنه Sahneh	2005/2/1-2025/1/1	34.47	47.7	1382

مدل های گردش عمومی

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و پیش بینی تغییرات آب و هوایی آینده عموماً مبتنی بر مدل های گردش عمومی^۴ (GCM) صورت می گیرد. مدل های GCM موثرترین ابزارها برای پیش بینی تغییرات اقلیمی آینده هستند (Khan et al., 2017)، زیرا سری های اقلیمی آینده را تحت سناریوهای انتشار شیبه سازی می کنند. هیئت بین الدول تغییر اقلیم^۵ (IPCC) هر چند سال یکبار، گزارش هایی را از وضعیت اقلیم، سناریوهای تغییرات اقلیمی، اثرات آن بر جوامع و محیط زیست، سازگاری با این پدیده و کاهش آسیب پذیری ها در مقیاس جهانی و منطقه ای ارائه می دهد (IPCC, 2021). بدین منظور از دهه ۱۹۹۰ مقایسه مدل های جفت شده^۶ (CMIP) برای درک بهتر تغییرات اقلیمی گذشته ارائه شده است (Annan and Hargreaves, 2011). فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل جفت شده^۷ (CMIP6) الگوی تکامل و ویژگی های سازگاری فاز پنجم را ادامه می دهد و شامل سناریوهای جدید سازماندهی شده از مدل سازی اقلیمی جهانی است که برای شناخت مکانیسم های مختلف آب و هوا طراحی شده است. این گزارش نسبت به گزارش پنجم کامل تر بوده و نواقص مدل های سری پنجم رفع شده است (IPCC, 2021). سناریوهای گزارش ششم شامل پنج زیرگروه اصلی به شاخص های کمی از جمله جمعیت، شهرنشینی، توسعه اقتصادی، منطقه ای و فرمانطقه ای و سناریوهای تعمیم یافته (اثرات، سازگاری و کاهش آسیب پذیری) برنامه انرژی و تغییرات کاربری اراضی تاکید دارد. مشاهدات خروجی مدل های گزارش ششم تحت سناریوهای جدید (SSP) هستند، که خطوط سیر بخش های مشترک اقتصادی-اجتماعی یا به عبارتی مسیرهای پایدار اجتماعی است و در واقع سناریوهای مختلفی برای توسعه اقتصادی، جمعیت و تکنولوژی در آینده و غلظت های مختلف گازهای گلخانه ای را توصیف می کند (Sarabi et al., 2020). سناریوهای اقلیمی استفاده شده برای پیش بینی خشکسالی ایستگاه های منتخب کرمانشاه در این پژوهش

⁴ General Circulation Models

⁵ Intergovernmental Panel on Climate Change

⁶ Coupled Model Intercomparing Project

⁷ Coupled Model Intercomparing Project Phase 6

سه سناریوی خوشبینانه، متوسط و بدبینانه⁸ SSP1-2.6، SSP2-4.5⁹ و SSP5-8.5¹⁰ می‌باشند. مدل‌های گردش عمومی مختلفی در پژوهش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند که در این پژوهش از سه مدل ACCESS-ESM1-5، HadGEM3-GC31، و MRI-ESM2-0 با توجه به دقت بالایی که در مطالعات مناطق مختلف ایران داشته‌اند، استفاده می‌شود.

ریزمقیاس‌نمایی

با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) این مدل‌ها وضوح تقریبی داشته و لازم است که خروجی‌های آنها برای ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی منطقه‌ای (Zhang et al., 2019; Fatehifar et al., 2021) و ایجاد ارتباط بین پیش‌بینی-کننده‌های جوی بزرگ‌مقیاس و متغیرهای پیش‌بینی‌شونده (عموما دما و بارش)، ریزمقیاس شوند. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی، طیفی از روش‌ها را شامل می‌شود که از فرآیندهای پیچیده مانند ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی¹¹ تا تکنیک‌های ساده‌تر مانند ریزمقیاس‌نمایی آماری¹² را دربرمی‌گیرد. در حالی که مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی به منابع محاسباتی قابل توجه، زمان و مقادیر بالایی از داده‌های ورودی نیاز دارند، ریزمقیاس‌نمایی آماری جایگزینی ساده‌تر، کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر محسوب می‌شود (Shayanmehr et al., 2022). لذا با توجه به محدودیت منابع محاسباتی و داده‌های ورودی محدود در این پژوهش از ریزمقیاس‌نمایی آماری استفاده می‌شود. یکی از تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری که در مطالعات اقلیمی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، LARS-WG است (Ma et al., 2021; Sha et al., 2021; Helmi et al., 2024) که در طیف متنوعی از شرایط هواشناسی عملکرد خوبی دارد (Khan & Naeem, 2023). این روش یک مولد تصادفی آب‌وهوا برای اصلاح خروجی‌های مکانی و زمانی بزرگ از مدل‌های گردش عمومی جو به مقیاس دقیق‌تر است که امکان تولید داده‌های آب‌وهوایی در یک مکان خاص را فراهم نموده (Radmehr et al., 2024) و سناریوهای تغییرات اقلیمی با وضوح بالا را برای یک منطقه تولید می‌کند (Semenov et al., 2024). این مدل از توزیع‌های احتمال نیمه‌تجربی برای تخمین توزیع متغیرهای اقلیمی و تولید داده‌های مصنوعی استفاده می‌کند. پارامترهای توزیع هر متغیر آب‌وهوایی بر اساس داده‌های اقلیمی مشاهده شده تعیین می‌شوند. در مرحله اول تولید داده‌ها، وقوع بارندگی با تناوب بین دوره‌های تر و خشک مدل‌سازی شده و مدت زمان این دوره‌ها با استفاده از توزیع‌های احتمال نیمه‌تجربی متناسب با هر دوره تخمین زده می‌شود. سپس میزان بارش در روزهای تر با نمونه‌گیری تصادفی از توزیع‌های نیمه‌تجربی خاص هر دوره مدل‌سازی می‌شود. برای شبیه‌سازی سری‌های دمای حداکثر و حداقل، چرخه‌های میانگین و انحراف معیار روزانه از سری‌های مشاهده‌شده بر اساس طبقه‌بندی آن روز به عنوان مرطوب یا خشک استخراج می‌شوند. تخمین دمای حداکثر و حداقل برای روزهای خشک یا مرطوب نیز با استفاده از توزیع‌های نیمه‌تجربی صورت می‌گیرد (Khazaei, 2025). در این پژوهش از آخرین نسخه این مدل یعنی LARS-WG8 استفاده شده و داده‌های بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی تا ابتدای سال ۲۰۲۵ به عنوان داده‌های مشاهده‌ای به کار می‌رود.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG

استفاده از روش‌ها و مدل‌های اقلیمی مختلف باید با لحاظ عدم قطعیت‌های احتمالی صورت گیرد، تا دقت این برآوردها به حد قابل قبولی افزایش و امکان مدیریت منابع را بر اساس نتایج تحلیل‌های مبتنی بر آن در دوره‌های آتی فراهم سازد (Zareian, 2021). عدم قطعیت‌های مدل‌های مختلف اقلیمی می‌تواند ناشی از عواملی مانند داده‌های مشاهداتی اندک، پارامترسازی ضعیف مدل‌ها یا

⁸ Shared Socioeconomic Pathway 126

⁹ Shared Socioeconomic Pathway 245

¹⁰ Shared Socioeconomic Pathway 585

¹¹ Dynamical Downscaling (DD)

¹² Statistical Downscaling (SD)

تفکیک افقی آن‌ها باشد. لذا از برخی آزمون‌های آماری به منظور کالیبره کردن و اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده می‌شود. دلایل متعددی برای استفاده از این ابزارهای آماری وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها سنجش میزان برازش بین داده‌های مشاهده‌شده و مدل‌سازی شده است (Hamidi & Roshani, 2023). برای ارزیابی و تحلیل عملکرد مدل‌های گوناگون، شاخص‌های عملکرد متفاوتی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا^{۱۳} (RMSE) و میانگین خطای مطلق^{۱۴} (MAE) اشاره نمود. ضریب تعیین، یک معیار بدون بُعد بوده و بهترین مقدار آن ۱ است (Salahi et al., 2017) (رابطه ۱):

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_o X_s}{\sum_{i=1}^N X_o^2 X_s^2} \quad (1)$$

همچنین RMSE به عنوان معیاری برای نشان دادن تفاوت بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر واقعی و مقایسه بین مدل‌های مختلف، به عنوان رایج‌ترین شاخص خطا استفاده می‌شود (Lin et al., 2006). هرچه مقادیر RMSE کمتر باشد، همبستگی داده‌ها دارای بیش‌ترین دقت است (Chai & Draxler, 2014) (رابطه ۲):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (2)$$

شاخص MAE برای مقایسه خطای بین مشاهدات زوجی مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر واقعی به کار می‌رود (Hu et al., 2001) (رابطه ۳):

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (3)$$

در روابط (۱) تا (۳)، X_o ، داده‌های مشاهده‌شده، X_s ، داده‌های شبیه‌سازی‌شده و N مقدار داده‌ها را نشان می‌دهد.

انتخاب مدل گردش عمومی مناسب

برای تجزیه و تحلیل، ارزیابی و انتخاب مدل گردش عمومی مناسب در این پژوهش از نمودار تیلور استفاده می‌شود. نمودار تیلور بر مبنای ارتباط هندسی بین ضریب همبستگی، انحراف معیار سری‌های زمانی و مجذور میانگین مربعات خطا (Taylor, 2001, Azizi et al., 2016) و به صورت نیم‌دایره (نمایش همبستگی مثبت و منفی) و یا ربع‌دایره (فقط نمایش همبستگی مثبت) ارائه می‌شود. به این صورت که مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن، مقادیر انحراف معیار به صورت دواپر متحدالمرکز نسبت به مرکز دایره و مقادیر مجذور میانگین مربعات خطا، به صورت دواپر متحدالمرکز نسبت به نقطه مرجع (دایره توخالی روی محور افقی) ترسیم می‌شود (Azizi et al., 2016). از بین روش‌های مورد بررسی، هرچه مقدار پیش‌بینی شده از نظر ضریب همبستگی و انحراف معیار به ارزش مشاهده‌شده نزدیک‌تر باشد، پیش‌بینی بهتری را نشان می‌دهد (Dehghani et al., 2020).

شاخص خشکسالی بارش استاندارد

شاخص بارش استاندارد^{۱۵} (SPI)، یکی از نمایه‌های خشکسالی است که بر محاسبه احتمال بارش در هر پنجره زمانی استوار است. نخستین گام در محاسبه شاخص برازش یک توزیع آماری مناسب بر سری زمانی داده‌های بارش می‌باشد. بر اساس مطالعه Bazrafshan (2002)، در اقلیم‌های مختلف ایران و در چهار پنجره زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه از بین توزیع‌های مختلف، توزیع گاما برازش مناسب‌تری بر داده‌های بارش دارد و تابع چگالی احتمال آن به صورت رابطه (۴) می‌باشد:

$$f_x(x) = \frac{(x/\beta)^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (4)$$

¹³ Root Mean Square Error

¹⁴ Mean Absolute Error

¹⁵ Standard Precipitation Index

که در آن α ، پارامتر شکل، β ، پارامتر مقیاس، مقدار بارش و تابع $\Gamma(\alpha)$ ، تابع گاما می‌باشد. در مرحله بعد، تابع توزیع احتمال تجمعی کل بارش ($f_x(x)$) که دربرگیرنده مقادیر صفر هم باشد (چون تابع گاما به ازای بارش صفر میلی‌متر تعریف نشده است و توزیع بارش ممکن است دارای مقادیر صفر باشد) به صورت رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$f_x(x) = q + (1-q) f_x(x) \quad (5)$$

که در آن q احتمال بارش صفر می‌باشد. اگر m تعداد داده‌های بارش باشد که مقدار آن‌ها در سری زمانی معادل صفر است، آن‌گاه q از رابطه (۶) بدست می‌آید:

$$q = m/n \quad (6)$$

پس از محاسبه تابع تجمعی کل ($H_x(x)$) تغییر شکل هم احتمال تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z (یا SPI) با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد. جهت تبدیل احتمالات تجمعی به متغیر تصادفی نرمال استاندارد از تقریب Abramowitz & Stegun (1965؛ Abramowitz & Stegun, 1965؛ Bazrafshan & Hejabi, 2017) به صورت روابط (۷) و (۸) می‌توان استفاده نمود:

$$Z = \text{SPI} = - \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad \text{for } 0 < H_x(x) \leq 0.5 \quad (7)$$

$$Z = \text{SPI} = + \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad \text{for } 0.5 < H_x(x) \leq 1.0 \quad (8)$$

که در روابط (۹) و (۱۰):

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H_x(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0 < H_x(x) \leq 0.5 \quad (9)$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H_x(x))^2}\right)} \quad \text{for } 0.5 < H_x(x) \leq 1.0 \quad (10)$$

ضرایب روابط بالا نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند (Rahnama et al., 2022) (رابطه ۱۱):

$$\begin{aligned} C_0 &= 2.515517 & C_1 &= 0.802853 & C_3 &= 0.010328 \\ d_1 &= 1.432788 & d_2 &= 0.189269 & d_3 &= 0.001308 \end{aligned} \quad (11)$$

برای تعیین درجه خشکسالی در سال‌های مختلف لازم است که آستانه‌هایی برای SPI تعریف شوند که این آستانه‌ها در جدول (۲) ارائه شده‌اند:

جدول ۲. طبقه‌بندی شاخص‌های خشکسالی SPI (Mishra et al., 2005 و Willeke et al., 1994)

Table 2. Classification of SPI drought indicators (Mishra et al., 2005 and Willeke et al., 1994)

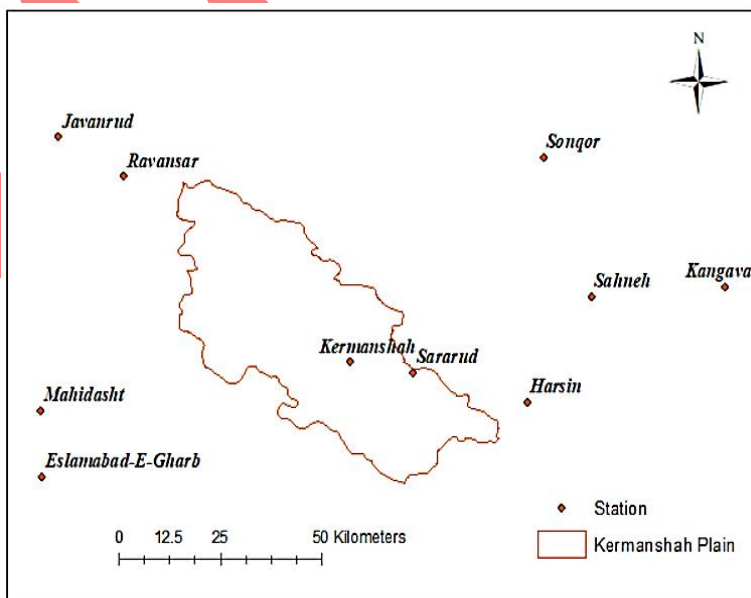
طبقات خشکسالی	Drought class	SPI
ترسالی بسیار شدید	Extreme wet	>2
ترسالی شدید	Severe wet	1.5 to 1.99
ترسالی متوسط	Moderate wet	1 to 1.49
نرمال	Normal	-0.99 to 0.99
خشکسالی متوسط	Moderate drought	-1 to -1.49
خشکسالی شدید	Severe Drought	-1.5 to -1.99
خشکسالی بسیار شدید	Extreme drought	<-2

پهنه‌بندی خشکسالی سالانه با استفاده از روش IDW

بررسی تغییرات مکانی بارش و خشکسالی، نقش مهمی در تحلیل وضعیت هیدرولوژیکی و ارزیابی امنیت آب دارد (Zhang et al., 2024). با توجه به نقطه‌ای بودن داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی و در نتیجه داده‌های خشکسالی، به‌منظور تعمیم این داده‌ها به سطح منطقه‌ای، از روش‌های درون‌یابی مکانی استفاده شد. در این پژوهش، از روش معکوس وزنی فاصله^{۱۶} (IDW)، برای تهیه نقشه خشکسالی سالانه استفاده گردید. روش IDW یک روش قطعی درون‌یابی است که بر اساس کاهش تدریجی تأثیر نمونه‌ها با فاصله، مقادیر مجهول را برآورد می‌کند. این روش فرض می‌کند که پدیده مکانی در نقاط اندازه‌گیری نشده بیشترین شباهت را با نزدیک‌ترین نقاط دارد. مقدار در نقطه مجهول با استفاده از میانگین وزنی مقادیر نقاط اطراف، مطابق رابطه (۱۲)، محاسبه می‌شود (Keshtkar et al., 2021):

$$\hat{Z}(X_0) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(X_i) d_{ij}^{-W}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-W}} \quad (12)$$

که در آن X_0 محل سایت اندازه‌گیری شده، X_i محل سایت‌های نمونه‌گیری مجاور، W وزن محاسبه‌شده و d_{ij} فاصله بین محل محاسبه و مکان‌های اندازه‌گیری شده است. این معادله شامل تأثیر دادن وزن‌های نسبتاً بزرگ به مکان‌های نمونه‌برداری شده در نزدیکی محل درون‌یابی در مقایسه با مکان‌هایی است که دورتر هستند و تأثیر کمی دارند (Keshtkar et al., 2021). استفاده از روش‌های درون‌یابی، منوط به استفاده از ایستگاه‌های کافی و با فاصله کم است تا پهنه‌بندی از دقت و اعتبار علمی لازم برخوردار باشد و در صورت استفاده از داده‌های معتبر و کافی، می‌تواند به خوبی گویای میزان شدت آن پدیده در یک منطقه کوچک‌تر هم باشد (Khosravi et al., 2013). لذا علاوه بر ایستگاه‌های واقع در محدوده مورد بررسی (شامل ایستگاه‌های کرمانشاه و سرارود)، از تعدادی ایستگاه کمکی در مجاورت منطقه (شامل ایستگاه‌های روانسر، اسلام‌آبادغرب، سنقر، ماهیدشت، هرسین، جوانرود، کنگاور و صحنه) نیز به‌منظور افزایش دقت پهنه‌بندی خشکسالی استفاده شده است که در شکل (۲) موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده نسبت به دشت کرمانشاه نشان داده شده‌اند.



شکل ۲. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در پهنه‌بندی خشکسالی، نسبت به دشت کرمانشاه

Fig 2. Location of stations used in drought zoning, relative to the Kermanshah Plain

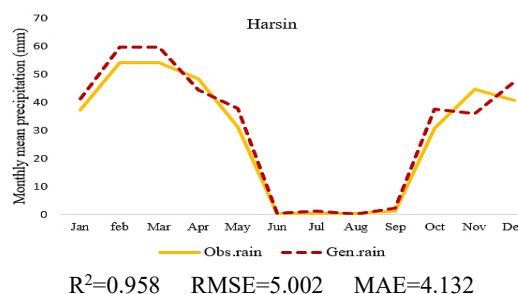
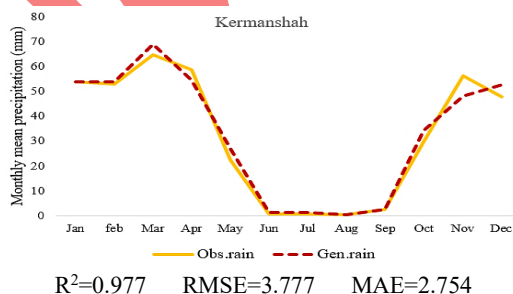
¹⁶ Inverse Distance Weighted (IDW)

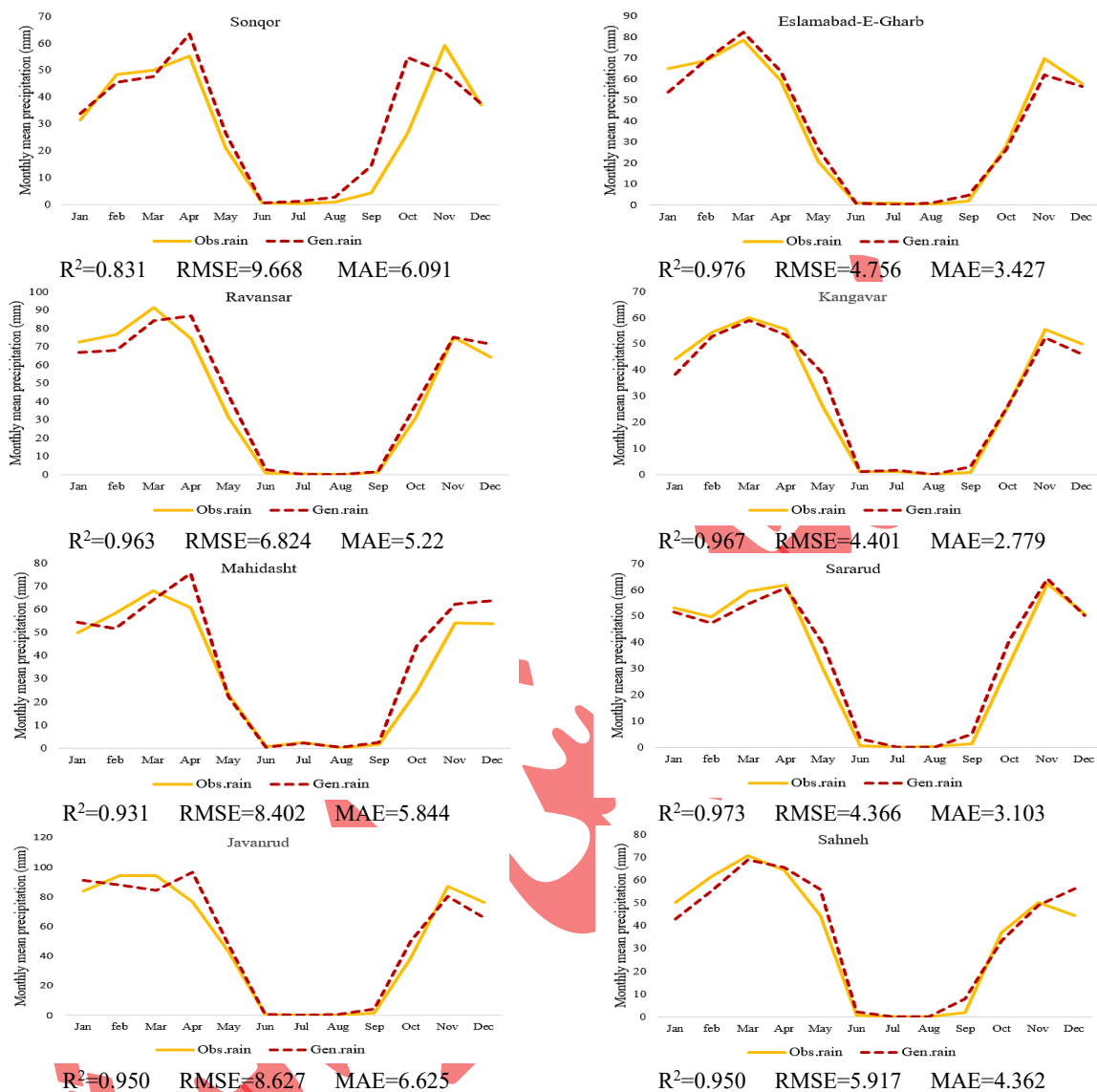
نتایج و بحث

تعداد ۱۰ ایستگاه در دشت کرمانشاه و اطراف آن به منظور پایش وضعیت خشکسالی و بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی در این دشت برای بازه زمانی ۲۰۲۵-۱۹۹۴ مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین میانگین بارندگی در دوره پایه در ایستگاه‌های مورد بررسی (همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده) مربوط به ایستگاه‌های جوانرود و روانسر بوده و کمترین میانگین بارندگی دوره پایه نیز در ایستگاه‌های سنقر و هرسین مشاهده شد. به منظور شبیه‌سازی بارندگی در سال‌های آتی، از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری استفاده و بارندگی روزانه ایستگاه‌های مورد بررسی تا سال ۲۰۶۰ شبیه‌سازی شد. سپس با استفاده از داده‌های پیش‌بینی شده، وضعیت خشکسالی در سال‌های آتی در این منطقه مورد بررسی قرار گرفت. در انتخاب مناطق از بین ایستگاه‌های هواشناسی فعال در استان کرمانشاه، ایستگاه‌هایی که دارای داده‌های کامل‌تر و بامدت زمان طولانی‌تری بودند، انتخاب شده و در مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، برای تکمیل معبود داده‌های مفقود (که شامل درصد بسیار کمی از داده‌ها می‌شد)، با استناد به مطالعه (Rezaee Pazhand, 2001) از میانگین آمار ایستگاه مورد نظر استفاده شد.

واسنجی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG

به‌منظور کالیبره کردن و صحت‌سنجی مدل ریزمقیاس‌نمایی مورد بررسی، ابتدا مدل LARS-WG8 برای دوره آماری پایه اجرا شد. بر اساس نتایج معیارهای ارزیابی مختلف و مشابهت بالای داده‌های مشاهداتی و داده‌های تولیدشده، مدل LARS-WG جهت ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای اقلیمی در ایستگاه‌های مورد بررسی دقت مناسبی دارد. نتایج پس از واسنجی بر پایه آزمون‌های نکویی برازش (آزمون‌های F ، t ، $K-S$ و مقدار p) به منظور صحت‌سنجی سری زمانی در دوره پایه بر اساس فایل ایجادشده در مرحله واسنجی تولید شد و با اطلاعات مشاهداتی مقایسه شد. سپس خروجی‌های مدل شامل بارندگی روزانه و انحراف‌معیار آن با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های مورد بررسی مقایسه شده و خطای بین مقادیر تولیدشده و مشاهداتی با استفاده از شاخص‌های $RMSE$ و MAE در کلیه ایستگاه‌ها بررسی شد که نتایج آن در نمودارهای (۳) ارائه شده است. گرچه دقت شبیه‌سازی‌ها در ایستگاه‌های مختلف یکسان نیست، اما نتایج کلی نشان‌دهنده بالابودن R^2 و اندک بودن ضرایب خطای مورد بررسی و در نتیجه کارایی بالای مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG8 جهت ریزمقیاس‌نمایی اطلاعات در منطقه مورد مطالعه است. مقدار ضریب تعیین (R^2)، مجذور میانگین مربعات خطا ($RMSE$) و میانگین خطای مطلق (MAE) در پژوهش حاضر مشابه مقادیر R^2 ، $RMSE$ و MAE در پژوهش‌های پیشین از جمله Lotfi et al., (2022) می‌باشد. در پژوهش Heydari Tasheh Kabood (2020) نیز دقت بالای مدل LARS-WG در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش حوضه دریاچه ارومیه نشان داده شد.





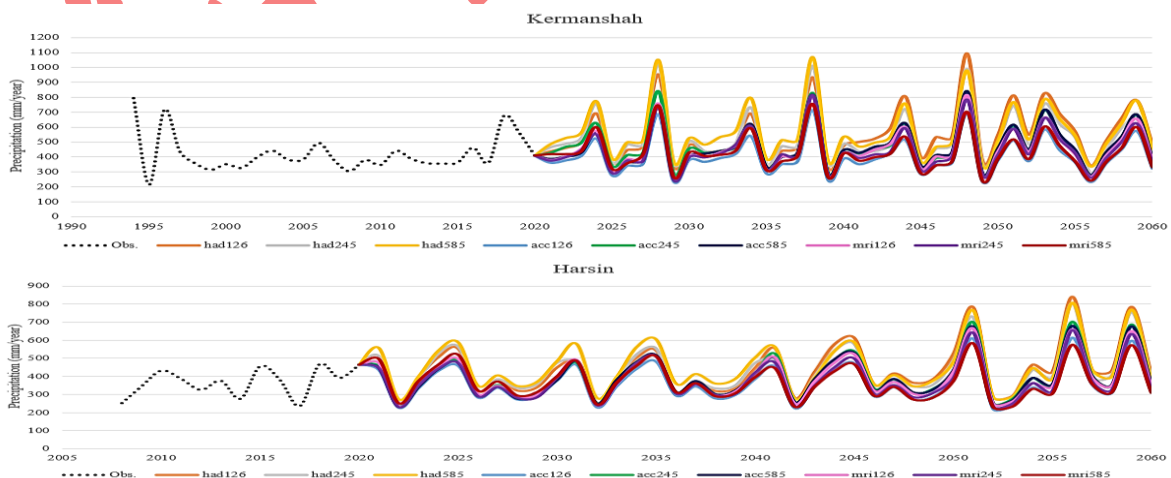
شکل ۳. صحت‌سنجی مدل به وسیله داده‌های اقلیمی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل LARS-WG برای دوره ۱۹۹۴-۲۰۲۰
Fig 3. Model validation using observed and simulated climate data by the LARS-WG model for the period 1994-2020

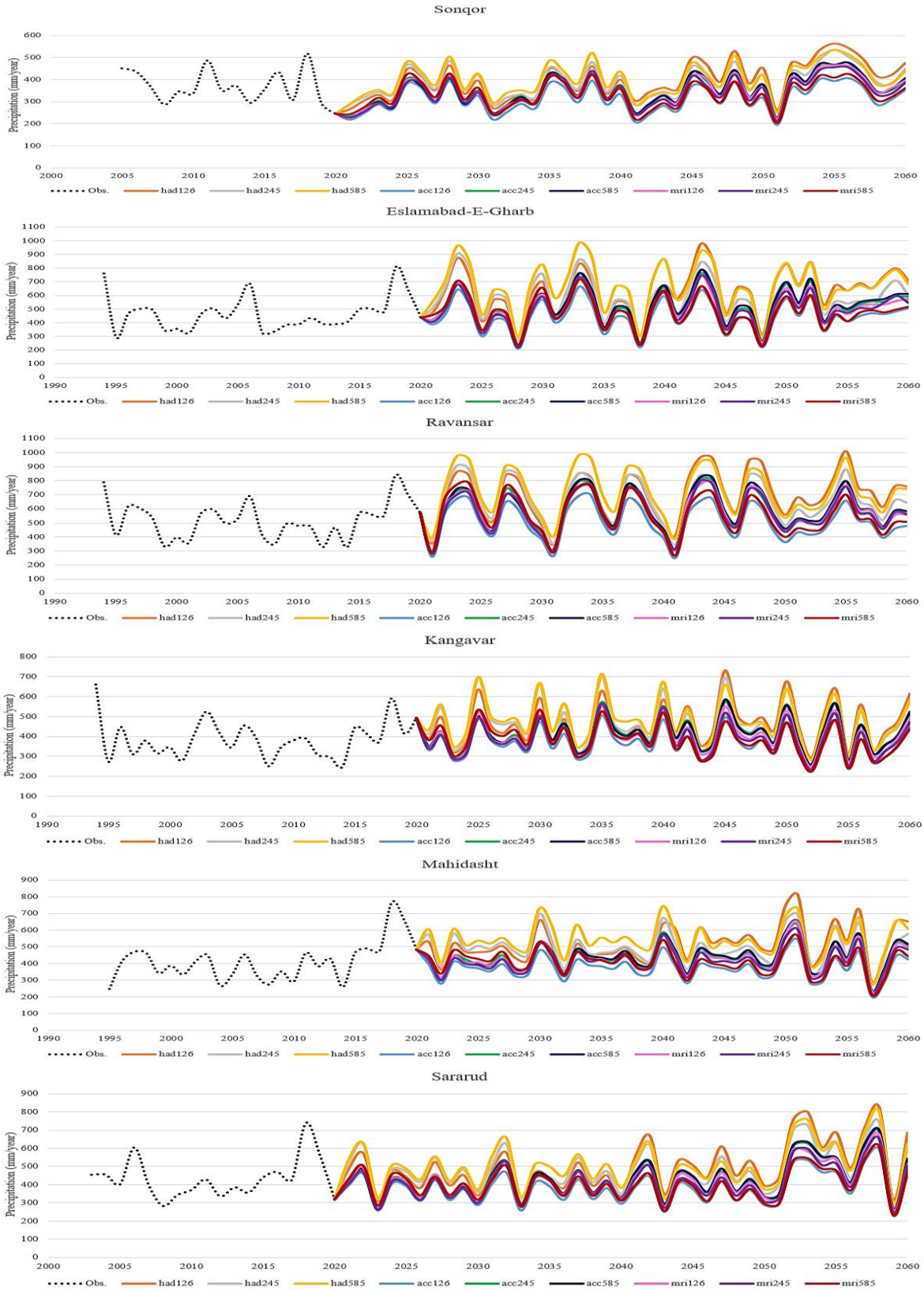
بررسی تغییرات آبی بارندگی در منطقه:

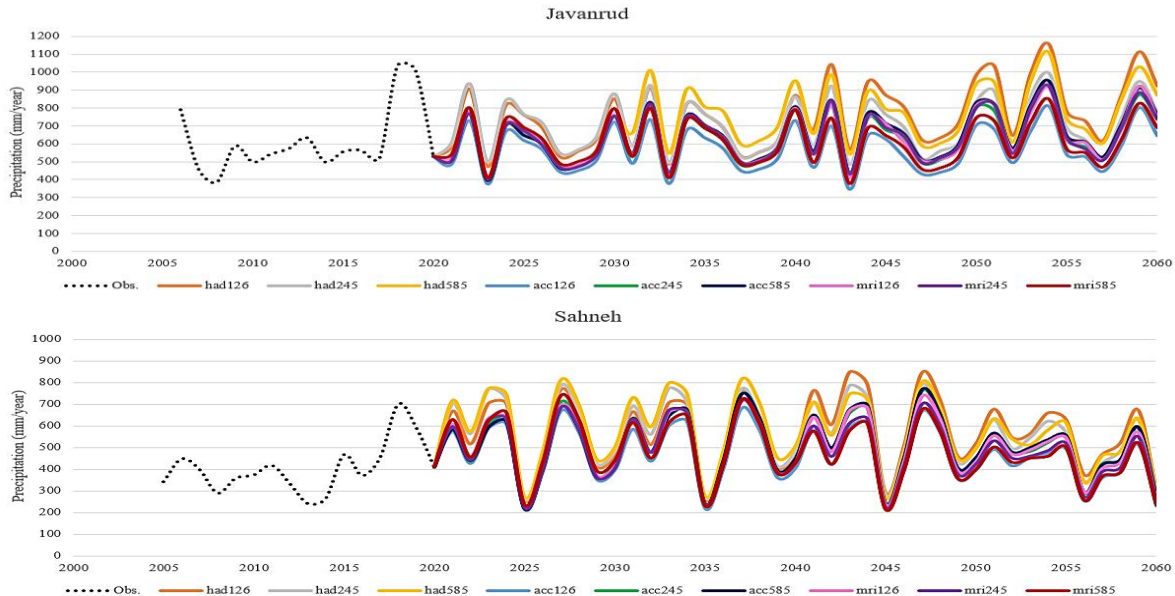
پس از اطمینان از کارایی مدل مورد بررسی، میزان بارندگی پیش‌نگری‌شده در دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۶۰ در کلیه ایستگاه‌ها با استفاده از مدل‌های گردش عمومی HadGEM3-GC31، MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1-5 از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG8 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌نگری شده و تغییرات آن نسبت به مقادیر سال‌های پایه محاسبه شد که نتایج روند تغییرات آن در طول زمان در قالب نمودار (۴) و نمودار تغییرات آن نسبت به سال پایه در قالب نمودار heatmap در شکل (۵) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است، تغییرات بارش بر اساس اکثر سناریوها کاهش یافته و بیش‌ترین مقدار تغییر بارندگی شبیه‌سازی‌شده، افزایشی به میزان 18.6 میلی‌متر در سال و مربوط به ایستگاه جوانرود (بر اساس سناریوی خوش‌بینانه) و کمترین مقدار تغییر بارندگی شبیه‌سازی‌شده کاهش به میزان 0.03 میلی‌متر و مربوط به ایستگاه‌های

صحنه و سرارود می‌باشد. بیش‌ترین کاهش در مقدار بارندگی شبیه‌سازی‌شده نیز 5.35 میلی‌متر در سال نسبت به دوره پایه می‌باشد که در ایستگاه سنقر روی خواهد داد. بیش‌ترین کاهش در میزان بارندگی در کلیه ایستگاه‌ها در مدل ACCESS-ESM1-5 مشاهده می‌شود. بیش‌ترین کاهش در میانگین بارندگی سناریوهای مختلف نسبت به سال‌های پایه، به ترتیب در ایستگاه‌های سنقر، کنگاور و ماهیدشت (در شمال‌شرقی و غرب دشت کرمانشاه) و بیش‌ترین افزایش در میانگین بارندگی سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه به ترتیب در ایستگاه‌های اسلام‌آبادغرب، روانسر و جوانرود (در غرب و شمال‌غربی دشت کرمانشاه) مشاهده می‌شود. در پژوهش (Gaitan et al., 2019) نیز به پیش‌بینی کاهش بارندگی در سال‌های آتی در حوضه رودخانه Maning در استرالیا اشاره شده است. کاهش بارندگی در سال‌های آتی همچنین در پژوهش (Misra (2014) و Davarpanah et al., (2021) اشاره شده و اثرات منفی کاهش بارندگی در سال‌های آتی با افزایش دما بیش‌تر نمایان می‌شود (Rao et al., 2014). طبق نتایج پژوهش Goodarzi et al., (2017) نیز تا سال ۲۰۳۹ کاهش حدوداً ۲ درصدی بارش در ایستگاه کرمانشاه مشاهده می‌شود.

گرچه برخی از ایستگاه‌ها و سناریوها، افزایش بارش طی سال‌های آتی را نشان می‌دهند که مشابه نتایج پژوهش Khan & Naeem, (2023) است؛ اما به‌طور کلی افزایش گرمایش جهانی پیش‌بینی‌شده تا حدودی افزایش بارندگی در این مناطق را توضیح می‌دهد و با توجه به درک فیزیکی از مکانیسم‌های ترمودینامیکی، پیش‌بینی می‌شود که چرخه جهانی آب با افزایش دما در رابطه با انتقال رطوبت در جو و تعامل با سطح زمین و اقیانوس تقویت شود (Donat et al., 2016). افزایش جزئی بارش در ایستگاه‌های مذکور (شامل اسلام‌آبادغرب، روانسر و جوانرود)، می‌تواند فرصت مناسبی برای کشاورزان دیم‌کار در جهت افزایش عملکرد محصول به وجود آورد. با این حال، از آن‌جا که افزایش بارندگی باعث افزایش آب آبی و کاهش آب سبز (ذخیره آب در خاک که کاهش آن منجر به فرسایش خاک و کاهش امنیت خاک می‌گردد) می‌شود (Eekhout et al., 2018)، این افزایش می‌تواند با افزایش خطر سیل و فرسایش خاک در مناطق مذکور توأم باشد. همچنین با توجه به نتایج بارندگی، مشاهده می‌شود که در برخی ایستگاه‌ها در وضعیت سناریوی خوشبینانه، تغییرات بارندگی نسبت به سناریوی بدبینانه بیش‌تر است که مشابه نتایج پژوهش Shahi et al., (2024) است که در آن بیش‌ترین میزان تغییرات بارندگی حوضه آبریز شهید شاهچراغی دامغان مربوط به سناریوی SSP1-2.6 بوده است. در پژوهش زهره‌وندی و همکاران (۱۳۹۹) به کاهش 7.7 درصدی بارش در سه استان کرمانشاه، کردستان و همدان در دوره‌های آتی و در پژوهش (Gaitan et al., 2019) نیز به پیش‌بینی کاهش بارندگی در سال‌های آتی در حوضه رودخانه Maning در استرالیا اشاره شده است، که مشابه نتایج پژوهش حاضر است.







شکل ۴. تغییرات بارندگی شبیه سازی شده با مدل ها و سناریوهای مختلف در مقایسه با سال های پایه توضیح: Obs. نشان دهنده داده های مشاهداتی دوره پایه؛ had، مدل HadGEM3-GC31؛ acc، مدل ACCESS-ESM1-5؛ mri، مدل MRI-ESM2-0 و 126، 245 و 585 نیز به ترتیب نشان دهنده SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می باشند.

Fig 4. Simulated rainfall changes with different models and scenarios compared to base years
Explanation: Obs., indicates the base period observational data; had, HadGEM3-GC31 model; acc, ACCESS-ESM1-5 model; mri, MRI-ESM2-0 model; and 126, 245, and 585 also indicate SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, respectively.

	H126(21-40)	H245(21-40)	H585(21-40)	H126(31-50)	H245(31-50)	H585(31-50)	H126(41-60)	H245(41-60)	H585(41-60)	A126(21-40)	A245(21-40)	A585(21-40)	A126(31-50)	A245(31-50)	A585(31-50)	A126(41-60)	A245(41-60)	A585(41-60)	M126(21-40)	M245(21-40)	M585(21-40)	M126(31-50)	M245(31-50)	M585(31-50)	M126(41-60)	M245(41-60)	M585(41-60)
Kermanshah	7.91	10.9	13.1	6.98	8.83	14	14.3	8.69	11.2	-2.29	4.87	0.07	-1.03	3.77	3.97	-2.19	4.11	4.87	0.69	-0.53	2.33	2.68	2.62	1.8	3.13	1.69	-1.27
Harsin	4.89	6.44	8.25	4.46	5.57	9.68	9.61	6.69	8.31	-0.61	1.11	0.36	0.61	2.99	3.03	-0.06	4.45	4.11	1.38	0.07	2.67	2.68	2.44	2.1	3.16	1.62	-0.63
Sonqor	0.34	1.81	2.74	0.36	1.25	3.2	4.49	1.64	2.33	-4.79	-3.07	-3.81	-4.38	-1.31	-1.42	-5.35	-1.03	-0.8	-3.45	-3.77	-1.87	-1.91	-2.11	-2.33	-1.67	-2.4	-4.41
Eslamabad	8.34	11.2	14.9	6.48	7.34	17.3	16.1	7.06	14.7	-3.64	0.1	-0.49	-2.16	2.94	3.69	-3.47	3.53	4.92	-0.29	-1.71	1.62	1.51	1.22	1.05	2.07	1.66	-2.26
Ravansar	8.3	11.3	14.1	8.18	8.39	14.9	16.9	8.15	13.7	-4.16	0.2	-0.94	-2.82	2.44	3.7	-4.68	2.82	4.54	-0.24	-1.01	2.86	2.38	2.24	1.96	2.92	2.47	-1.82
Kangavar	2.64	5.22	6.26	1.98	3.94	6.15	6.47	3.98	4.57	-4.21	-2.13	-3.11	-3.38	0.59	0.17	-4.31	1.03	0.94	-2.74	-3.37	-0.27	-1.26	-0.92	-1.39	-0.8	-2.19	-4.26
Mahidasht	5.31	7.9	10.2	4.21	5.69	11.3	11.3	5	9.08	-4.39	-1.29	-1.91	-3.31	1.18	1.59	-4.57	1.46	2.29	-1.37	-2.42	0.16	0.23	0.26	-0.15	0.74	-0.3	-3.05
Sararud	3.86	6.37	7.67	3.54	5.35	9.1	10	5.6	7.44	-3.43	-1.12	-2.06	-2.8	0.95	1.07	-3.98	1.36	1.88	-1.29	-2.71	-0.03	0.21	0.23	-0.51	0.1	-0.9	-3.2
Javanrud	8.68	10.5	0.68	8.88	8.84	15.8	18.6	8.53	14.8	-1.98	1.1	0.68	-1.24	3.11	4.61	-3.38	3.94	5.92	1.59	0.92	3.41	4.19	4.13	3.03	4.36	4.47	-0.44
Sahneh	6.45	8.57	9.73	6.29	7.92	10.5	12.3	8.84	9	0.07	2.1	1.01	0.79	4.37	4.37	-0.03	5.05	5.44	1.89	1.37	3.59	3.45	3.55	2.76	4.15	2.05	0.08

شکل ۵. نمودار heatmap تغییرات بارندگی شبیه سازی شده با مدل ها و سناریوهای مختلف طی سال های (۲۰۲۱ تا ۲۰۶۰) در مقایسه با سال های پایه

توضیح: had، نشان دهنده مدل HadGEM3-GC31؛ acc، مدل ACCESS-ESM1-5؛ mri، مدل MRI-ESM2-0 و 126، 245 و 585 نیز به ترتیب نشان دهنده SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 می باشند.

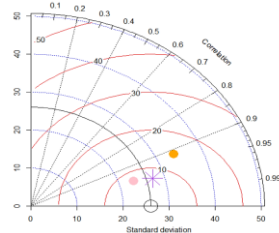
Fig 5. Heatmap diagram of simulated rainfall changes with different models and scenarios during the years (2021 to 2060) compared to the base years

Explanation: had, indicates HadGEM3-GC31 model; acc, ACCESS-ESM1-5 model; mri, MRI-ESM2-0 model; and 126, 245, and 585 also indicate SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5, respectively.

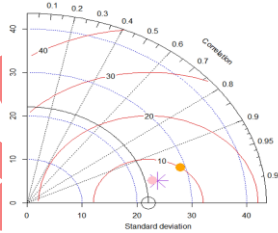
انتخاب مدل گردش عمومی مناسب

برای تعیین کمیت درجه تطابق بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهده‌ای و انتخاب مدل گردش عمومی مناسب از بین سه مدل ACCESS-ESM1-5، MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31، از نمودار تیلور بر اساس سه آماره انحراف‌معیار، ضریب همبستگی و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده می‌شود. بر اساس نمودارهای (۶)، الگوهای پیش‌بینی شده‌ای که به خوبی با داده‌های دوره پایه مطابقت دارند، نزدیکترین فاصله را به داده‌های دوره پایه، یعنی نقطه مشخص شده با (Observed) روی این نمودارها داشته و لذا با توجه به نتایج نمودار تیلور برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه‌های کرمانشاه، سنقر، اسلام‌آبادغرب، کنگاور، ماهیدشت، سرارود و جوانرود، از مدل ACCESS-ESM1-5 و برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه‌های هرسین، روانسر و صحنه از مدل MRI-ESM2-0 استفاده می‌شود. همچنین از نتایج مشابهت بالای هر سه مدل در پیش‌بینی بارندگی با داده‌های دوره پایه، می‌توان چنین استنباط نمود که نتایج و پاسخ‌های بدست آمده از قابلیت اطمینان بالایی برخوردارند و می‌توان به این نتایج با قطعیت بیش‌تری استناد نمود.

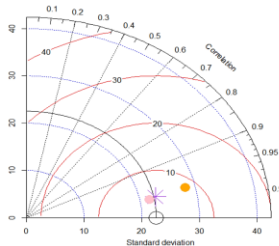
Kermanshah



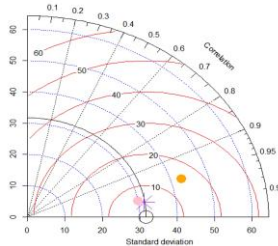
Harsin



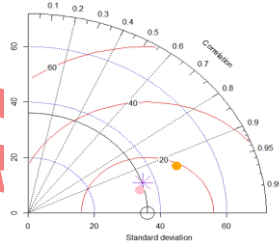
Sonqor



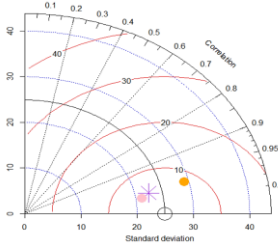
Eslamabad-E-Gharb



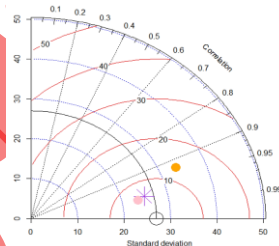
Ravansar



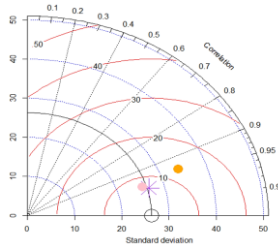
Kangavar



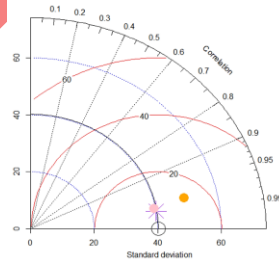
Mahidasht



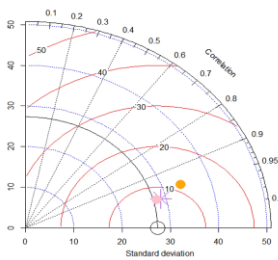
Sararud



Javanrud



Sahneh



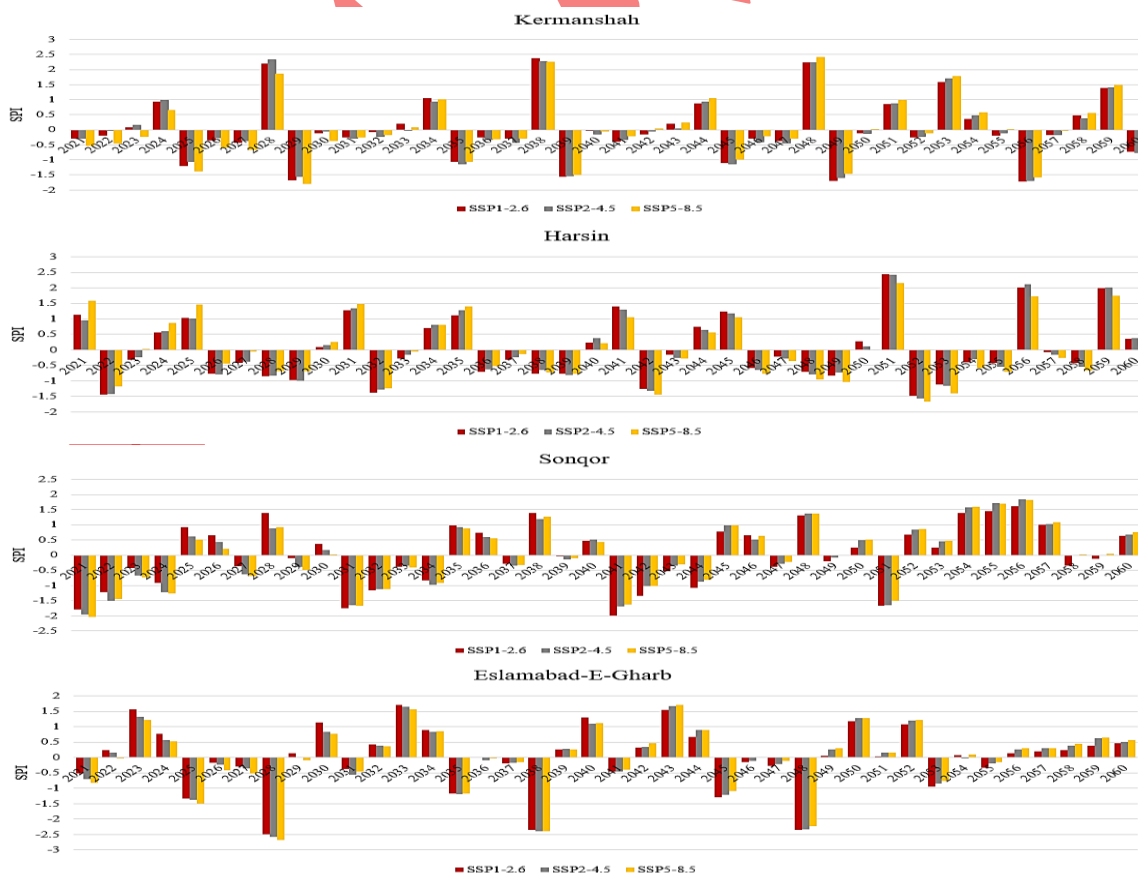
Legend: (Observed: ○ HadGEM3-GC31: ● MRI-ESM2-0: ● ACCESS-ESM1-5: ✱)

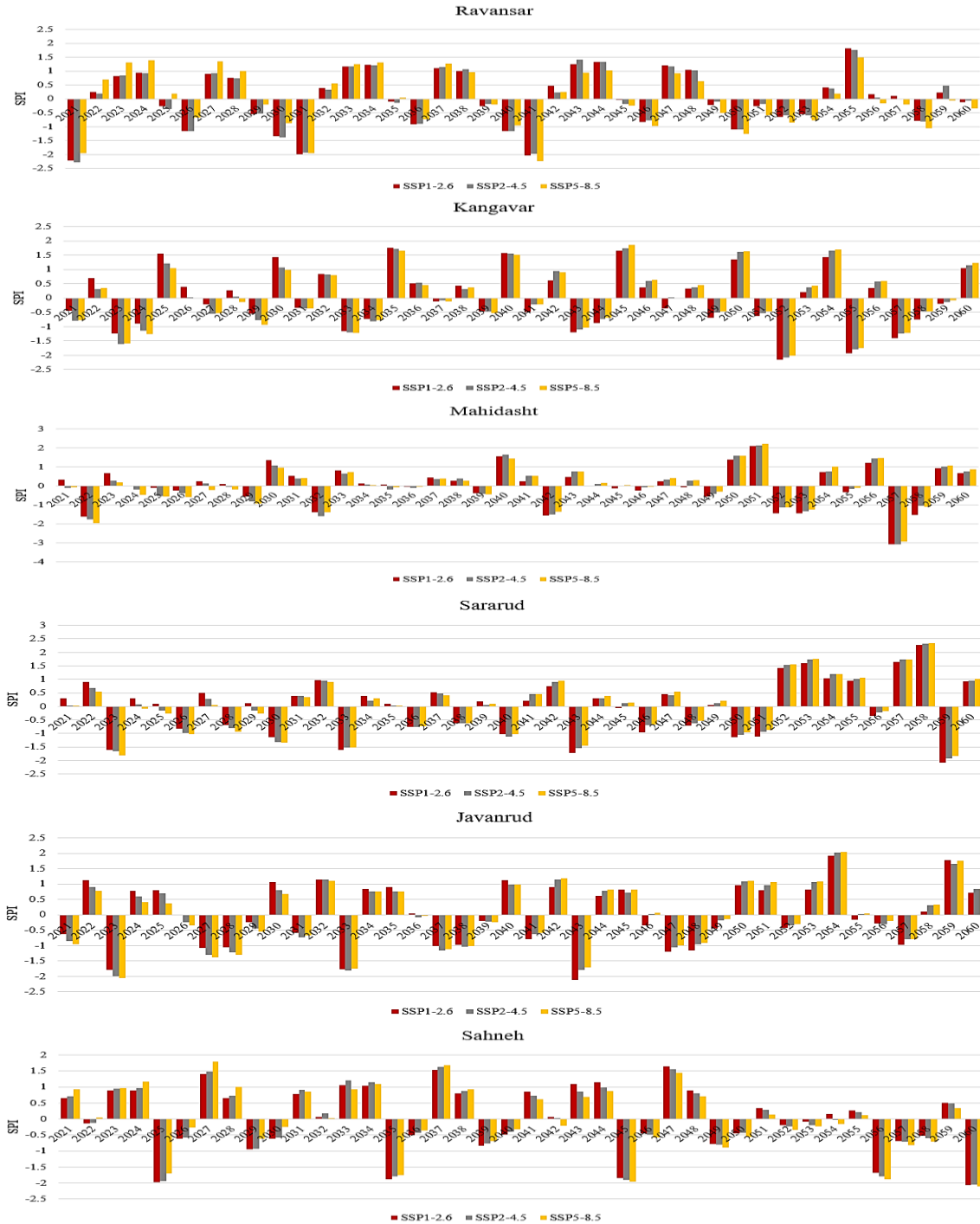
شکل ۶. نمودارهای تیلور برای انتخاب مدل گردش عمومی مناسب

Fig 6. Taylor diagrams for selecting the appropriate general circulation model

ارزیابی تاثیر تغییرات اقلیمی بر وضعیت خشکسالی

با استفاده از داده‌های بارندگی شبیه‌سازی شده با کمک مدل‌های منتخب گردش عمومی هر ایستگاه، شاخص خشکسالی SPI سالانه برای سال‌های آتی با هر سه سناریوی خوش‌بینانه، تداوم روند فعلی و بدبینانه محاسبه شده و نتایج آن در نمودار (۷) ارائه شده است. مقادیر SPI بزرگتر از یک، نشان‌دهنده وقوع ترسالی بوده و مقادیر کمتر از منفی یک نیز شرایط خشکسالی را نشان می‌دهد. بر اساس نتایج، با توجه به کاهش بارندگی در سال‌های آتی بر اساس اکثر سناریوها و مدل‌ها، مطابق انتظار خشکسالی نیز نسبت به دوره پایه، افزایشی می‌باشد. همچنین مشاهده می‌شود که مطابق انتظار با توجه به کاهش بیش‌تر بارندگی در سناریوی بدبینانه نسبت به دو سناریوی دیگر، در اکثر ایستگاه‌ها در سناریوی بدبینانه، خشکسالی شدیدتری نیز نسبت به سناریوهای خوش‌بینانه و تداوم وضعیت فعلی مشاهده می‌شود. بیش‌ترین دفعات وقوع خشکسالی نیز مربوط به ایستگاه‌های جوانرود، سرارود و سنقر بوده و کمترین دفعات وقوع خشکسالی مربوط به صحنه، هرسین و روانسر می‌باشد. شدیدترین خشکسالی نیز مربوط به ایستگاه ماهیدشت و در سال ۲۰۵۷ مشاهده شده و شدیدترین ترسالی مربوط به ایستگاه هرسین و سال ۲۰۵۱ می‌باشد. این خشکسالی‌ها اثرات قابل‌ملاحظه‌ای بر منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم این مناطق داشته و بر آسیب‌پذیری منطقه در برابر رویدادهای شدید هیدرولوژیکی تاکید می‌کند؛ که این امر لزوم نظارت مداوم و استراتژی‌های مدیریت تطبیقی (از جمله الگوی کشت متناسب با شرایط خشکسالی و برنامه‌ریزی جهت استحصال پایدار منابع آب زیرزمینی) جهت کاهش اثرات این رویدادها را متذکر می‌شود.





شکل ۷. تغییرات شاخص SPI سالانه در سالهای آتی و تحت سناریوهای مختلف

Fig 7. Changes in the annual SPI index in the coming years and under different scenarios

برای بررسی ناهنجاری‌های بارش، بیش‌ترین شدت خشکسالی با استفاده از شاخص SPI سالانه در سناریوهای مختلف و زمان وقوع آن در ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۳) ارائه شده است. با توجه به این جدول، خشکسالی‌های شدید در دوره پایه در کلیه ایستگاه‌ها -به جز ایستگاه سنقر- در سال ۲۰۲۱ اتفاق افتاده است؛ که در کلیه ایستگاه‌ها شاخص خشکسالی کمتر از منفی یک بوده

و کمبود شدید بارندگی وجود دارد. این خشکسالی‌ها بر آسیب‌پذیری منطقه در برابر رویدادهای شدید هیدرولوژیکی تاکید داشته و حتی در صورت مدیریت صحیح و تحت خوش‌بینانه‌ترین سناریو (سناریوی SSP1-2.6) در سال‌های آتی نیز ادامه خواهد یافت. لذا پایش مداوم این رویداد و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت تطبیقی (مانند تنظیم الگوی کشت متناسب با شرایط خشکسالی) جهت کاهش آثار منفی خشکسالی ضروری است. شدیدترین خشکسالی در سناریوهای مختلف در هر یک از ایستگاه‌های مورد بررسی متفاوت بوده و در سال‌های مختلفی روی می‌دهد. اما همان‌طور که مشخص است، شدیدترین خشکسالی هر ایستگاه در سناریوهای مختلف معمولاً در یک سال مشخص روی خواهد داد؛ به عنوان مثال در ایستگاه هر سین، شدیدترین خشکسالی‌ها در هر سه سناریوی خوش‌بینانه، متوسط و بدبینانه، در سال ۲۰۵۲ اتفاق می‌افتد.

جدول ۳. بیش‌ترین شدت خشکسالی در سال‌های مشاهده‌ای و سالهای پایه در سناریوهای مختلف

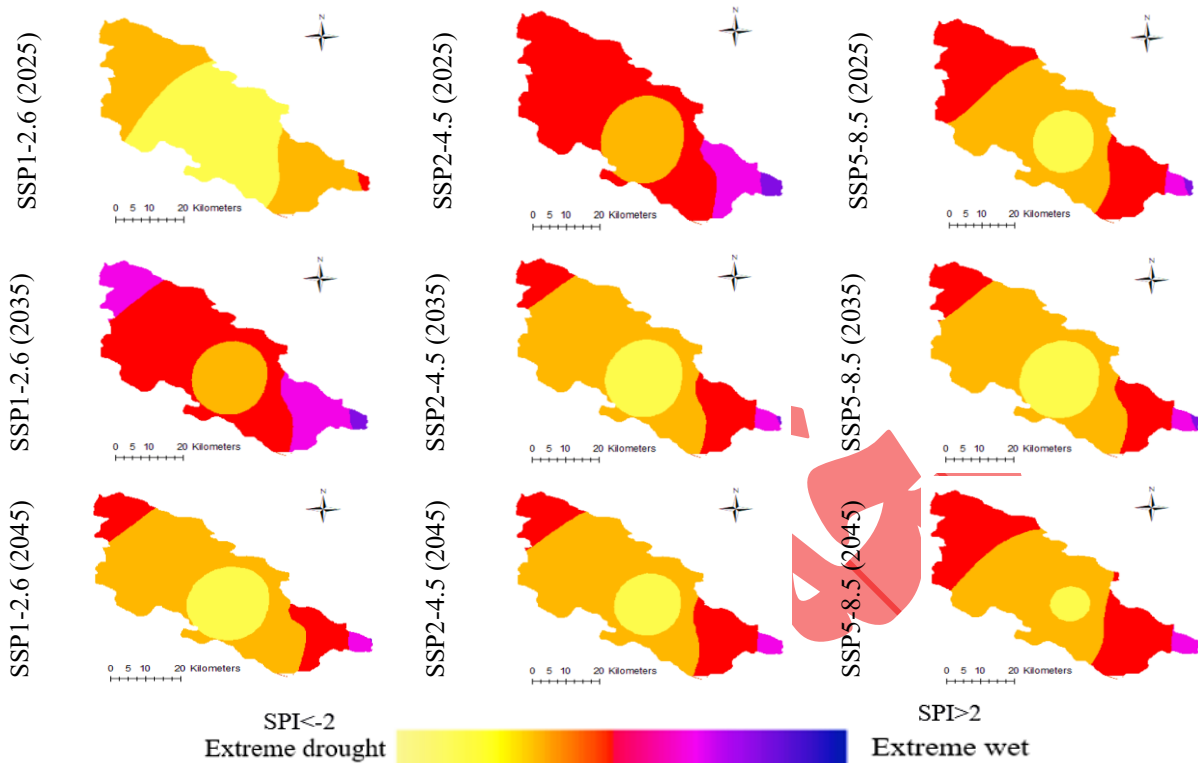
Table 3. Maximum drought intensity in observation years and base years in different scenarios

SSP5-8.5		SSP2-4.5		SSP1-2.6		Observed		Station
Year	SPI	Year	SPI	Year	SPI	Year	SPI	
2029	-1.78	2056	-1.68	2056	-1.7	2021	-2.4	Kermanshah
2052	-1.67	2052	-1.56	2052	-1.49	2021	-2.38	Harsin
2021	-2.03	2021	-1.95	2041	-2	2022	-3.29	Sonqor
2028	-2.68	2028	-2.58	2028	-2.49	2021	-2.52	Eslamabad-E-Gharb
2041	-2.25	2021	-2.29	2021	-2.21	2021	-2.33	Ravansar
2052	-2.02	2052	-2.08	2052	-2.15	2021	-1.94	Kangavar
2057	-2.93	2057	-3.07	2057	-3.07	2021	-2.17	Mahidasht
2059	-1.83	2059	-1.93	2059	-2.07	2021	-2.35	Sararud
2023	-2.06	2023	-1.99	2043	-2.11	2021	-2.11	Javanrud
2060	-2.11	2060	-2.04	2060	-2.07	2021	-2.84	Sahneh

پهنه‌بندی خشکسالی در سال‌های آتی

تهیه نقشه‌های خطرپذیری و ارزیابی حساسیت حوضه به خشکسالی، می‌تواند آمادگی یک منطقه را بهبود بخشیده و اثرات خشکسالی را با انتشار برنامه‌های کاهش خشکسالی در سطوح ملی و منطقه‌ای کاهش دهد (Singh et al., 2023). لذا پهنه‌بندی خشکسالی از طریق روش IDW و بر اساس شاخص SPI سالانه محاسبه شده و در سالهای ۲۰۳۵، ۲۰۴۵ و ۲۰۵۵ که خشکسالی متوسط تا شدید در اغلب ایستگاه‌های دشت کرمانشاه اتفاق افتاده، در شکل (۸) نشان داده شده است. خشکسالی هواشناسی که با توجه به بارش‌ها در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده الگوی حاکم بر بارش در مناطق مختلف است. همان‌طور که در این نقشه‌ها مشاهده می‌شود، در طی این سال‌ها اغلب مناطق دشت کرمانشاه، شرایط خشکسالی متوسط تا شدید را تجربه می‌کنند. بیش‌ترین شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI سالانه در ایستگاه‌های گوناگون متفاوت بوده و از الگوی خاصی پیروی نمی‌کند. با این وجود در سال‌هایی که خشکسالی شدید اتفاق افتاده، شدت خشکسالی در نواحی مرکزی دشت کرمانشاه، بیش از سایر مناطق است. از نقشه وقوع خشکسالی و ترسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف، می‌توان جهت تعیین نقاط بحرانی برای برنامه‌ریزی الگوی کشت، انتخاب مکان مناسب جهت احداث مجتمع‌های دامپروری و صنعتی و همچنین میزان مجاز استحصال منابع آبی جهت مصارف مختلف (به‌ویژه مصارف کشاورزی) بهره گرفت.

در پژوهش (Ramezani & Koohi, 2024) نیز نشان داده شد که در دوره کنونی و مبتنی بر شاخص‌های DMI و EAI، شرایط اقلیمی در اکثر استان‌های کشور، نیمه‌خشک، خشک و بسیار خشک می‌باشد و تحت سناریوهای متوسط و بدبینانه این وضعیت در دوره آینده تشدید خواهد شد؛ که این نتیجه مشابه نتایج پژوهش حاضر است. در بررسی‌های صورت‌گرفته در پژوهش‌های پیشین از جمله (Heshmati & Ramezani, 2021) نیز کاهش بارندگی و افزایش خشکسالی طی سال‌های آتی در ایستگاه‌های استان کرمانشاه تایید شده است.



شکل ۸. پهنه‌بندی خشکسالی در سناریوهای مختلف در سال‌های منتخب

Fig 8. Drought zoning in different scenarios in selected years

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

خشکسالی یکی از بلاای طبیعی غیرقابل‌پیش‌بینی -به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران- است که در اثر تغییرات اقلیمی به ویژه تغییرات دما و بارندگی ایجاد می‌شود. انتظار می‌رود این شدت، مدت و فراوانی این رویداد طی سال‌ها و دهه‌های آینده به دلایلی مانند افزایش دما و کاهش بارندگی، افزایش یابد. لذا پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر بارندگی و خشکسالی سال‌های آتی، در برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب و اجرای اقدامات مدیریتی در راستای کاهش اثرات منفی خشکسالی اهمیت زیادی دارد. بنابراین در این مطالعه با استفاده از مدل‌های گردش عمومی و ریزمقیاس‌نمایی آماری به شبیه‌سازی تاثیر تغییرات اقلیمی بر بروز خشکسالی‌های احتمالی آینده در دشت کرمانشاه (یکی از دشت‌های بحرانی استان کرمانشاه) پرداخته شد. بر اساس نتایج، میانگین بارندگی شبیه‌سازی‌شده در اکثر ایستگاه‌ها و سناریوهای کاهش یافته و این امر به تشدید خشکسالی طی سال‌های آینده خواهد انجامید؛ که تشدید خشکسالی علاوه بر آثار سوء اقتصادی-اجتماعی فراوان، بر عملکرد کشاورزی منطقه و الگوهای کشت آبی نیز تاثیر منفی خواهد داشت. بیش‌ترین خشکسالی در دوره پایه در اکثر ایستگاه‌ها در سال ۲۰۲۱ به وقوع پیوسته و بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌شده، با توجه به این که بر اساس سناریوی بدبینانه نسبت به دو سناریوی دیگر، کاهش بیش‌تری در بارندگی مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود بر اساس این سناریو خشکسالی‌های شدیدتری در اکثر ایستگاه‌ها بروز نماید. بیش‌ترین دفعات وقوع خشکسالی شبیه‌سازی‌شده نیز در ایستگاه‌های جوانرود، سرارود، و سنقر و کمترین دفعات وقوع خشکسالی شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه‌های صحنه، هرسین و روانسر مشاهده می‌شود. نتایج پهنه‌بندی خشکسالی نیز نشان داد که گرچه شدیدترین دوره‌های خشکسالی و ترسالی شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه‌ها و سناریوهای گوناگون متفاوت است، اما خشکسالی در نواحی

مرکزی دشت کرمانشاه (ایستگاه‌های سرارود و کرمانشاه) با شدت بیش‌تری به‌وقوع پیوسته و در سناریوی بدبینانه نسبت به دو سناریوی دیگر، خشکسالی‌های شدیدتری در منطقه پیش‌بینی می‌شود. گرچه پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در سال‌های آتی با عدم قطعیت مواجه بوده و با استفاده از مدل‌ها و سناریوهای گوناگون روش‌های ریزمقیاس‌نمایی می‌توان طیف وسیعی از نتایج بالقوه آینده را پیش‌بینی نمود، اما انتظار می‌رود، وقوع خشکسالی‌های متعدد در منطقه مورد مطالعه طی سال‌های اخیر و وضعیت بحرانی منابع آب به‌ویژه منابع آب زیرزمینی، آثار منفی تغییر اقلیم احتمالی آینده را تشدید نماید. در واقع با توجه به متفاوت‌بودن تغییرات بارندگی در دوره‌های زمانی آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای گوناگون، وضعیت خشکسالی نیز در ایستگاه‌های مختلف و تحت سناریوهای مختلف، متفاوت است، اما به طور کلی انتظار می‌رود بر اساس نتایج، خشکسالی در اکثر ایستگاه‌های منطقه افزایش یابد. لذا بهتر است سیاست‌گذاران به‌ویژه در بخش کشاورزی، سیاست‌ها و راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی و کم‌آبی را اتخاذ نمایند. بنابراین توصیه می‌شود با اقداماتی از قبیل متناسب‌نمودن الگوی کشت متناسب با اقلیم آتی مناطق، ایجاد سیستم‌های پیش‌آگاهی رویدادهای اقلیمی، ترویج کشت گیاهان مقاوم در برابر کم‌آبی، ترغیب صنایع آلاینده به کاهش استفاده از سوخت‌های فسیلی و جایگزینی آن با انرژی‌های پاک، اتخاذ سیاست‌های قیمت‌گذاری کربن در گذار به سمت تولید پایدار و استفاده از روش‌های نوین آبیاری، آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های آینده -که با توجه به اختصاص بخش زیادی از اراضی منطقه به زمین‌های کشاورزی، انتظار می‌رود این بخش بیش از سایر بخش‌های اقتصادی تحت تاثیر قرار گیرد- تا حدود زیادی کاهش داده شود.

در پژوهش‌های پیشین، از جمله (Khazaei, 2025) اشاره شده که افزایش فراوانی، شدت و مدت خشکسالی‌های آتی، عمدتاً به دلیل افزایش تبخیر و تعرق در نتیجه افزایش دما صورت می‌گیرد. علاوه بر این با افزایش دما در اثر تغییرات اقلیمی، حتی در صورت ثابت ماندن یا افزایش جزئی بارندگی، احتمالاً شرایط خشکسالی در کل منطقه (حتی تحت خوش‌بینانه‌ترین سناریو)، تشدید خواهد شد. در نتیجه پیش‌بینی‌هایی که صرفاً بر اساس شاخص‌های مبتنی بر بارندگی مانند SPI صورت می‌گیرد، ممکن است شدت خشکسالی -های آینده را کمتر از حد واقعی برآورد نماید. لذا توصیه می‌شود در پژوهش‌های آینده، از شاخص‌های خشکسالی مانند SPEI که علاوه بر بارندگی، تبخیر و تعرق را نیز در نظر گرفته و نتایج قابل‌اعتمادتری نسبت به SPI نشان می‌دهند، استفاده شود.

تقدیر و تشکر

از همکاری سازمان هواشناسی کشور در زمینه در اختیار قرار دادن آمار روزانه بارندگی ایستگاه‌های مورد بررسی، تشکر می‌شود.

منابع

- Abramowitz, M. & Stegun, I. A. (1965). Handbook of Mathematical Functions. *Dover Publications*, New York. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/1098650>
- Abbas, A., Bhatti, A. S., Ullah, S., Ullah, W., Waseem, M., Zhao, C. & Ali, G. (2023). Projection of precipitation extremes over South Asia from CMIP6 GCMs. *Journal of Arid Land*, 15 (3), 274-296. <https://doi.org/10.1007/s40333-023-0050-3>
- Alemu, G. T., Desta, S. A. & Tareke, K. A. (2024). Characterize and analysis of meteorological and hydrological drought trends under future climate change conditions in South Wollo, North Wollo, and Oromia Zones, in Ethiopia. *Heliyon*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29694>
- Almasi, A., Fatemi, S. E. & Eghbalzadeh, A. (2024). The prediction of monthly rainfall in Kermanshah Synoptic Station under the social-economic scenarios of the sixth climate change report. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 40-64. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10245.1097>
- Arias, P., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M., Plattner, G. K., Rogelj, J. & Rojas, M. (2021). Climate Change: The physical science basis. Contribution of Working Group I to

the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; technical summary. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.002>

Arvandi, S. (2024). The Effect of Climate Change on the Way of Investing in Modern Irrigation Systems. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 2 (3), 97-110. [In Persian] <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7834.1071>

Annan, J. D. & Hargreaves, J. C. (2011). Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble. *Journal of Climate*, 24, 4529–4538. <https://doi.org/10.1175/2011JCLI3873.1>

Azizi, G., Safarrad, T., Mohammadi, H. & Faraji Sabokbar, H. (2016). Evaluation and Comparison of Reanalysis Precipitation Data in Iran. *Physical Geography Research*, 48 (1), 33-49. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2016.57026>

Baharvand, F., Massah Bavani, A., Mahdavi, M., Motamed Vaziri, B. & Goodarzi, M. (2019). Capability Evaluation of LARS- WG for reproducing daily data in Kermanshah. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 13 (45), 70-76. [In Persian]. <https://doi.org/20.1001.1.20089554.1398.13.45.3.7>

Bazrafshan, J. (2002). A comparative study of some meteorological drought indices in some climatic samples of Iran. Master Thesis. *University of Tehran*. [In Persian].

Bazrafshan, J. & Hijabi, S. (2017). Drought Monitoring methods (along with applications in MATLAB programming environment). *University of Tehran Press*, Second Edition. [In Persian].

Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S. M., Moridi, A., Neshat, A., Golmohammadi, G. & Maghsoudi, R. (2024). Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, 14, 5027. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55340-x>

Bong, C. H. & Richard, J. (2019). Drought and climate change assessment using Standardized Precipitation Index (SPI) for Sarawak River Basin. *Journal of Water and Climate Change*. <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.036>

Buytaert, W., Vuille, M., Dewulf, A., Urrutia, R., Karmal kar, A. & Célleri, R. (2010). Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: Implications for water resources management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(7), 1247–1258. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1247-2010>

Chai, T. & Draxler, R. (2014). Root means square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? *Geoscientific Model Development*, 7. <https://doi.org/10.5194/gmdd-7-1525-2014>

Chen, L. & Ford, T. W. (2023). Future changes in the transitions of monthly-to-seasonal precipitation extremes over the Midwest in Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 models. *International Journal of Climatology*, 43 (1), 255-274. <https://doi.org/10.1002/joc.7756>

Davarpanah, S., Erfanian, M., & Javan, K. (2021). Assessment of climate change impacts on drought and wet spells in Lake Urmia Basin. *Pure and Applied Geophysics*, 178(2), 545-563. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02656-8>

Dehghani, R., Torabi Poudeh, H., Younesi, H. & Shahinejad, B. (2020). Application of the Hybrid Model of Support Vector Machine-Algorithm artificial flora in estimating the daily flow of rivers (Case study: Dez Basin). *Iran-Water Resources Research*, 16 (2), 132-149. <https://doi.org/20.1001.1.17352347.1399.16.2.9.5>

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

Eekhout, J. P., Hunink, J. E., Terink, W. & de Vente, J. (2018). Why increased extreme precipitation under climate change negatively affects water security. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (11), 5935–5946. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5935-2018>

Emamzadeh, S. M., Forghani, M. A., Karnema, A. & Darbandi, S. (2016). Determining an optimum pattern of mixed planting from organic and non -organic crops about economic and environmental indicators: A case study of cucumber in Kerman, Iran. *Information Processing in Agriculture*, 3(4), 207–214. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.08.001>

Fatehifar, A., Goodarzi, M. R., Montazeri Hedesh, S. S. & Siahvashi Dastjerdi, P. (2021). Assessing watershed hydrological response to climate change based on signature indices. *Journal of Water and Climate Change*, 12, 2579–2593. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.293>

Gaitan, E., Monjo, R., & Pórtoles. J. (2019). Pino-Otín MR Projection of temperatures and heat and cool waves for Aragón (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs. *Science of the Total Environment*, 10, 650, 2778-95. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.352>

- Gerdener, H., Engels, O. & Kusche, J. (2020). A framework for deriving drought indicators from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 227–248. <https://doi.org/10.5194/hess-24-227-2020>
- Ghasempour, R., Roushangar, K., Ozgur, V. S. & Demirel, M. C. (2022). Analysis of spatiotemporal variations of drought and its correlations with remote sensing-based indices via wavelet analysis and clustering methods. *Hydrology Research*, 53 (1), 175–192. <https://doi.org/10.2166/nh.2021.104>
- Gohar, A. & Cashman, A. (2016). A methodology to assess the impact of climate variability and change on water resources, food security and economic welfare. *Agricultural Systems*, 147, 51-64. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.05.008>
- Goodarzi, M., Hoseini, M., & Parekar, M. (2017). Evaluation of Statistical downscaling method in simulation of climate change of Karkheh basin up to the Karkheh dam. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 10(35), 51-64. <http://jwmsei.ir/article-1-657-en.html>
- Hamidi, M. & Roshani, A. (2023). Investigation of climate change effects on Iraq dust activity using LSTM. *Atmospheric Pollution Research*, 14, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101874>
- Helmi, M., Zeraati Neyshabouri, S., Amirabad Zadeh, M. & Yaghoobzadeh, M. (2024). Evaluation of SDSM, LARS-WG, and ANN Methods in Down scaling of Temperature and Precipitation for Two Different Climates. *Journal of Drought and Climate Change Research (JDCR)*, 1(4), 105-118. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6996.1049>
- Heshmati, S. & Ramezani Etedali, H. (2021). Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model: The Case Study of Kermanshah City. *Town & Country Planning*, 13 (2), 647-669. <https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.332432.670263>
- Heydari Tashah Kabood, S. H., Hosseini, S. A. & Heydari Tashah Kabood, A. (2020). Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(1), 329–339. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00681-0>
- Hoseini, S. S., Nazari, M. & Araghinejad, S. (2013). Investigating the impacts of climate on agricultural sector with emphasis on the role of adaptation strategies in this sector. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 44 (1), 1-16. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2013.36064>
- Hu, T. S, Lam, K. C. & Ng, S. T. (2001). River flow time series prediction with a range-dependent neural network. *Hydrological Sciences Journal*, 46, 729–745. <https://doi.org/10.1080/02626660109492867>
- IPCC. (2007). Climate change- synthesis report. *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Rome.
- IPCC. (2021). Technical Summary, in: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 33–144.
- IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge University Press*.
- Khan, M. I., Liu, D., Fu, Q., Saddique, Q., Faiz, M. A., Li, T., Qamar, M. U., Cui, S. and Cheng, C. (2017). Projected changes of future extreme drought events under numerous drought indices in the Heilongjiang Province of China. *Water Resources Management*, 31, 3921–3937. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1716-4>
- Khān, S. F. & Naeem, U. A. (2023). Future climate projections using the LARS-WG6 downscaling model over Upper Indus Basin, Pakistan. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195-810, 2-26. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11419-y>
- Khazaei, M. R. (2025). Projected changes to drought characteristics in Tehran under CMIP6 SSP-RCP climate change scenarios. *Heliyon*, 11, e41811. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41811>
- Karatayev, M., Clarke, M., Salnikov, V., Bekseitova, R. & Nizamova, M. (2022). Monitoring climate change, drought conditions and wheat production in Eurasia: The case study of Kazakhstan. *Heliyon*, 8, eo8660. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08660>
- Khorrami, B. & Gündüz, O. (2022). Detection and analysis of drought over Turkey with remote sensing and model-based drought indices. *Geocarto International*, 37(26), 12171-12193. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2066197>

- Khosravi, M., Movaqqari, A. & Mansouri Daneshvar, M. R. (2013). Evaluation the PNI, RAI, SIP and SPI Indices in Mapping Drought Intensity of Iran: Comparing the Interpolation Method and Digital Elevation Model (DEM). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(5), 53-70. [In Persian].
- Kohn, M. E., Kamiar Mohaddes, K., Ng, R. N. C., Hashem Pesaran, M., Raissi, M. & Yang, J. C. (2019). Long-Term Macroeconomic Effects of Climate Change: A Cross-Country Analysis, IMF Working Paper, 19/215. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105624>
- Lin, J. Y., Cheng, C. T. & Chau, K. W. (2006). Using support vector machines for long-term discharge prediction. *Hydrological Sciences Journal*, 51, 599–612. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.599>
- Lindsey, R. & Dahlman, L. (2021). Climate Change: Global Temperature. *News & Features*.
- Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H. & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8, 4649–4659. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01393-8>
- Ma, D., Qian, B., Gu, H., Sun, Z. & Xu, Y. P., (2021). Assessing climate change impacts on streamflow and sediment load in the upstream of the Mekong River basin. *International Journal of Climatology*, 41, 3391–3410. <https://doi.org/10.1002/joc.7025>
- Mishra, A. K., Desai, V. R. & Singh, V. P. (2005). Drought forecasting using a hybrid stochastic and neural network model. *Journal of Hydrology Engineering*, ASCE, 12 (6), 626-638.
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:6\(626\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:6(626))
- Misra, A. K. (2014). Climate change and challenges of water and food security. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.04.006>
- Moradi, A., Taheri Abkenar, K., Shabaniyan, N. & Afshar Mohammadian, M. (2021). The potential of oak (*Quercus* spp.) and wild pistachio (*Pistacia atlantica* Desf.) forest species to deposit microdust particles. *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 29(3), 273-284. [In Persian]. <https://doi.org/10.22092/ijfpr.2021.356258.2023>
- Mukherjee, S., Mishra, A. & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current Climate Change Reports*, 4, 145–163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>
- Nunno, F. D., Marinis, G. D. & Granata, F. (2024). Analysis of SPI index trend variations in the United Kingdom- A Cluster-based and Bayesian ensemble algorithms approach. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101717. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101717>
- Radmehr, R., Brorsen, B. W. & Shayanmehr, S. (2024). Adapting to climate change in arid agricultural systems: An optimization model for water-energy-food nexus sustainability. *Agricultural Water Management*, 303, 109052. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109052>
- Rahnama, S., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M. & Mehran, A. A. (2022). Comparison of remote sensing indices and meteorological and agricultural drought index to determine drought status in regions with different climatic conditions. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53 (10), 2383-2398. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348275.669352>
- Ramezani Etedali, H. & Koohi, S. (2024). Investigation the Impact of Climate Change on the Aridity in Iran with Population Exposure Approach. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 3 (9), 17-38. [In Persian]. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>
- Rao, B. B., Santhibhushan Chowdary, P., Sandeep, V. M., Rao, V. U. M. & Venkateswarlu, B. (2014). Rising minimum temperature trends over India in recent decades: Implications for agricultural production. *Global and Planetary Change*, 117, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.03.001>
- Rezaee Pazhand. H. (2001). Application of statistics and probability in water resources. The first edition of Sokhongostar Publications of Islamic Azad University of Mashhad. Mashhad.
- Salahi, B., Goudarzi, M. & Hosseini, S. A. (2017). Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 425–438. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2016.107179>
- Sarabi, M., Dastorani, M. T. & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 3 (1), 63-83. <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129>

- Semenov, M. A., Senapati, N., Coleman, K. & Collins, A. L. (2024). A dataset of CMIP6-based climate scenarios for climate change impact assessment in Great Britain. *Data in Brief*, 55, 110709. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110709>
- Sha, J., Li, X. & Yang, J., (2021). Estimation of watershed hydrochemical responses to future climate changes based on CMIP6 scenarios in the Tianhe River (China). *Sustainability*, 13, 10102. <https://doi.org/10.3390/su131810102>
- Shahi, S., Hosseini, K. & Mousavi, S. F. (2024). Assessing the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation using CMIP6 models (case study: Damghan, Iran). *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), 163-177. <https://doi.org/10.22044/jhwe.2024.14150.1034>
- Shayanmehr, S., Henneberry, S. R., Ali, E. B., Sabouhi Sabouni, M. & Shahnoushi Foroushani, N., (2022). Climate change, food security, and sustainable production: A comparison between arid and semi-arid environments of Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 1–33. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02712-w>
- Singh, P., Kannaujiya, A. K., Deep, A., Singh, S., Mohanty, T. & Prakash, K. (2023). Spatio-temporal drought susceptibility assessment of Ken River Basin, Central India, and its evaluation through river's morphometry. *Geological Journal*, 58(2), 755-779. <https://doi.org/10.1002/gj.4622>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M. (2013). Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Cambridge university*.
- Taylor, E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, 106(7), 7183-7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*. 47 (1–2), 123–138. <https://doi.org/10.3354/cr00953>
- Van Meijl, H., Havlik, P., Lotze -Campen, H., Stehfest, E., Witzke, P., Dominguez, I. P. & van Zeist, W. J. (2018). Comparing impacts of climate change and mitigation on global agriculture by 2050. *Environmental research letters*, 13(6), 064021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabdc4>
- Willeke, G., Hosking, J. R. M., Wallis, J. R. & Guttman, N. B. (1994). The national drought atlas. *Institute for Water Resources Report*, U.S. Army Corps of Engineers.
- Xu, Z., Han, Y., Tam, C. Y., Yang, Z. L. & Fu, C. (2021). Bias-corrected CMIP6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Scientific Data*, 8 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01079-3>
- Zareian, M. J. (2021). Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). *Journal of Hydro Environment Research*, 35, 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2021.01.004>
- Zhang, R., Corte-Real, J., Moreira, M., Kilsby, C., Burton, A., Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Birkinshaw, S., Forsythe, N. & Nunes, J. P. (2019). Downscaling climate change of mean climatology and extremes of precipitation and temperature: application to a Mediterranean climate basin. *International Journal of Climatology*, 39, 4985–5005. <https://doi.org/10.1002/joc.6122>
- Zohrevandi, H., Khorshid Dost, A. M. & Sari Saraf, B. (2020). Prediction of Climate Change in Western of Iran using Downscaling of HadCM3 Model under Different Scenarios. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7 (1), 49-64. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2741-en.html>