



Research Paper

Local Analysis of Drought and Climate Change Projection in Future Periods under the CMIP6 Model (Case Study: Mazandaran Province)

Kamele Aghajanloo¹ and Hossein Fathi Almalou²

- 1- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Maragheh, Maragheh, Iran, (Corresponding author: aghajanloo@maragheh.ac.ir)
2- M.Sc student in Water Resources Management, Department of Civil Engineering, Technical and Engineering Faculty, University of Maragheh, Maragheh, Iran

Received: 29 January, 2024

Accepted: 02 April, 2024

Extended Abstract

Background: Climate changes can significantly affect socioeconomic activities and quality of life, especially in countries that are currently facing water tensions. Climate models play a key role in assessing the impact of climate change and developing adaptation and resilience strategies. Considering the importance of food security and then water security in resilience against climate change, as well as the significant contribution of Mazandaran province in the production of agricultural products and food supply of the country, it is very important to examine the drought situation of this province and its climate change process. In this study, therefore, the wet and dry durations in the 20-year base period of Mazandaran province were evaluated using the standardized standard precipitation index. Then, projections of temperature and precipitation at the local scale were made in future periods using the five global circulation models (GCM) available in phase 6 of the climate output project (CMIP6) under three scenarios SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5.

Methods: In this research, six meteorological stations, *viz.* Ramsar, Noshahr, Siyabishah, Babolsar, and Qarakhil, were selected due to the coverage of the most statistical years and suitable spatial distribution in the region. Time series of precipitation and daily maximum/minimum temperatures were collected for six selected stations in the region with a base statistical period of 20 years (January 1999 to December 2018). After ensuring the quality of the data, the trend of their changes was analyzed using Mann-Kendall and age slope tests. Standard precipitation index values were calculated and evaluated in different intervals. Finally, large-scale data from five general circulation models (ACCESS-CM2, CanESM2, CNRM-CM-6-1, MRI-ESM2-0, and NESM3) were downscaled by the LARS-WG6 climate generator. Thus, predictions of seasonal and annual changes for Tmax, Tmin, and precipitation in two future periods (2040-2060 and 2080-2100) were made using the average of selected GCMs.

Results: As a result of the statistical analysis of the above data, minimum and maximum temperatures increased and precipitation decreased during the standard period, but no significant trend was found at the 0.05 level. The analysis also shows that the state's worst droughts occurred in 2007, 2009, late 2011, early 2012, and 2018, with SPI values below -1.0 at stations. The wettest years in the region are 2004-2006 and 2017. The frequency of wet periods is higher than dry periods for all seasons in the region. In the microscale aspect, the results confirmed the ability of the LARS-WG6 model to simulate temperature more accurately than local precipitation, with more precipitation errors in wet seasons. Among these results, the lowest value of the correlation coefficient (0.941) was obtained for maximum and minimum monthly temperatures, which means that the squared error value is between 1.05 and 3.82°C. The largest differences between modeled precipitation and observations occurred during the rainy season when GCMs underestimated precipitation. The analysis of future climate changes revealed that all five GCMs indicated a continued increase in temperature in the study area. However, differences in the magnitude of signal changes were observed in different GCMs and SSPs. These predicted temperature changes are significant and reliable because all models agree on the direction of temperature change across the province. Overall, the increase in average Tmax and Tmin is significant in SSP8.5 compared to SSP4.5 because of no reduction in greenhouse gas emissions. Thus, the largest mean changes in the SSP8.5 scenario for 2050 and 2090 at the provincial level for maximum temperature are increases of 2.64 and 4.72 °C during spring, and the largest mean changes in minimum temperature were calculated to rise to 2.97 and 4.83 °C during autumn. Future changes in precipitation proved to be more complex and unpredictable than temperature. The largest incremental changes in local precipitation in 2090 under the SSP4.5 (40.5%) and SSP8.5 (51.9%)



scenarios were shown by the Ramsar station. In the study area, it is projected 38.86% and 43.95% on average in the feature period (2040-2060) and 45.11% and 65.94% in the feature period (2080-2100) under SSP4.5 and SSP8.5. Thus, the results of this study show that the shift toward wetter seasons at the provincial level in the future will cause more precipitation in the western part of the province.

Conclusion: Examining the drought situation in the base period shows the occurrence of periods with near-normal rainfall in longer intervals, and Sari and Qarakhail stations report more drought than stations in the west of the province. All GCM forecasting models presented the same results in significant warming trends in this province. For precipitation, however, it is suggested to investigate other models in this regard due to the sensitivity of the issue and the uncertainties involved in the issue. Considering the effect of changes in temperature parameters and precipitation on water resources and floods in the region, it is necessary to adopt suitable management strategies for the future to be resilient against climate change.

Keywords: CMIP6, Mazandaran Province, Rainfall, Standard Precipitation Index, Temperature

How to Cite This Article: Aghajanloo, K., & Fathi Almalou, H. (2024). Local Analysis of Drought and Climate Change Projection in Future Periods under the CMIP6 Model (Case Study: Mazandaran Province). *J Watershed Manage Res*, 15(2), 32-48. DOI: [10.61186/jwmr.15.2.32](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.32)



مقاله پژوهشی

تحلیل منطقه‌ای خشکسالی و پیش‌نمایی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی
تحت مدل CMIP6 (مطالعه موردی: استان مازندران)

کامله آقاجانلو¹ و حسین فتحی الملو²

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران، (نویسنده مسوول: aghajanloo@maragheh.ac.ir)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱/۱۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۹

صفحه: ۳۳ تا ۴۸

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: تغییرات اقلیمی می‌توانند به‌طور قابل‌توجهی بر فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی و کیفیت زندگی به‌ویژه در کشورهای کم‌درآمد با تنش‌های آبی مواجه هستند، تأثیر بگذارند. مدل‌های اقلیمی، نقش کلیدی در ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوایی و توسعه راهبردهای سازگاری و تاب‌آوری دارند. با توجه به اهمیت امنیت غذایی و به‌دنبال آن امنیت آبی در بحث تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی و همچنین سهم قابل‌توجه استان مازندران در تولید محصولات کشاورزی و تأمین غذای کشور، بررسی وضعیت خشکسالی این استان و روند تغییرات اقلیمی و همچنین سهم قابل‌توجه استان مازندران در تولید شرایط خشک‌سالی و ترسالی دوره ۲۰ ساله پایه استان مازندران، با استفاده از شاخص تک متغیره بارش استاندارد شده مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با به‌کارگیری پنج مدل گردش جهانی (GCM) موجود در فاز ۶ پروژه پروتکل اقلیمی (CMIP6)، تحت سه سناریو SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5، پیش‌نمایی‌های دما و بارش در مقیاس محلی در دوره‌های آینده انجام شد.

مواد و روش‌ها: در منطقه مورد مطالعه، شش ایستگاه هواشناسی رامسر، نوشهر، سیاه‌بیشه، بابلسر و قراخیل، به‌دلیل پوشش بیشترین سال آماری و توزیع مکانی مناسب در سطح منطقه انتخاب شدند. سری‌های زمانی بارش، دمای حداکثر و حداقل روزانه برای شش ایستگاه انتخابی در منطقه با دوره آماری پایه ۲۰ ساله (دوره ژانویه ۱۹۹۹ الی دسامبر ۲۰۱۸) جمع‌آوری شدند. پس از اطمینان از کیفیت داده‌ها، روند تغییرات آن‌ها با استفاده از آزمون‌های من‌کنال و شیب سن مورد بررسی قرار گرفتند. مقادیر شاخص بارش استاندارد در بازه‌های مختلف محاسبه شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت، داده‌های در مقیاس بزرگ از پنج مدل گردش عمومی (ACCESS-CM2، CanESM2، CNRM-CM-6-1، MRI-ESM2-0، NESM3)، توسط مولد آب و هوایی LARS-WG6 ریزمقیاس‌نمایی شدند. بدین ترتیب، پیش‌بینی‌های تغییرات فصلی و سالانه برای Tmax، Tmin و بارش در دو دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰) با استفاده از میانگین GCM‌های منتخب انجام گرفت.

یافته‌ها: نتایج بررسی آماری داده‌های تاریخی، روندهای افزایشی برای دمای حداقل و حداکثر و روند کاهشی برای بارش در دوره پایه را نشان می‌دهند، اما هیچ‌یک از این روندها در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ معنادار نبوده است. همچنین، تجزیه و تحلیل بیانگر وقوع حادترین خشک‌سالی‌ها در استان در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و اواخر ۲۰۱۱ و اوایل ۲۰۱۲ و نیز ۲۰۱۸ می‌باشد، به‌طوری‌که در تمامی ایستگاه‌ها مقدار SPI به کمتر از -۱/۰ رسید. مرطوب‌ترین سال‌های استان نیز سال‌های ۲۰۰۴ الی ۲۰۰۶ و نیز سال ۲۰۱۷ هستند. در تمامی ایستگاه‌های منطقه فراوانی نسبی دوره‌های مرطوب بیشتر از دوره‌های خشک می‌باشد. در بحث ریزمقیاس‌نمایی، نتایج تأیید‌کننده‌ی قابلیت مدل LARS-WG6 در شبیه‌سازی دما با دقت بیشتری نسبت به بارش در سطح استان هستند که خطاهای شبیه‌سازی بارش در فصل‌های پر باران، بیشتر هستند. در این نتایج برای دمای حداکثر و حداقل ماهانه، کمترین مقادیر ضریب همبستگی، ۰/۹۴۱ و مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا مابین ۱/۰۵ و ۳/۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین تفاوت‌های مقادیر بارش تولید شده و مشاهداتی در ماه‌های پر باران بود که GCM‌ها حجم بارندگی‌ها را بسیار دست پایین تخمین می‌زنند. در تجزیه و تحلیل تغییرات اقلیمی در آینده، هر پنج GCM نشان دادند که افزایش مداوم دما در منطقه مورد مطالعه پیش‌بینی می‌شود. با این حال، تفاوت در میزان تغییرات پیش‌بینی شده در GCM‌ها و SSP‌ها مختلف دیده شد. این تغییرات دمای پیش‌بینی‌شده قابل‌توجه و قابل اعتماد هستند زیرا تمامی مدل‌ها در مورد جهت تغییر دما در کل استان توافق دارند. به‌طور کلی، افزایش میانگین Tmax و Tmin تحت SSP8.5 در مقایسه با SSP4.5 به دلیل انتشار گازهای گلخانه‌ای کاهش نیافته، قابل ملاحظه است. به‌طوری‌که تحت سناریوی SSP8.5 در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۹۰ بیشترین تغییرات متوسط در سطح استان برای دمای حداکثر، به‌ترتیب ۲/۶۴ و ۴/۷۲ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل بهار و بیشترین تغییرات متوسط دمای حداقل، به‌ترتیب ۲/۹۷ و ۴/۸۳ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل پاییز محاسبه گردید. تغییر بارش آینده پیچیدگی و عدم قطعیت بیشتری را نسبت به دما نشان داد. بالاترین میزان تغییرات افزایشی حجم بارش در سطح استان در سال ۲۰۹۰ در سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 در ایستگاه رامسر به‌میزان ۴۰/۵ و ۵۱/۹ درصد اعلام می‌گردد. همچنین، در سطح استان به‌طور متوسط تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 در افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) به‌ترتیب ۳۸/۸۶ و ۴۳/۹۵ درصد و در افق (۲۰۸۰-۲۱۰۰) به‌ترتیب ۴۵/۱۱ و ۶۵/۹۴ درصد افزایش حجم بارندگی پیش‌بینی می‌شود. به این ترتیب، با استناد به نتایج مطالعه حاضر، در سطح استان، تغییرات به‌سمت دوره مرطوب‌تر در طول دوره‌های آینده پیش‌بینی می‌رود که بخش غربی استان با افزایش بارندگی بیشتری مواجه می‌گردد.

نتیجه‌گیری: بررسی وضعیت خشک‌سالی در دوره پایه بیانگر وقوع دوره‌های با بارندگی نزدیک به نرمال در بازه‌های طولانی‌تر می‌باشد و ایستگاه‌های ساری و قراخیل نسبت به ایستگاه‌های غرب استان خشکی بیشتری را گزارش می‌دهند. همه مدل‌های پیش‌بینی GCM، نتایج یکسانی را در روندهای افزایش گرمایش قابل‌توجهی در این استان ارائه دادند ولی برای بارش به‌دلیل حساسیت موضوع و عدم قطعیت‌های دخیل بر مسأله، پیشنهاد می‌شود که مدل‌های دیگر در این رابطه مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین، با توجه به تأثیر تغییرات پارامترهای دمایی و بارش بر منابع آبی و سیلاب‌های منطقه، ضروری است جهت سازگاری و تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی، راهکارهای مدیریتی مناسب برای آینده اتخاذ گردد.

واژه‌های کلیدی: استان مازندران، بارندگی، دما، شاخص بارش استاندارد، CMIP6

مقدمه

بیشتر، همراه با تغییرات طولانی‌مدت در تمام اجزای سیستم آب و هوایی، افزایش احتمال تأثیرات گسترده و بالقوه غیرقابل برگشت بر سیستم‌های اجتماعی و اکولوژیکی می‌شود (O'Neill et al., 2017; Cook et al., 2020; Habibullah et al., 2022; Ozdemir, 2022). محققان

تغییرات اقلیمی جهانی سیستم زمین را تحت تأثیر قرار داده است و ارزیابی روندهای فعلی، تأیید‌کننده استمرار آن در آینده است (Almazroui et al., 2021). مطالعات نشان می‌دهد که ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای منجر به گرم شدن

در ایستگاه‌های متفاوت است (Zamani *et al.*, 2020). نتایج مطالعات انجام شده در زمینه ارزیابی شبیه‌سازی بارش و مقایسه مدل‌های مختلف CMIP6 در مناطق مختلف آب و هوایی ایران، نشان داد که در مناطق مرطوب مدل‌های (MRI-ESM2-0) و (CNRM-CM6-1) و خشک مدل‌های (HadGEM3-GC31-LL)، (BCC-CSM2-MR) و (CanESM5) عملکرد مناسبی داشتند (Yazdandoost *et al.*, 2021). در ارزیابی‌های انجام شده در تعیین تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش ایستگاه ساری در استان مازندران بر اساس مدل‌های CMIP6، مشاهده شد میانگین تغییرات دما از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و میانگین مقدار بارش سالانه حدود ۲۴ تا ۳۶ درصد افزایش می‌یابد (Roshani and Hamidi, 2022). زبردست رستمی و همکاران برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی حوضه سد گلورد در استان مازندران از مدل Lars-WG استفاده نمودند که نتایج مطالعات ایشان بیان‌گر افزایش دما و کاهش بارندگی در اغلب ماه‌های سال در سال‌های آماری آینده بود (Zabardast Rostami *et al.*, 2021).

شاخص‌های خشک‌سالی ابزارهای کلیدی برای تعیین کمیت تعریف خشک‌سالی و اجرای طرح‌های خشک‌سالی هستند (Wilhite *et al.*, 2007). شاخص تک متغیره بارش استاندارد شده^۲ (SPI) یکی از این شاخص‌ها می‌باشد که به‌طور گسترده در تشخیص خشک‌سالی هواشناسی و ناهنجاری‌های بارندگی استفاده می‌شود (McKee *et al.*, 1993; Huang *et al.*, 2016). از مزایای SPI می‌توان به‌سادگی محاسبات، داده‌های مورد نیاز قلیل دسترس و انعطاف‌پذیری در انتخاب مقیاس زمانی آن اشاره نمود (Li *et al.*, 2021).

رضایی و همکاران (Raziei *et al.*, 2009) در مطالعات خود با استفاده از شاخص SPI به بررسی الگوهای مکانی و زمانی خشک‌سالی در غرب ایران پرداختند و نتیجه گرفتند که از دهه ۸۰ به بعد یک روند قابل توجه افزایشی در شدت و فراوانی خشک‌سالی دیده می‌شود. جهانگیر و همکاران (Jahangir *et al.*, 2020) با به‌کارگیری شاخص SPI وضعیت خشک‌سالی در ایستگاه شیراز را در دوره پایه مورد ارزیابی قرار دادند و تغییرات اقلیمی منطقه را با استفاده از مدل Lars-WG پیش‌نمایی نمودند.

استان مازندران در شمال ایران، به‌دلیل برخورداری از آب و هوای معتدل و مرطوب و اراضی حاصلخیز، سهم قابل توجهی در تولید محصولات کشاورزی و تأمین غذای کشور دارا می‌باشد. با توجه به این که تبعات تغییرات اقلیمی در مناطق با اقلیم مرطوب می‌تواند به‌صورت تنش آبی روبه‌رشد (Nguvava *et al.*, 2019) و افزایش خطرات سیل (Avand *et al.*, 2021; Cea and Costabile, 2022) دیده شود، بررسی دقیق‌تر این موضوع در محدوده استان اهمیت ویژه‌ای می‌یابد. در واقع، درک تغییرات احتمالی دما و بارندگی در آینده و طراحی و اجرای اقدامات سازگاری مناسب در مقیاس استانی می‌تواند به‌میزان قابل توجهی آثار منفی پدیده

احتمال می‌دهند افزایش دما و تغییرات مرتبط در الگوهای بارش در سراسر جهان، خطرات و استرس‌ها را برای سیستم‌های اجتماعی-اقتصادی و طبیعی در سراسر قرن بیست و یکم و بعد از آن تشدید خواهد کرد (Easterling *et al.*, 2016; Cook *et al.*, 2020). همچنین این پدیده تأثیرات قابل توجهی بر کشاورزی و تأمین پایدار غذا دارد زیرا فرایندهای کشاورزی به‌ویژه در حالت سنتی تا حد زیادی به دو متغیر دما و بارش بستگی دارند (Malhi *et al.*, 2021).

مدل‌های گردش عمومی (GCMs) پیچیده‌ترین ابزارهای موجود برای بررسی واکنش سیستم آب و هوا به افزایش نیروی تشعشعی و شناسایی مکانیسم‌هایی هستند که این پاسخ را هدایت می‌کنند (Taylor *et al.*, 2012). با این حال، علی‌رغم پیشرفت‌های بالقوه طی دو دهه گذشته در شبیه‌سازی GCM از آب و هوای گذشته، حال و آینده، هنوز خطاها و نارسایی‌های منطقه‌ای قابل توجهی به‌دلیل نمایش ناقص فرآیندها در مقیاس منطقه‌ای، پارامترسازی‌های ضعیف، شرایط اولیه ناکامل و تفکیک‌پذیری‌های درشت وجود دارد (Diallo *et al.*, 2019; Sha *et al.*, 2021). در کنار این کاستی‌های مدل‌سازی، تأثیرات تغییرپذیری داخلی سیستم زمین نیز وجود دارد که در مجموع منجر به عدم اطمینان در پیش‌یابی تغییرات آب و هوا در مقیاس جهانی تا منطقه‌ای می‌شود. برای رسیدگی به این چالش‌ها، یک چارچوب هماهنگ توسط جامعه مدل‌سازی اقلیم، فازهای مختلفی از CMIP^۱ را ارائه نموده است که در آن GCM‌های پیشرفته با یک الگوی مشترک اجرا می‌شوند. هدف CMIP درک بهتر تغییرات آب و هوایی گذشته، حال و آینده ناشی از تغییرات طبیعی و اجباری، و در پاسخ به تغییرات در نیروی تابشی، در یک مجموعه چند مدلی است (Eyring *et al.*, 2016). مرور مقایسه‌های مطالعات پیشین، تأیید کننده قابلیت مدل‌های فاز ۵ (CMIP5) می‌باشد (Yokoyama *et al.*, 2019; Kavwenje *et al.*, 2022; Talchabhadel and Karki, 2022). در حال حاضر شبیه‌سازی‌های جدید از آخرین مدل‌های آب و هوایی پیشرفته شرکت‌کننده در فاز ۶ (CMIP6) به‌طور محدودتر در دسترس هستند (Kavwenje *et al.*, 2022). این شبیه‌سازی‌ها فرصت جدیدی را برای ارزیابی پاسخ سیستم زمین به تغییر در نیروهای تابشی در طول قرن بیست و یکم فراهم می‌کند. ارزیابی شبیه‌سازی‌های CMIP6 در چندین منطقه جهان، از جمله آمریکای جنوبی و مرکزی (Ortega *et al.*, 2021)، آفریقا (Dosio *et al.*, 2021) و چین (Xin *et al.*, 2020)، بیانگر تفاوت‌هایی در نتایج شبیه‌سازی شده‌ی این فاز با مطالعات قبلی CMIPs می‌باشد. اکثر مدل‌های CMIP6 نسخه‌های بهبود یافته مدل‌های فاز پیشین هستند که پارامترهای بهبود یافته میکروفیزیک ابر و نمایش بهتر فرآیندهای مختلف سیستم زمین، مانند چرخه‌های بیوژئوشیمیایی و صفحات یخی را شامل می‌شوند. نتایج ارزیابی عملکرد CMIP6 و CMIP5 در پیش‌یابی میانگین بارندگی در بازه‌های زمانی سالانه و فصلی در شمال و شمال‌شرق ایران طی دوره زمانی ۱۳۸۴-۱۳۶۶، نشان دهنده قابلیت بالاتر CMIP6 در تعیین بارش‌های فصل‌های مختلف

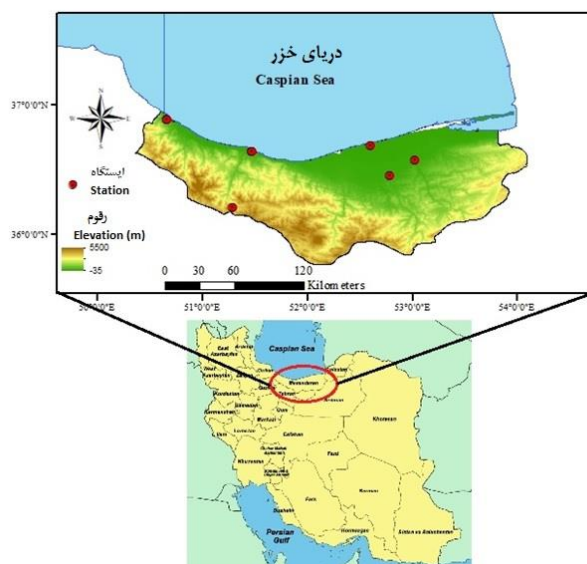
شرقی یکی از استان‌های حوضه‌ی آبریز دریای خزر می‌باشد (شکل ۱). بخش شمالی منطقه در مجاورت دریای خزر تراز ارتفاعی پایین‌تر و آب و هوای معتدل و مرطوب دارد و بخش جنوبی آن به دلیل قرارگیری در ناحیه کوهستانی رشته کوه البرز دارای اقلیم سردتری است. به دلیل این جغرافیای متنوع، شامل جلگه‌ها، علفزارها، بیشه‌ها و جنگل‌های هیرکانی، مجموعه‌ای غنی از گونه‌های گیاهی و جانوری در منطقه جای گرفته است. علاوه بر این اقلیم مرطوب این منطقه با دارا بودن آب و هوای معتدل و بارش‌هایی قابل قبول، آن را تبدیل به یکی از مناطق مستعد در زمینه تولید انواع محصولات کشاورزی نمود و بدین ترتیب منطقه نقش ویژه‌ای در امنیت غذایی و اشتغال‌زایی دارد (Nadi and Dastigerdi, 2022).

را کاهش دهد. در تحقیق حاضر مدل CMIP6 و سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 برای پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی آینده تحت انتشار گازهای گلخانه‌ای مختلف انتخاب شدند. به دلیل این که، GCMها به دلیل استفاده از سلول‌های محاسباتی به نسبت درشت، برای کاربرد مستقیم برای مطالعات در مقیاس فرعی یا محلی مناسب نیستند (Fowler *et al.*, 2007) از مدل LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی استفاده شد. در نهایت نتایج پژوهش حاضر می‌تواند در برنامه‌ریزی زیست محیطی و کاهش منابع آب و برنامه‌های خطر خشک‌سالی/سپیل در مقیاس محلی مفید باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران در شمال ایران با مختصات جغرافیایی $35^{\circ} 36'$ تا $36^{\circ} 58'$ عرض شمالی و $50^{\circ} 21'$ تا $54^{\circ} 08'$ طول



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی
Figure 1. Geographical location of the study area and meteorological stations

که موقعیت و ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. از این ایستگاه‌ها، داده‌های روزانه اندازه‌گیری شده حداکثر دما (Tmax)، حداقل دما (Tmin)، بارش (P) ۲۰ سال (دوره ژانویه ۱۹۹۹ الی دسامبر ۲۰۱۸)، تهیه گردید.

داده‌های جمع‌آوری شده

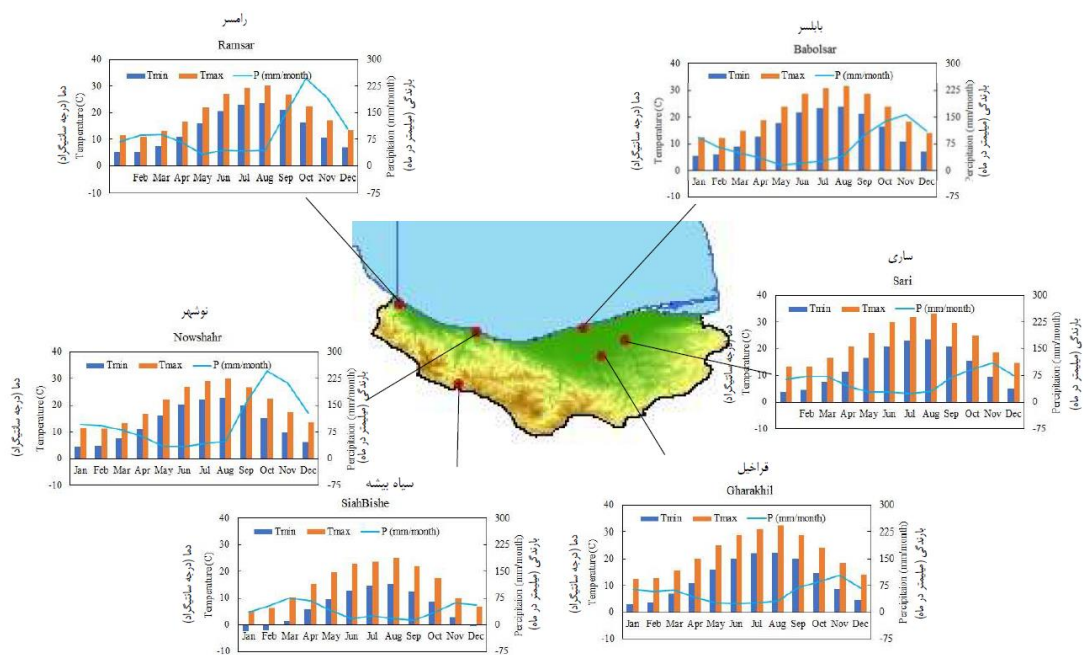
از میان ایستگاه‌های هواشناسی فعال در سطح استان مازندران، به دلیل پوشش بیشترین سال آماری و توزیع مکانی مناسب در سطح منطقه، ۶ ایستگاه هواشناسی انتخاب شدند

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران مورد استفاده در مطالعه

ارتفاع Height	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	سال شروع آماربرداری Start Year	ایستگاه Station
-20.0	50.68	36.90	1955	رامسر Ramsar
-20.9	51.47	36.66	1977	نوشهر Noshahr
1855.4	51.30	36.23	1999	سیاه بیشه Shahbishe
-21.0	52.64	36.70	1951	بابلسر Babolsar
14.7	52.77	36.45	1981	قراخیل Gharakheil
23.0	52.99	36.54	1999	ساری Sari

دیده می‌شود که دلیل آن مربوط به تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌های مورد مطالعه است. در تمامی ایستگاه‌ها به جز سیاه‌بیشه کم‌باران‌ترین ماه‌های سال می و ژوئن و پر باران‌ترین ماه‌های سال، اکتبر و نوامبر هستند. در حالی که در سیاه‌بیشه به دلیل قرار گرفتن ایستگاه در ناحیه کوهستانی که بیشترین بارش آن یه برف اختصاص دارد، ماه‌های مارچ و سپتامبر به ترتیب پر باران‌ترین و کم‌باران‌ترین ماه‌های سال هستند. بیشترین میزان میانگین بارش ماهانه به ایستگاه‌های نوشهر و رامسر به ترتیب با ۲۴۶/۶۳ و ۲۴۶/۹۸ میلی‌متر در ماه و کم‌ترین به ایستگاه سیاه‌بیشه ۷۵/۶۹ میلی‌متر در ماه تعلق دارد.

پیش از استفاده از داده‌ها، کیفیت داده‌ها از جنبه‌های مختلف مانند خطاها و مقادیر گم‌شده، تصادفی بودن داده‌ها، همگنی و استقلال داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در شکل ۲ تغییرات میانگین ماهانه سه پارامتر مورد بررسی، حداقل و حداکثر دما و بارش برای ۶ ایستگاه مورد مطالعه آورده شده است. با استفاده از داده‌های به دست آمده برای دوره پایه (۱۹۹۸-۲۰۱۸)، میانگین دمای حداکثر در تمامی ایستگاه‌ها در ماه آگوست و در دامنه ۲۴/۹۹ (سیاه‌بیشه) الی ۳۳/۱۰ (ساری) درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. همچنین در استان کمترین میانگین دمای حداقل در ماه ژانویه و به میزان ۲/۴۱- (سیاه‌بیشه) و ۵/۵۵ (بابلسر) درجه سانتی‌گراد گزارش شده است. در تغییرات بارندگی‌های استان وضعیت متغیرتری



شکل ۲- میانگین ماهانه تغییرات دمای حداکثر، دمای حداقل و بارندگی در طول دوره آماری (۱۹۹۹-۲۰۱۸) در استان مازندران
Figure 2. Monthly average changes in maximum temperature, minimum temperature and rainfall during the statistical period (1999-2018) in Mazandaran province

داده‌های x_1, x_2, \dots, x_n شامل n داده، از رابطه زیر محاسبه می‌گردد (Mann, 1945; Kendall, 1948):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن:

$$\text{sgn}(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } X > 0 \\ 0 & \text{if } X = 0 \\ -1 & \text{if } X < 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۲})$$

میانگین S برابر صفر است و واریانس آن از رابطه (۳) قابل محاسبه می‌باشد:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^n t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18}$$

تعیین روند پارامترهای اقلیمی با آزمون‌های من کندال و شیب سن

آزمون من - کندال و شیب سن از معتبرترین و متداول‌ترین آزمون‌ها برای شناسایی روند در یک سری زمانی از داده‌های محیطی، داده‌های هیدرولوژیکی یا داده‌های آب و هوایی می‌باشند. در روش من - کندال، فرضیه صفر (H_0) و فرضیه جایگزین (H_a) به ترتیب نشان دهنده عدم وجود روندی در سری و تبعیت داده‌ها از یک روند یکنواخت (یعنی روند منفی، غیرصفر یا مثبت) می‌باشند. از مزایای این روش می‌توان به عدم نیازی به توزیع نرمال داده‌ها به دلیل ناپارامتریک بودن آزمون (آزمون بدون توزیع) و حساسیت کم به شکست‌های ناگهانی ناشی از سری‌های زمانی ناهمگن اشاره نمود (Kousari et al., 2013; Del-Toro-Guerrero and Kretzschmar, 2020). آماره آزمون (S) برای سری

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

که در آن n تعداد بارش اندازه‌گیری شده و \bar{x} میانگین مقدار داده‌های بارش است.

تابع توزیع گامای تجمعی $G(x)$ برای $x > 0$ (تابع توزیع گامای ناقص) تعریف شده است در حالی که اندازه‌گیری بارش ممکن است حاوی مقادیر صفر باشد ($x = 0$). تابع توزیع گامای تجمعی کامل $H(x)$ به صورت $H(x) = q + (1-q)G(x)$ بیان می‌شود که در آن q احتمال عدم بارندگی است. مقدار q برابر است با نسبت m/n که در آن m تعداد صفر اندازه‌گیری بارش در کل تعداد n اندازه‌گیری است (Thom, 1958; Almedeij, 2014; Nadi and Shiukhy Soqanloo, 2020).

در نهایت، تابع توزیع تجمعی گاما با استفاده از معادلات زیر به توزیع استاندارد شده نرمال با میانگین صفر و انحراف استاندارد واحد تبدیل می‌شود (Thom, 1958; Almedeij, 2014).

$$SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (\text{رابطه ۹})$$

$$SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad 0.5 < H(x) \leq 1$$

که در آن:

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x)^2} \right)} \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{1 - H(x)^2} \right)} \quad 0.5 < H(x) \leq 1$$

ضرایب در رابطه (۹) عبارتند از:

$$\begin{cases} c_0 = 2.515517 \\ c_1 = 0.802853 \\ c_2 = 0.010328 \end{cases}, \begin{cases} d_1 = 1.432788 \\ d_2 = 0.189269 \\ d_3 = 0.001308 \end{cases}$$

پس از محاسبه SPI با استفاده از جدول (۲) می‌توان در مورد خشک‌سالی و ترسالی دوره‌ها اظهار نظر نمود. مقدار شاخص SPI برای دوره‌های مختلف ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه قابل محاسبه است که دوره‌های کوتاه‌مدت امکان بررسی رطوبت خاک (کاربرد در کشاورزی) و دوره‌های بلندمدت امکان بررسی منابع آب زیرزمینی و ذخائر سطحی را فراهم می‌آورند (Li et al., 2021; Ozdemir, 2022).

که p تعداد گروه‌های همبسته در مجموعه داده‌ها و z تعداد نقاط داده در گروه z ام است. در نهایت آماره استاندارد شده Z از رابطه (۴) تعیین می‌گردد:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\sigma^2}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\sigma^2}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴})$$

چنانچه $-1/96 < Z < +1/96$ باشد، در سطح اطمینان ۹۵٪ داده‌ها دارای روند می‌باشند و فرض صفر رد می‌شود (Mann, 1945; Kendall, 1948).

تخمین گر سن آزمون ناپارامتریک دیگری است که برای تعیین بزرگی روند استفاده می‌شود. در این روش یک شیب میانه برای سری زمانی محاسبه می‌گردد و سپس در مورد معنی‌داری شیب به‌دست آمده در سطوح اعتماد مختلف بحث می‌شود. بر همین اساس، مجموعه‌ای از شیب‌های خطی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Sen, 1968):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن Q شیب است، x نشان دهنده متغیر، n تعداد داده‌ها، و z و k شاخص‌هایی با شرط $j > k$ هستند. شیب برای هر جفت داده مشاهداتی تخمین زده می‌شود و برای برای تخمین برآوردگر شیب سن (Q_{med}) میانه این سری زمانی شیب خط روند تعیین می‌گردد.

شاخص بارش استاندارد شده

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) که توسط مک کی و همکاران ایجاد شده است (Kavwenje et al., 2022). این شاخص متداول‌ترین روش مورد استفاده برای پایش خشک‌سالی و سال مرطوب است (Bonaccorso et al., 2003; Tsakiris and Vangelis, 2004; Giorgi and Lionello, 2008; Raziei et al., 2013; Naderi, 2020). شاخص SPI بر اساس تابع توزیع تجمعی گاما قابل محاسبه است (Thom, 1958; Greenwood and Durand, 1960; Sharma and Singh, 2010):

$$G(x) = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-(x/\beta)} dx \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (\text{رابطه ۷})$$

که در آن $G(x)$ تابع توزیع تجمعی گاما، x بارش اندازه‌گیری شده و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. ضرایب β و α به‌ترتیب پارامترهای شکل و مقیاس هستند که با استفاده از معادلات زیر قابل محاسبه هستند (Almedeij, 2014; Gumus and Algin, 2017).

جدول ۲- طبقه‌بندی شاخص SPI و تعریف کلاس‌های خشک‌سالی متناظر (McKee et al., 1993)

Table 2. Classification of SPI index and definition of corresponded drought classes (McKee et al., 1993)

طبقه‌بندی Classification	مقدار شاخص SPI SPI index value
به‌شدت مرطوب Extremely wet	>2
خیلی مرطوب Very wet	1.50 ~ 1.99
به‌نسبت مرطوب Moderately wet	1.00 ~ 1.49
مرطوب ملایم Mildly wet	0.00 ~ 0.99
خشک ملایم Mildly dry	-0.99 ~ 0.00
به‌نسبت خشک Moderately dry	-1.49 ~ -1.00
خیلی خشک Very dry	-1.99 ~ -1.50
به‌شدت خشک Extremely dry	-2.00 >

2012; O'Neill et al., 2017; Cao et al., 2018; Swart et al., 2019; Voldoire et al., 2019; Yukimoto et al., 2019) است، برای کاهش مقیاس و تجزیه و تحلیل پیش‌یابی آب و هوای آینده استفاده گردید. مشخصات پنج مدل انتخابی در این تحقیق در جدول ۳ ارائه شده است. انتخاب GCMها بر اساس عملکرد آنها در شبیه‌سازی بارش و دما در مناطق مرطوب ایران (Yazdandoost et al., 2021) و ایستگاه هواشناسی ساری (Roshani and Hamidi, 2022) صورت گرفت.

مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار

برای پیش‌یابی داده‌های آب و هوای محلی، خروجی‌های GCM موردنیاز می‌باشد که اطلاعات مورد نیاز جهت شبیه‌سازی مدل اقلیمی CMIP6 از پایگاه <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6> به‌دست آمد. در مطالعه حاضر خروجی‌های پنج GCM (ACCESS-CM2, MRI-ESM2-0, CNRM-CM-6-1, CanESM2, CM2 و NESM3) که شامل شبیه‌سازی‌های آب و هوایی تاریخی و آینده تحت SSP2.6، SSP4.5 و SSP3-8.5 (Bi et al.,)

جدول ۳- فهرست پنج مدل CMIP6 مورد استفاده در این مطالعه به‌همراه وضوح افقی، برچسب متغیر و منابع کلیدی (۳۳)

Table 2. List of five CMIP6 models used in this study along with horizontal resolution, variable label and key sources

منابع کلیدی Key references	برچسب متغیر Variant labels	وضوح افقی (عرض * طول برحسب درجه) Horizontal resolution (lon. by lat. in degrees)	نام مدل CMIP6 CMIP6 Model Names	ردیف No
(Bi et al., 2012)	r11p1f1	1.9° × 1.3°	ACCESS-CM2	1
(Swart et al., 2019)	r11p1f1	2.8° × 2.8°	CanESM5	2
(Voldoire et al., 2019)	r11p1f2	1.4° × 1.4°	CNRM-CM6-1	3
(Yukimoto et al., 2019)	r11p1f1	1.1° × 1.1°	MRI-ESM2-0	4
(Cao et al., 2018)	r11p1f1	1.9° × 1.9°	NESM3	5

مربعات خطا (RMSE) استفاده می‌شود که آن‌ها را می‌توان از روابط (۱۱) و (۱۲) محاسبه نمود (Duan et al., 2016):

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (G_i - O_i)^2}{N}} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

که در آن‌ها G_i و O_i به‌ترتیب مقادیر مشاهداتی و تولید شده CMIP6 پارامترها و \bar{G} و \bar{O} میانگین داده‌های متناظر بین N تعداد نمونه می‌باشند.

پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل LARS-WG، مرحله نهایی شامل تولید سری داده‌های اقلیمی آینده می‌باشد. این روش با به‌روزرسانی پارامترهای مدل کالیبره شده با خروجی‌های GCM و SSP انتخابی انجام می‌شود. نسبت تغییر نسبی و تغییر مطلق بین دوره‌های آینده و مقادیر پایه

کاهش مقیاس با استفاده از LARS-WG

LARS-WG یک مولد آب و هوای تصادفی است که برای مدل‌سازی داده‌های آب و هوا در یک مکان واحد (۴۸، ۴۲، و ۵۰) تحت شرایط آب و هوایی فعلی و آینده استفاده می‌شود. این مدل از توابع توزیع نیمه‌تجربی و توزیع احتمال تجمعی برای تخمین توزیع‌های احتمال سری روزهای تر و خشک، بارندگی روزانه، دما و تابش خورشیدی استفاده می‌کند. مروری بر تحقیقات پیشین اثبات می‌کند که برای مکان‌های مختلف در سراسر جهان، این مدل قادر به شبیه‌سازی عوامل اقلیمی با مهارت معقول است (Semenov et al., 2013). در تحقیق حاضر از نسخه LARS-WG6 برای کاهش عدم قطعیت برای دوره پایه و دو دوره آینده استفاده گردید. علاوه بر این، سناریوی انتشار SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 در مدل LARS-WG اعمال خواهد شد. استفاده از بیش از یک GCM و سناریوی SSP برای از بین بردن عدم قطعیت ناشی از فرض در هر رویکرد است (O'Neill et al., 2017; Osman et al., 2017).

در این مطالعه برای اعتبارسنجی عملکرد LARS-WG از پارامترهای ضریب همبستگی (CC) و ریشه میانگین

و حداکثر و روند کاهشی برای بارش در دوره پایه دیده می‌شود اما هیچ‌یک از این روندها در سطح احتمالاتی ۰/۰۵ معنادار نبوده است. برای دمای حداقل، بیشترین شیب روند افزایشی مربوط به ایستگاه ساری (۰/۱۲۲) و کمترین شیب روند افزایشی مربوط به ایستگاه نوشهر (۰/۰۰۸) می‌باشد. برای دمای حداکثر بیشترین شیب روند افزایشی به ایستگاه ساری (۰/۳۴۹) و کمترین شیب روند افزایشی به ایستگاه سیاه‌بیشه (۰/۱۲۳) تعلق دارد. نتایج آزمون من-کندال برای داده‌های بارش در دوره پایه، بیانگر روند کاهشی برای تمامی ایستگاه‌ها در استان می‌باشد که بیشترین شیب روند کاهشی مربوط به ایستگاه ساری (۳/۸۷۷) و کم‌ترین مربوط به ایستگاه نوشهر (۰/۷۱۲) محاسبه شده است. نتایج به‌دست آمده برای روند تغییرات پارامترهای اقلیمی با نتایج روشنی و حمیدی (Roshani and Hamidi, 2022) مطابقت دارد.

بارندگی و دما، به‌ترتیب برای هر ماه محاسبه گردید. در مرحله بعد تغییرات برای ایجاد فایل‌های سناریو برای هر دوره آینده با افزودن مقادیر RCR به ۱/۰۰ برای هر ماه و مقادیر AC به ۰/۰۰ مورد استفاده قرار گرفت. در نهایت، فایل‌های سناریوی فردی همراه با مدل LARS-WG کالیبره‌شده برای تولید سری‌های زمانی روزانه حداقل و حداکثر دما و بارش برای سه برش زمانی آینده استفاده شدند.

نتایج و بحث

تجزیه و تحلیل آماری وضعیت اقلیمی در دوره پایه

جدول ۴ نتایج به‌کارگیری آزمون من-کندال (آماره Z) و شیب سن (آماره Q) را بر روی سری‌های زمانی ماهانه و سالانه حداقل و حداکثر دما و بارش، برای شش ایستگاه منتخب در استان مازندران را ارائه می‌کند. نتایج حاصل نشان داد هرچند نشانه‌هایی از روندهای افزایش برای دمای حداقل

جدول ۴- نتایج آزمون‌های من-کندال و شیب سن برای پارامترهای اقلیمی میانگین سالانه

پارامتر	مقادیر آماری	رامسر	نوشهر	سیاه‌بیشه	بابلسر	قراخیل	ساری
Parameter	Statistical values	Ramsar	Noshahr	Siahbishe	Babolsar	Gharakheil	Sari
دمای حداقل	Q	0.010	0.008	0.117	0.012	0.016	0.122
Minimum temperature	Z	0.819	0.521	0.836	0.620	0.721	1.434
دمای حداکثر	Q	0.231	0.142	0.123	0.234	0.324	0.349
Maximum temperature	Z	2.010	1.762	1.639	1.812	1.973*	2.088*
بارش	Q	-1.027	-0.712	-0.807	-2.010*	-3.011**	-3.877**
Precipitation	Z	-0.521	-0.223	-0.696	-0.223	-0.323	-0.489

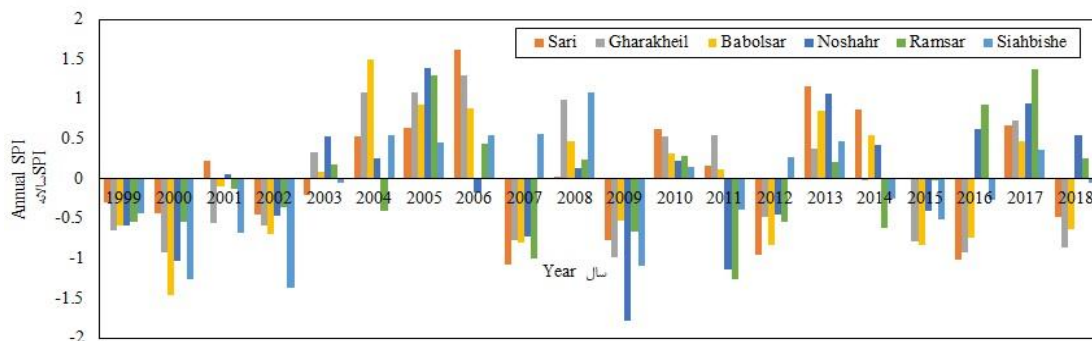
*مشاهده روند در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ** مشاهده روند در سطح اطمینان ۹۹ درصد

*Observed trends at the 95% confidence level, **Observed trends at the 99% confidence level

($-0.5 < SPI < 0.5$) برای ایستگاه‌های ساری، قراخیل، بابلسر، نوشهر، رامسر و سیاه‌بیشه به‌ترتیب برابر ۳۷/۱، ۳۶/۳، ۳۷/۹، ۳۹/۲، ۳۵/۸ و ۳۶/۷ درصد می‌باشند. در تمامی ایستگاه‌های منطقه فراوانی نسبی دوره‌های مرطوب ($SPI < 0$) بیشتر از دوره‌های خشک ($SPI > 0$) می‌باشد. حادثترین خشک‌سالی‌ها در استان سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و اواخر ۲۰۱۱ و اوایل ۲۰۱۲ و نیز ۲۰۱۸ رخ داد، به‌طوری‌که در تمامی ایستگاه‌ها مقدار SPI به کمتر از $-1/0$ رسید. قابل ذکر است که خشک‌سال‌های خفیف‌تری نیز در سال‌های دیگر مشاهده می‌گردد که در این میان ایستگاه‌های ساری و قراخیل بیشترین دوره‌های خشکی را تجربه کردند. مرطوب‌ترین سال‌های استان نیز سال‌های ۲۰۰۴ الی ۲۰۰۶ و نیز سال ۲۰۱۷ هستند.

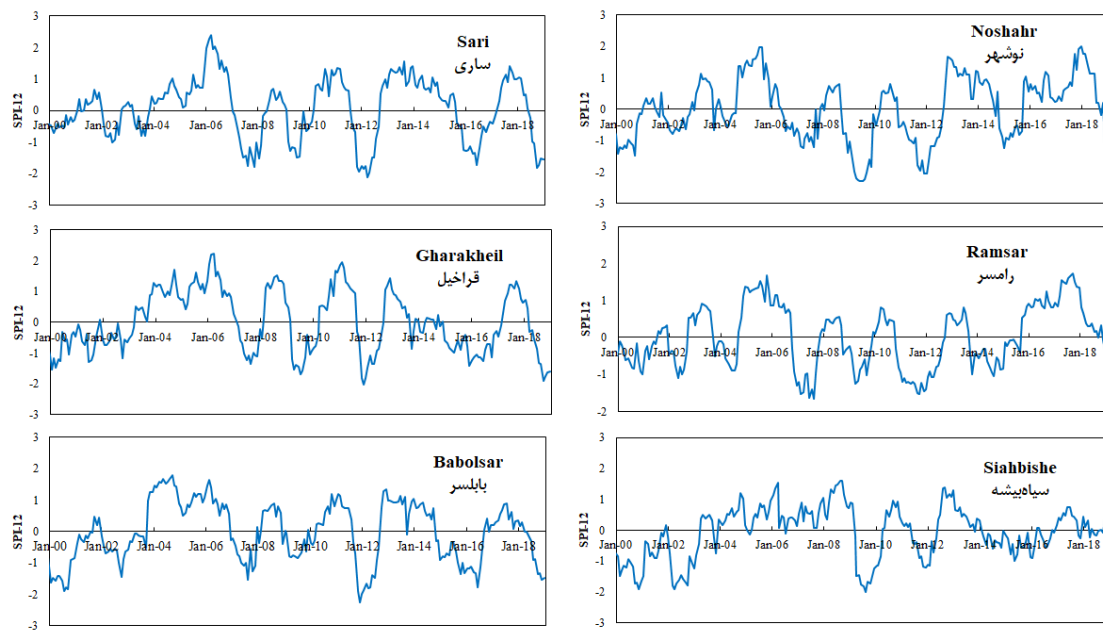
ویژگی‌های خشک‌سالی در دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۹۹)

پس از تعیین شرایط اقلیمی استان در دوره پایه، وضعیت خشک‌سالی منطقه بر اساس تغییرات SPI بررسی قرار گرفت. به این منظور داده‌های ماهانه بارش اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌عنوان ورودی و ماژول محاسبه SPI در پایتون استفاده شد. در شکل ۳ مقادیر محاسبه شده سالانه شاخص SPI برای ایستگاه‌های منتخب ارائه گردیده است. همچنین در شکل ۴ و جدول ۵ به‌ترتیب تغییرات شاخص SPI دوازده ماهه و درصد فراوانی رده‌های مختلف خشک‌سالی بر حسب شاخص SPI دوازده ماهه ایستگاه‌های منتخب در دوره پایه آورده شده است. نتایج SPI دوازده ماهه نشان می‌دهند، در دوره مطالعاتی ۲۰ ساله فراوانی نسبی ماه‌ها با بارش نزدیک به نرمال



شکل ۳- مقادیر SPI سالانه ایستگاه‌های انتخابی استان مازندران در دوره پایه

Figure 3. Annual SPI values of selected stations in Mazandaran province in the base period



شکل ۴- مقادیر شاخص SPI دوازده ماهه ایستگاه‌های انتخابی استان مازندران در دوره پایه
Figure 4. 12-month SPI Indices values of selected stations in Mazandaran province in the base period

جدول ۵- درصد فراوانی رده‌های مختلف خشک‌سالی ایستگاه‌های منتخب در دوره پایه

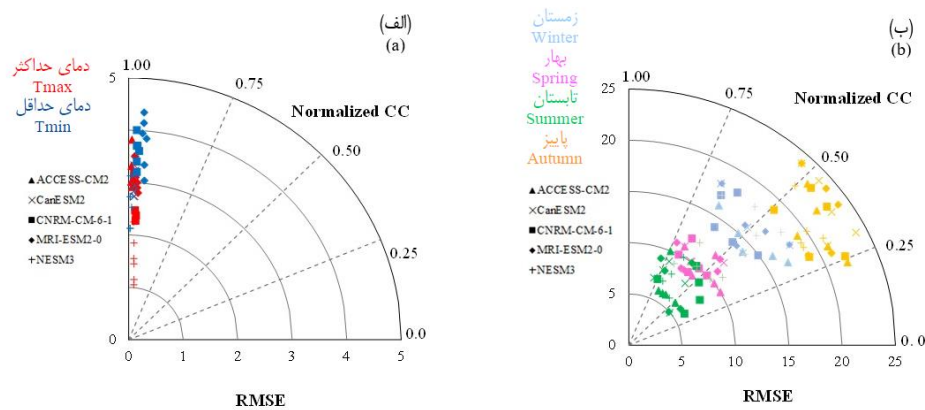
Table 5. Frequency percentage of different drought categories of selected stations in the base period

رده خشک‌سالی Drought class								نام ایستگاه Station name
بشدت خشک Extremely dry	خیلی خشک Very dry	به نسبت خشک Moderately dry	خشک ملایم Mildly dry	مرطوب ملایم Mildly wet	به نسبت مرطوب Moderately wet	خیلی مرطوب Very wet	بشدت مرطوب Extremely wet	
0.4	8.3	12.3	30.6	34.7	11.1	2.3	0.3	ساری Sari
0.5	8.4	13.6	30.3	30.3	11.8	4.6	0.8	قراخیل Gharakheil
0.4	5.3	9.6	31.3	38.8	10.3	3.3	1.0	بابلسر Babolsar
0.3	2.5	9.2	30.4	39.2	11.6	5.4	1.4	نوشهر Noshahr
0.0	1.7	8.2	37.1	38.2	10.5	3.3	1.0	رامسر Ramsar
0.0	6.3	8.3	29.6	47.6	6.8	1.4	0.0	سیاه‌بیشه Siahbishe

داده‌های هواشناسی روزانه مشاهده شده و مصنوعی در هر ایستگاه با استفاده از آزمون‌های آماری و مقایسه‌های گرافیکی انجام شد. در شکل ۵ نمودار تیلور برای شبیه‌سازی CMIP6 برای داده‌های دمای حداکثر و حداقل (شکل ۵-الف) و بارش (شکل ۵-ب) در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف استان، ارائه شده است.

ریزمقیاس نمایی با مدل LARS-WG

در این مطالعه از آخرین نسخه عمومی LARS-WG-۷6 برای کاهش مقیاس درشت داده‌های دما و بارش از پنج GCM تحت سه SSP برای شش ایستگاه هواشناسی موردنظر استفاده شد. فرآیند تولید داده‌های بارش مصنوعی و دما در حال و آینده شامل مراحل شامل کالیبراسیون، اعتبارسنجی و تولید داده‌های آب و هوایی آینده می‌باشد. کالیبراسیون مدل LARS-WG با استفاده از داده‌های دوره ۲۰ ساله پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) در هر ایستگاه برای تعیین پارامترهای مدل انجام شد که بر اساس آن ۲۰ سال داده‌های آب و هوایی مصنوعی روزانه برای اعتبارسنجی مدل تولید شد. اعتبار مدل LARS-WG با مقایسه ویژگی‌های مختلف



شکل ۵- نمودار تیلور برای داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده CMIP6 در برابر مقادیر اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های مختلف استان در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸): (الف) میانگین‌های فصلی بارش، (ب) میانگین‌های دمای حداقل و حداکثر

Figure 5. Taylor diagram for CMIP6 simulated climate data vs. measured values at different stations in the province in the base period (1999-2018); (a) Seasonal precipitation averages, (b) Minimum and maximum temperature averages

این‌حال، بر اساس نتایج آماری مدل‌ها، تخمین بارش نسبتاً خوب است. بنابراین، ابزار LARS-WG احتمالاً می‌تواند برای پیش‌یابی بیشتر دما و بارندگی در منطقه مورد مطالعه استفاده شود.

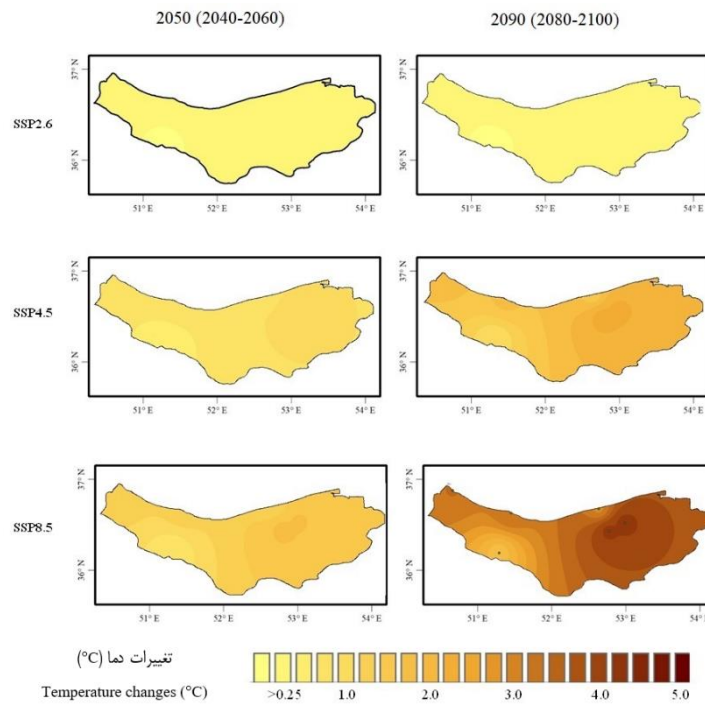
تجزیه و تحلیل تغییرات اقلیمی در آینده

باتوجه به نتایج به‌دست آمده در تحقیق حاضر و به‌دلیل نتایج قابل قبول پنج مدل GCM مورد استفاده، برای ارزیابی تغییرات پیش‌یابی شده پارامترهای اقلیمی برای افق آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰) از میانگین مقادیر پیش‌یابی شده پنج مدل ACCESS-CM2، CanESM2، CNRM-CM6-1، MRI-ESM2-0 و NESM3 استفاده گردید. بر این اساس، میانگین تغییرات سالانه دمای متوسط‌گیری شده مجموعه GCMها تحت SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 برای دو دوره‌ی آتی در استان مازندران در شکل ۶ ارائه شده است.

براساس نقشه‌های ارائه شده در شکل ۶ (ردیف بالا) مشاهده می‌شود که سناریوی SSP2.6 تغییر چندانی در دمای میانگین سالانه در سطح استان ایجاد نکرده است. بیشترین این تغییرات در ایستگاه ساری و برای افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰) به ترتیب ۰/۲۰ و ۰/۳۹۱ درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد. برای دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۶۰)، افزایش دما تا ۱/۶۳ درجه سانتی‌گراد (ساری) در SSP4.5 و ۱/۸۳ درجه سانتی‌گراد (قراخیل) تحت سناریوی SSP8.5 است. همانطور که انتظار می‌رود، قوی‌ترین افزایش دما در افق آینده (۲۰۸۰-۲۱۰۰) در کل استان تحت سناریوی SSP8.5 مشاهده می‌شود که به میزان ۴/۱۱ درجه سانتی‌گراد در ایستگاه ساری خواهد رسید. این تغییرات دمای پیش‌بینی شده قابل توجه و قابل اعتماد هستند زیرا تمامی مدل‌ها در مورد جهت تغییر دما در کل استان توافق دارند.

شکل (۵-الف) به‌وضوح نشان می‌دهد که هر پنج مدل GCM مقادیر دمای حداکثر و حداقل ماهانه را برای همه ایستگاه‌ها به‌خوبی شبیه‌سازی کرد. در این نتایج کمترین مقادیر CC، ۰/۹۴۱ و مقادیر RMSE مابین ۱/۰۵ و ۳/۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. در حالی که مدل در شبیه‌سازی بارش رفتار متفاوت‌تری دارد. به‌دلیل تفاوت مقادیر RMSE و CC برای شبیه‌سازی بارش در فصول زمستان (زانویه، فوریه و مارچ)، بهار (آوریل، می و ژوئن)، تابستان (جولای، آگوست و سپتامبر) و پاییز (اکتبر، نوامبر و دسامبر)، در نمودار تیلور (شکل ۵-ب) نتایج به‌صورت فصلی ارائه شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد در فصول کم‌باران‌تر (بهار و تابستان) همه پنج مدل GCM، مقادیر پایین‌تری از RMSE ارائه دادند و CCها مابین ۰/۲۵ و ۰/۷۵ قرار دارد. اگرچه مقادیر دور از واحد CC بیانگر قابلیت پایین‌تر GCMها در شبیه‌سازی بارش نسبت به دما می‌باشد. این در حالی است RMSEها در فصول پر باران‌تر (پاییز و زمستان) مقادیر بالاتری دارند و همچنان CCها از یک فاصله قابل توجهی دارند. بیشترین تفاوت‌های مقادیر بارش تولید شده و مشاهداتی در ماه‌های پر باران بود که GCMها حجم بارندگی‌ها را بسیار دست پایین تخمین می‌زنند. یزدان‌دوست و همکاران (Yazdandoost et al., 2021) نتیجه مشابهی را در ارزیابی مدل‌های CMIP6 در کل مناطق ایران مشاهده نمودند که مدل‌ها در مناطق خشک و فوق‌خشک تخمین بهتری از حجم بارندگی ارائه می‌کند ولی در ناحیه مرطوب، مقادیر داده‌های بارش تولید شده کمتر از مقادیر مشاهداتی بود.

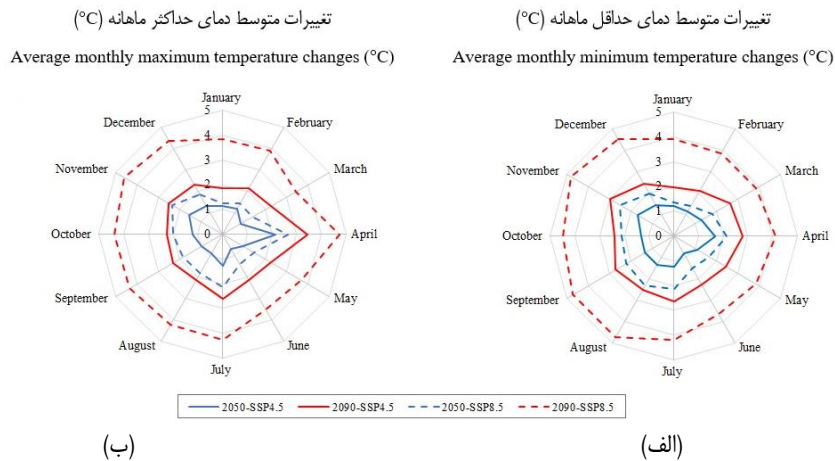
در مجموع، بر اساس نتایج، می‌توان اظهار نمود که برای استان مازندران مدل LARS-WG کالیبره و اعتبارسنجی شده دارای قابلیت بهتری برای تولید دما در مقایسه با بارش است، که در آن تعدادی اختلاف در میانگین و انحراف استاندارد برای داده‌های شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. با



شکل ۶- توزیع مکانی تغییرات در دمای میانگین سالانه (°C) برای افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰)، تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5، و SSP8.5 با توجه به دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) با استفاده از میانگین پنج مدل GCM مورد بررسی
 Figure 6. Spatial distribution of changes in annual mean temperature (°C) for the 2050 (2040-2060) and 2090 (2080-2100) horizons, under SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 scenarios with respect to the base period (1999-2018) using the average of five The investigated GCM model

سال ۲۰۹۰ به ترتیب ۳/۴۴ و ۴/۷۲ درجه سانتی‌گراد افزایش دما در استان در ماه آوریل (فصل بهار) انتظار می‌رود. در حالی که برای دمای حداقل، بیشترین تغییرات در ماه نوامبر (فصل پاییز) مشاهده می‌شود که استان تحت سناریوی SSP8.5 حداکثر تغییرات متوسط ۲/۹۷ و ۴/۸۳ درجه سانتیگراد را به ترتیب در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۹۰ تجربه می‌کند.

شکل ۷ متوسط تغییرات دمای حداقل و حداکثر در سطح استان برای ماه‌های مختلف براساس دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 و در دو افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل می‌توان مشاهده نمود برای دمای حداکثر بیشترین افزایش دما در ماه آوریل رخ می‌دهد. به طوری که تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 در سال ۲۰۵۰ به ترتیب ۲/۱۳ و ۲/۶۴ درجه سانتی‌گراد و در

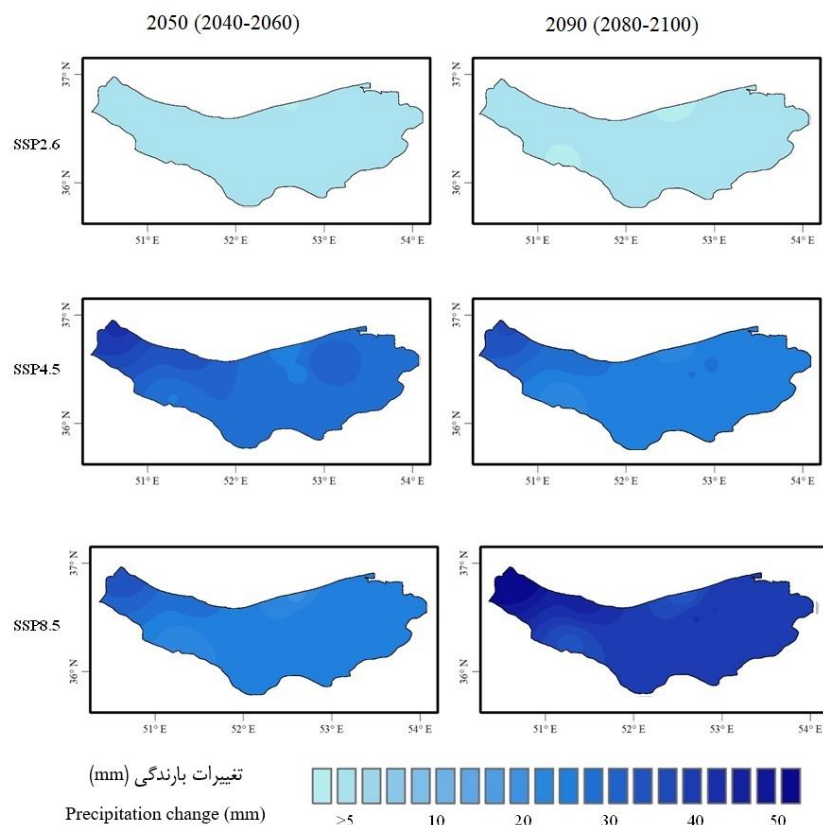


شکل ۷- (الف) تغییرات متوسط دمای حداقل و (ب) تغییرات متوسط دمای حداکثر ماهانه در سطح استان (°C) برای سال ۲۰۵۰ در افق (۲۰۶۰-۲۰۴۰) و سال ۲۰۹۰ در افق (۲۰۸۰-۲۱۰۰)، تحت سناریوهای SSP4.5، و SSP8.5 با توجه به دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸)
 Figure 7. (a) Average monthly minimum and (b) Average monthly maximum temperature changes in the province (°C) for the horizon of 2050 (2040-2060) and 2090 (2100-2080), under the SSP4.5, and SSP8.5 scenarios according to the base period (1999-2018)

افزایش بارش در سطح استان نسبت به فصول دیگر رخ خواهد داد. به طوری که در سطح استان به طور متوسط تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 در افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) به ترتیب ۳۸/۸۶ و ۴۳/۹۵ درصد و در افق (۲۰۸۰-۲۱۰۰) به ترتیب ۴۵/۱۱ و ۶۵/۹۴ درصد افزایش حجم بارندگی پیش‌یابی می‌شود. کمترین نرخ تغییرات در پاییز مشاهده می‌شود که دلیل آن عدم وجود روند یکنواخت در بارندگی‌ها بود. در این فصل با وجود اینکه در ماه اکتبر همه مدل‌ها روند افزایشی بارش را پیش‌یابی کردند اما برای ماه‌های نوامبر و دسامبر مدل‌ها دارای الگوی یکسانی نبودند و برخی با کاهش و برخی با افزایش بارندگی مواجه شدند. به همین دلیل میانگین فصلی کمتر از بقیه فصول به دست آمد. نکته حائز اهمیت این است که تغییرات اقلیمی در استان همه فصول به صورت افزایش بارش بروز می‌یابد. این روند رو به رشد بارش همراه با روند افزایشی دما روند قابل پیش‌یابی در IPCC می‌باشد که مناطق با اقلیم مرطوب در زمان حال، طی سال‌های آینده می‌بایست انتظار سال‌های پرباران‌تری داشته باشند (Allen *et al.*, 2018) که این امر در تحقیقات صورت گرفته در نواحی آمریکای مرکزی و شمالی نیز تأیید گردید (Almazroui *et al.*, 2021).

در شکل ۸ میانگین درصد تغییرات سالانه بارش متوسط‌گیری شده مجموعه GCMها تحت SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 برای دو دوره آتی در مقایسه با اقلیم فعلی در استان مازندران آورده شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود در سطح استان تغییرات به سمت دوره مرطوب‌تر در طول قرن بیست و یکم پیش می‌رود. در تمامی سناریوها افزایش بارش سالانه دیده می‌شود، با این تفاوت که تحت سناریوی SSP2.6 تغییرات جزئی و به تدریج (با بالاترین میزان حدود ۳/۵ درصد در ایستگاه رامسر) رخ می‌دهند. در مقابل در سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 افزایش واضح‌تر است به طوری که در سال ۲۰۹۰ در ایستگاه رامسر (بالاترین میزان تغییرات در سطح استان) ۴۰/۵ و ۵۱/۹ درصد افزایش حجم بارش محاسبه گردید.

به دلیل تفاوت در روند تغییرات بارش در فصول مختلف، در شکل ۹ درصد تغییرات فصلی بارش میانگین برای افق ۲۰۵۰ (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و ۲۰۹۰ (۲۰۸۰-۲۱۰۰)، تحت سناریوهای مورد بررسی نسبت به دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) با استفاده از میانگین پنج مدل GCM ارائه شده است. در این شکل می‌توان مشاهده نمود در تمامی دوره‌ها و تحت همه سناریوها، بخش غربی استان با افزایش بارندگی بیشتری مواجه می‌گردد. در زمستان به میزان قابل توجهی بالاترین نرخ

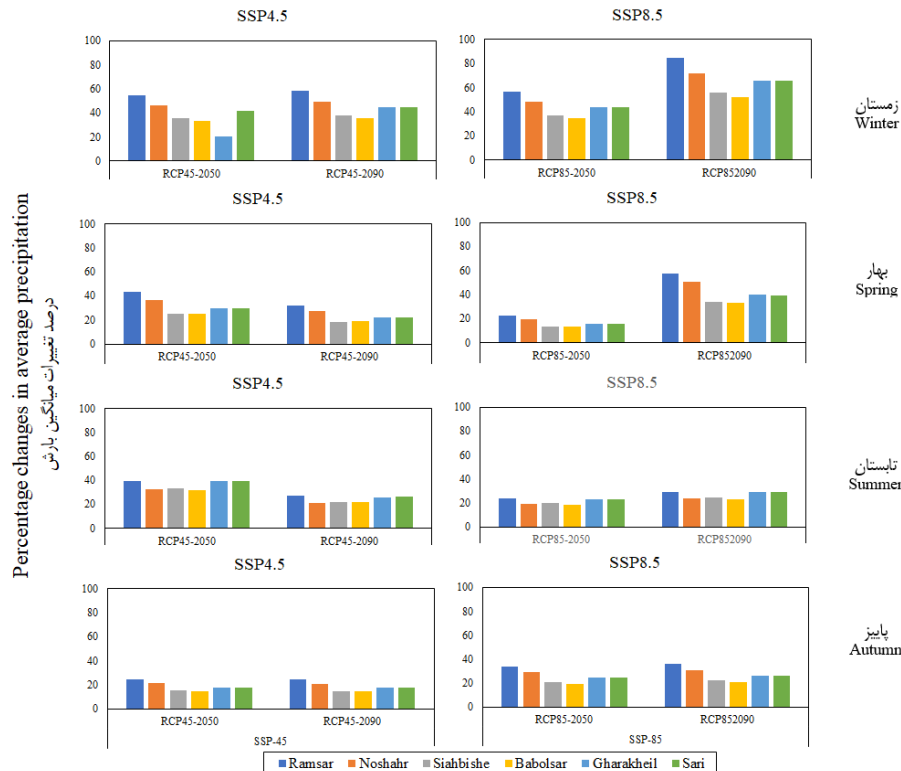


شکل ۸- توزیع مکانی تغییرات در بارش میانگین سالانه (mm) برای افق (۲۰۴۰-۲۰۶۰) و (۲۰۸۰-۲۱۰۰)، تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 با توجه به دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) با استفاده از میانگین پنج مدل GCM مورد بررسی
Figure 8. Spatial distribution of changes in mean annual precipitation (mm) for the 2050 (2040-2060) and 2090 (2080-2100) horizons, under the SSP2.6, SSP4.5, and SSP8.5 scenarios with respect to the base period (1999-2018) using the average of the five GCM models examined

نتیجه گیری

در ادامه تحقیق، Tmax، Tmin و بارش آینده در ایستگاه‌های مورد مطالعه در استان مازندران طی دو دوره از پنج مدل GCM فاز CMIP6 تحت سناریوهای انتشار مختلف تولید گردید یافت. نتایج کالیبراسیون و اعتبارسنجی نشان داد که مدل LARS-WG قادر است حداکثر و حداقل دمای مشاهده شده را با قابلیت بالایی تولید کند. در مقابل، توانایی مدل برای بازتولید داده‌های بارش مشاهده شده کمتر از دما بود که این موضوع به‌ویژه در ماه‌های پر بارش واضح‌تر مشاهده گردید.

در این مطالعه، بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی استان مازندران، نشان دهنده وجود روندهای افزایش برای دمای حداقل و حداکثر و روند کاهشی برای بارش در دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) می‌باشد. همچنین، بررسی وضعیت خشک‌سالی در دوره پایه نشان داد که دوره‌های با بارندگی نزدیک به نرمال بازه‌های طولانی‌تری را به خود اختصاص می‌دهند و در این میان ایستگاه‌های ساری و قراخیل نسبت به ایستگاه‌های غرب استان خشکی بیشتری را گزارش می‌دهند.



شکل ۹- درصد تغییرات فصلی بارش میانگین برای افق (۲۰۶۰-۲۰۴۰) و (۲۱۰۰-۲۰۸۰)، تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 با توجه به دوره پایه (۱۹۹۹-۲۰۱۸) با استفاده از میانگین پنج مدل GCM مورد بررسی

Figure 9. The percentage of seasonal changes of average precipitation for the horizon of 2050 (2040-2060) and 2090 (2100-2080), under the SSP4.5, and SSP8.5 scenarios according to the base period (1999-2018) using the average of the five GCM models examined

زیست و یکم در استان می‌باشد. این امر می‌تواند موجب بروز سیلاب‌های فصلی در حوضه‌ها مختلف گردد که نیاز به انجام مطالعات سیلاب منطقه ضروری به‌نظر می‌رسد. البته تفاوت‌ها در پیش‌بینی‌های GCM نشان می‌دهد که بارش آینده در مقایسه با دمای منطقه کمی نامشخص‌تر است. با توجه عدم قطعیت‌های اثبات شده هم در GCM‌ها و هم SSP‌ها استفاده ترکیبی از آن‌ها در مدل‌سازی بارش آینده می‌تواند منجر به عدم قطعیت‌های به‌نسبت بزرگتر شود. بنابراین، باید در تحقیقات آبی در سطح استان تأثیر هیدرولوژیکی تغییرات اقلیمی بر روی حوضه‌های واقع در استان مدنظر قرار گیرد.

تغییرات روند Tmax و Tmin آینده در منطقه مورد مطالعه ثابت بود و هر پنج GCM تحت سه SSP تغییرات مثبتی را پیش‌بینی کردند که در طول زمان افزایش می‌یابد. البته قابل ذکر است که تفاوت‌هایی بین GCM‌ها و همچنین بین پیش‌بینی‌های سناریوی انتشار در طول دو دوره آینده وجود دارد و این تغییرات نشان‌دهنده عدم قطعیت استفاده از GCM و SSP برای پیش‌بینی دمای آینده است. اما با این حال، روندهای گرمایشی قابل توجهی در این استان انتظار می‌رود.

میانگین مجموعه پنج GCM برای سناریوهای انتشار پیش‌بینی شده بارش بیانگر آینده مرطوب‌تری برای قرن

References

- Allen, M. R., Babiker, M., Chen, Y., de Coninck, H., Connors, S., van Diemen, R., & Zickfeld, K. (2018). Summary for policymakers. In *Global Warming of 1.5: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC.
- Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., Saeed, S., Ismail, M., Ehsan, M. A., & Barlow, M. (2021). Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs. *Earth Systems and Environment*, 5(1), 1-24. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00199-5>
- Almedeij, J. (2014). Drought analysis for Kuwait using standardized precipitation index. *The Scientific World Journal*, 2014, 451841. DOI: 10.1155/2014/451841
- Avand, M., Moradi H. R., & Ramazanzadeh Lasboeye, M. (2021). Spatial prediction of future flood risk: an approach to the effects of climate change. *Geosciences*, 11(1), 25. DOI: 10.3390/geosciences11010025
- Bi, D., Dix, M., Marsland, S., & Puri, K. (2012). The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation. *Australian Meteorological and Oceanographic*, 63, 41–64.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., & Sutera, A. (2003) Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resource Management*, 17, 273–296. DOI: 10.1023/A:1024716530289
- Cao, J., Wang, B., Yang, Y. M., ... & Wu, L. (2018). The NUIST Earth System Model (NESM) version 3: description and preliminary evaluation. *Geoscientific Model Development*, 11, 2975–2993. DOI: 10.5194/gmd-11-2975-2018
- Cea, L., & Costabile, P. (2022). Flood Risk in Urban Areas: Modelling, Management and Adaptation to Climate Change. A Review. *Hydrology*, 9(3), 50. DOI: 10.3390/hydrology9030050
- Cook, B. I., Mankin, J. S., Marvel, K., Williams, A. P., Smerdon, J. E., & Anchukaitis, K. J. (2020). Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 8(6), <https://doi.org/e2019EF001461>
- Del-Toro-Guerrero, F. J., & Kretzschmar, T. (2020). Precipitation-temperature variability and drought episodes in northwest Baja California, México. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 27, 100653. DOI: 10.1016/j.ejrh.2019.100653
- Diallo, I., Xue, Y., Li, Q., DeSales, F., & Li, W. (2019). Dynamical downscaling the impact of spring Western US land surface temperature on the 2015 flood extremes at the Southern Great Plains: effect of domain choice, dynamic cores and land surface parameterization. *Climate Dynamics*, 53(1), 1039-1061. DOI: 10.1007/s00382-019-04630-6
- Dosio, A., Jury, M. W., Almazroui, M., Ashfaq, M., Diallo, I., Engelbrecht, F. A., ..., & Tamoffo, A.T. (2021). Projected future daily characteristics of African precipitation based on global (CMIP5, CMIP6) and regional (CORDEX, CORDEX-CORE) climate models. *Climate Dynamics*, 57(11), 3135-3158. DOI: 10.1007/s00382-021-05859-w.
- Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., & Disse, M. (2016). Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of the Total Environment*, 573, 1536-1553. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.213
- Easterling, D. R., Kunkel, K. E., Wehner M. F., & Sun, L. (2016). Detection and attribution of climate extremes in the observed record. *Weather and Climate Extremes*, 11, 17-27. DOI: 10.1016/j.wace.2016.01.001.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958.
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 27(12), 1547-1578.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008) Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63, 90–104.
- Greenwood, J. A., & Durand, D. (1960). Aids for fitting the gamma distribution by maximum likelihood. *Technometrics*, 2(1), 55-65.
- Gumus, V., & Algin, H. M. (2017) Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan–Ceyhan River basins. *Turkey Meteorological Applications*, 24, 62–73.
- Habibullah, M. S., Din, B. H., Tan, S. H., & Zahid, H. (2022). Impact of climate change on biodiversity loss: global evidence. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(1), 1073-1086. DOI: 10.1007/s11356-021-15702-8.
- Huang, Y. F., Ang, J. T., Tiong, Y. J., Mirzaei, M., & Amin, M. Z. M. (2016). Drought forecasting using SPI and EDI under RCP-8.5 climate change scenarios for Langat River Basin, Malaysia. *Procedia Engineering*, 154, 710-717. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.573

- Jahangir, M. H., Jahanpanah, M., Abolghasemi, M. (2020). Drought forecasting for future periods using LARS-WG model (Case study: Shiraz Station). *Environmental and Water Engineering*, 6(1), 69–82 (In Persian). DOI: 10.1016/10.22059/JTCP.2021.332432.670263
- Kavwenje, S., Zhao, L., Chen, L., & Chaima, E. (2022). Projected temperature and precipitation changes using the LARS-WG statistical downscaling model in the Shire River Basin, Malawi. *International Journal of Climatology*, 42(1), 400-415.
- Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods. Charles Griffin, London, England.
- Kousari, M. R., Ahani, H., & Hendi-zadeh, R. (2013). Temporal and spatial trend detection of maximum air temperature in Iran during 1960–2005. *Global and planetary change*, 111, 97-110. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.08.011.
- Li, Y., Lu, H., Yang, K., Wang, W., Tang, Q., Khem, S., & Huang, Y. (2021). Meteorological and hydrological droughts in Mekong River Basin and surrounding areas under climate change. *Journal of Hydrology. Regional Studies*, 36, 100873. DOI: 10.1016/j.ejrh.2021.100873
- Malhi, G. S., Kaur, M., & Kaushik, P. (2021). Impact of climate change on agriculture and its mitigation strategies: A review. *Sustainability*, 13(3), 1318. DOI: 10.3390/su13031318.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- McKee, T. B., N. J. Doesken., & J. Kleist. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 17(22), 179-183, Anaheim, California.
- Naderi, M. (2020). Extreme climate events under global warming in northern Fars Province, southern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3-4), 1221-1243. DOI: 10.1007/s00704-020-03362-6
- Nadi, M., & M. Dastigerdi. (2022). Preparation of Mazandaran climate map by extended De Martonne climate classification method. In National Conference on Environmental Change using Remote Sensing Technology and GIS, Sari, Iran (In Persian).
- Nadi, M., & Shiukhy Soqanloo, S. (2020). Comparison of SPI and SPImod in Drought Monitoring of Several Climatic Samples of Iran. *Journal of Watershed Management Research*, 11(21), 108-118 (In Persian). DOI: 10.52547/jwmr.11.21.108
- Nguvava, M., Abiodun, B. J., & Otieno, F. (2019). Projecting drought characteristics over East African basins at specific global warming levels. *Atmospheric Research*, 228, 41-54. DOI: 10.1016/j.atmosres.2019.05.008
- O'Neill, B. C., Krieglner, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004
- Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., & Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15), 6713-6735. DOI: 10.1002/joc.7221.
- Osman, Y., Abdellatif, M., Al-Ansari, N., Knutsson, S., & Jawad, S. (2017). Climate change and future precipitation in an arid environment of the Middle East: Case study of Iraq. *Journal of Environmental Hydrology*, 25(3).
- Ozdemir, D. (2022). The impact of climate change on agricultural productivity in Asian countries: a heterogeneous panel data approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-13. DOI: 10.21203/rs.3.rs-264686/v1
- Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57(1-2), 27-41.
- Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran. *Water resources management*, 23(3), 439-455. DOI: 10.1007/s11269-008-9282-4
- Raziei, T., Bordi, I., Pereira, L. S. (2013). Regional drought modes in Iran using the SPI: the effect of time scale and spatial resolution. *Water Resour Manag* 27, 1661–1674. DOI: 10.1007/s11269-012-0120-3
- Roshani, A., & Hamidi, M. (2022). Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781-795 (In Persian).
- Semenov, M. A., Barrow, E. M., & Lars-WG, A. (2002). A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User Man Herts UK.
- Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change*, 35(4), 397-414.
- Semenov, M. A., Pilkington-Bennett, S., & Calanca, P. (2013). Validation of ELPIS 1980-2010 baseline scenarios using the observed European Climate Assessment data set. *Climate Research*, 57(1), 1-9. DOI: 10.3354/cr01164
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389.

- 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(18), 10102. DOI: 10.3390/su131810102
- Sharma, M. A., & Singh, J. B. (2010). Use of probability distribution in rainfall analysis. *New York Science Journal*, 3(9), 40-49.
- Swart, N. C., Cole, J. N., Kharin, V. V., Lazare, M., Scinocca, J. F., Gillett, N. P., & Winter, B. (2019). The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), 4823-4873.
- Talchabhadel, R., & Karki, R. (2022). Anticipated Shifting of Thermal and Moisture Boundary Under Changing Climate Across Nepal. In Mountain Landscapes in Transition. *Springer, Cham*, 219-233. DOI: 10.1007/978-3-030-70238-06
- Tavosi, T., Shoja, F., Hossein Abady, N. (2023). Evaluation of the Future Changes of Climatic Aridity Indices in the Central Iran Watershed under Climate Change Scenarios. *Journal of Watershed Management Research*, 14(27), 86-102 (In Persian).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(4), 485-498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1
- Thom, H. C. (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86: 117-122.
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2004). Towards a drought watch system based on spatial SPI. *Water Resources Management*, 18, 1-12.
- Voldoire, A., Saint-Martin, D., Sénési, S., Decharme, B., Alias, A., Chevallier, M., & Waldman, R. (2019). Evaluation of CMIP6 deck experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7), 2177-2213. DOI: 10.1029/2019MS001683
- Wilhite, D. A., Svoboda, M. D., & Hayes, M. J. (2007). Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water resources management*, 21(5), 763-774.
- Xin, X., Wu, T., Zhang, J., Yao, J., & Fang, Y. (2020). Comparison of CMIP6 and CMIP5 simulations of precipitation in China and the East Asian summer monsoon. *International Journal of Climatology*, 40(15), 6423-6440. DOI: 10.1002/joc.6590
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., & Ishii, M. (2019). The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Ser. II. DOI: 10.2151/jmsj.2019-051
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105369
- Yokoyama, C., Takayabu, Y. N., Arakawa, O., & Ose., T. (2019). A study on future projections of precipitation characteristics around Japan in early summer combining GPM DPR observation and CMIP5 large-scale environments. *Journal of Climate*, 32(16), 5251-5274. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0656.1
- Zamani, Y., Hashemi Monfared, S. A., & Hamidianpour, M. (2020). A comparison of CMIP6 and CMIP5 projections for precipitation to observational data: the case of Northeastern Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3), 1613-1623. DOI: 10.1007/s00704-020-03406-x
- Zabardast Rostami, H. A., Raeini Sarjaz, M., & Gholami Sefidkouhi, M. A. (2021). Assessment of Climate Change Effects on River Flow of Gelevard Dam Basin. *Journal of Watershed Management Research*, 12(24), 205-216 (In Persian).