

Research Paper

Investigation of Precipitation-Based Indices in the Mazandaran Region Under Climate Scenarios of the Sixth Report

Reza Norooz-Valashedi¹ , Sedigheh Bararkhanpour Ahmadi², Hadigheh Bahrami Pichaghchi³, Sara Mazloom Babanari⁴, Fateme Vatanparast⁵ and Fateme Esfandiar⁶

1-Assistant Professor of Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, (corresponding author: r.norooz@sanru.ac.ir)

2-3 & 4- Ph.D. Student of Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

5- M. Sc Student of Agrometeorology, Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

6- Bachelor's Student of Water Engineering Department of Water Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

Received: 30 March, 2023

Accepted: 16 October, 2023

Extended Abstract

Background: One of the important effects of global warming is the increase in extreme atmospheric phenomena, the most important of which are sudden changes in temperature, excessive heat, abnormal cold, heavy rains and floods, drought, and dust caused by the drying up of wetlands. Changes in climatic components due to climate change have impacted the intensity and frequency of extreme rainfall events and, subsequently affecting society and the natural environment. Therefore, examining the future modifications of different precipitation indices is more necessary to implement management plans, especially for Iran, which needs progress in climate modeling studies aiming at improving knowledge about climate change and its effects on the whole country. In this study, changes in the trend and breaking point of rainfall-based indices were studied using the CMIP6 series model under three optimistic, medium, and pessimistic scenarios in Mazandaran province for two periods: the near future (2021-2060) and the far future (2061-2100).

Methods: In this research, the spatiotemporal trend and breaking point of the precipitation in Mazandaran province (15 stations) were investigated in the future period from the precipitation data of SSP scenarios (126, 245, and 585) in the two 2021-2060 and 2061-2100 periods. Using the R-Climdex software in the R software environment, the precipitation limit indices were determined for different scenarios and periods. Then, the trend and breaking point were examined using the Mann-Kendall, Sen, and Pettitt tests. Precipitation indexes were defined by an expert group under the supervision of the World Meteorological Organization as limit indexes and climate change indexes. After receiving the output of models and their micro scaling, data were grouped in the future period based on three scenarios in all studied stations. The daily rainfall indexes were extracted using R programming developed by Zhang and Yang at the Canadian Meteorological Service Climatic Research Branch. Therefore, 11 and 16 indices out of 27 existing indexes were related to precipitation and temperature, respectively.

Results: Under the optimistic scenario (SSP126), the indexes of the number of consecutive wet days, days with heavy rain, and very wet days in the eastern half of the province will increase significantly. Based on the pessimistic scenario (SSP585), the profile of wet days and the annual amount of rainfall will decrease in different areas of the province. In terms of the occurrence of the breaking point, the daily intensity of precipitation and wet days will have a breaking point in the order of increasing in the 2060s, rising in 2061, and decreasing in 2051 in the eastern half of the region only in the pessimistic scenario of the profile of consecutive wet days. Under the other scenarios, however, no sudden changes will be observed in the data series. According to the median scenario, there will be no changes in precipitation indexes regionally, and only the daily intensity index of precipitation will increase in a limited number of coastal stations in the near future. Under a pessimistic scenario, however, changes in limit indexes will often be reduced so that the index of the number of wet days (with 1 mm rainfall) will decrease in the near future in most parts of the province with high intensity. The annual amount of rainfall on wet days in coastal and western regions, as well as two indexes of the number of days with heavy and very heavy rain, will decrease in the high stations of the western areas. However, the risk of flooding events may be reduced in the near future, and the probability of widespread droughts increases due to



the reduction of wetness profiles in pessimistic conditions. In the distant future, precipitation indexes will not change significantly, and only the number of days with heavy rainfall will decrease in the high areas of the eastern province. In terms of sudden changes, there will be no sudden change or significant breaking points in the data series of all the precipitation indexes until 2100 by moving toward an optimistic and median scenario. Moving toward a pessimistic scenario, there will be an incremental change point for indexing the number of consecutive days at a few provincial stations for the 2070-2060s. The daily intensity of precipitation and the number of wet days (with 1 mm precipitation) will also experience a sudden incremental change in 2061 and a decrease in 2051 in the eastern half of the province, indicating a sudden increase in the intensity of downpours and a reduction of the number of days with low rainfall.

Conclusion: According to the results, it can be concluded that the study of the occurrence of severe meteorological events, including rainfall, as one of the main issues in the field of water resources, agriculture, and natural hazards in Mazandaran province, is necessary for long-term planning in various fields. Knowledge of the future perspective of extreme rainfall events can be used in soil, water, and agriculture management planning, especially in the economic development plans of the province.

Keywords: Climate Change, Extreme Precipitation Indices, Spatial-Temporal Trend, Mazandaran

How to Cite This Article: Norooz-Valashedi, R., Bararkhanpour Ahmadi, S., Bahrami Pichaghchi, H., Mazloom babanari, S., Vatanparast, F., & Esfandiar, F. (2024). Investigation of Precipitation-Based Indices in the Mazandaran Region Under Climate Scenarios of the Sixth Report. *J Watershed Manage Res*, 15(1), 131-146. DOI: [10.61186/jwmr.15.1.131](https://doi.org/10.61186/jwmr.15.1.131)

مقاله پژوهشی

بررسی نمایه‌های مبتنی بر بارش در پهنه مازندران تحت سناریوهای اقلیمی گزارش ششم

رضا نوروز ولاشیدی^۱، صدیقه برارخان‌پور احمدی^۲، حدیقه بهرامی پیچاقچی^۳، سارا مظلوم باباناری^۴،
فاطمه وطن‌پرست^۵ و فاطمه اسفندیار^۶

۱- استادیار هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران، (نویسنده مسوول: r.norooz@sanru.ac.ir)
۲- دانشجوی دکتری هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد هوشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۴- دانشجوی کارشناسی مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۴
صفحه: ۱۳۱ تا ۱۴۶

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: یکی از اثرات مهم گرمایش جهانی افزایش پدیده‌های حدی هوشناختی است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تغییر ناگهانی دما، گرمای بیش از حد، سرمای غیرعادی، بارش‌های سنگین و سیل‌آسا، خشکسالی و گرد و غبار ناشی از خشک شدن تالاب‌ها اشاره نمود. تغییر در مولفه‌های اقلیمی در اثر تغییر اقلیم بر روی شدت و فراوانی وقایع حدی بارش و نیز به متعاقب آن بر جامعه و محیط زیست طبیعی تأثیرگذار بوده است؛ بنابراین بررسی تغییرات آینده نمایه‌های مختلف بارش جهت اعمال برنامه‌های مدیریتی بیش از پیش ضرورت دارد به ویژه برای ایران که نیاز به پیشرفت در مطالعات مدل‌سازی آب و هوا با هدف بهبود دانش در مورد تغییرات آب و هوا و تأثیرات آن در کل کشور دارد. در این پژوهش تغییرات روند و نقطه شکست نمایه‌های مبتنی بر بارش با استفاده از مدل سری CMIP6 تحت سه سناریوی خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه در استان مازندران برای دو دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) مورد مطالعه قرار گرفت.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش، برای بررسی مکانی-زمانی روند و نقطه شکست بارش استان مازندران (۱۵ ایستگاه) در دوره‌ی آینده، از داده‌های بارش سناریوهای (SSP126, SSP245, SSP585) در دو دوره‌ی ۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ استفاده شد. با استفاده از نرم‌افزار R-Climdex در محیط نرم‌افزار R، نمایه‌های حدی بارش برای سناریوها و دوره‌های مختلف تعیین شد و سپس برای بررسی روند و نقطه شکست، از آزمون‌های من‌کندل، سن و پتیت استفاده شد. نمایه‌های بارش توسط یک گروه کارشناسی زیر نظر سازمان جهانی هوشناسی به‌عنوان نمایه‌های حدی و نمایه‌های تغییرات آب و هوایی تعریف شده است. لذا در این پژوهش پس از دریافت خروجی مدل‌ها و ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها، داده‌ها در دوره آینده و بر اساس سه سناریوی مورد نظر در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه گروه‌بندی شد. برای استخراج نمایه‌های بارش روزانه با برنامه‌نویسی تحت R و به کمک بسته ارائه شده توسط زانگ و یانگ در شعبه تحقیقات اقلیمی سرویس هوشناسی کانادا توسعه یافت، استفاده شد. لذا از بین ۲۷ نمایه موجود، ۱۱ نمایه مربوط به بارش و ۱۶ نمایه مربوط به دما بوده است.

یافته‌ها: نتایج حاکی از آن است که در آینده‌ی نزدیک تحت سناریو خوش‌بینانه (SSP126)، نمایه تعداد روزهای تر متوالی، روزهای بارش سنگین و روزهای خیلی مرطوب در نیمه شرقی استان به‌صورت معنی‌دار افزایش اما بر اساس سناریوی بدبینانه (SSP585) نمایه روزهای مرطوب و مقدار سالانه بارندگی در نواحی مختلف استان کاهش خواهد یافت. از نظر وقوع نقطه شکست، تنها در سناریوی بدبینانه نمایه روزهای تر متوالی، شدت روزانه بارش و روزهای مرطوب دارای نقطه شکست به ترتیب افزایشی در دهه ۲۰۶۰، افزایشی در سال ۲۰۶۱ و کاهش در سال ۲۰۵۱ نواحی در نیمه شرقی خواهد بود. در حالی که تحت سناریوهای دیگر هیچ تغییر ناگهانی در سری داده‌ها مشاهده نخواهد شد. بر اساس سناریوی میانه، تغییرات چندانی در نمایه‌های بارش به‌صورت منطقه‌ای رخ نخواهد داد و تنها نمایه شدت روزانه بارش در تعداد محدودی از ایستگاه‌های ساحلی در آینده‌ی نزدیک افزایش خواهد یافت. با این حال تحت سناریوی بدبینانه، تغییرات نمایه‌های حدی در اغلب مواقع کاهش خواهد بود؛ به طوری که در آینده‌ی نزدیک، نمایه تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی‌متر) در اغلب مناطق استان با شدت بالایی کاهش خواهد یافت. همچنین مقدار سالانه بارندگی در روزهای مرطوب در نواحی ساحلی و غربی، و نیز دو نمایه تعداد روزهای بارش سنگین و خیلی سنگین در ایستگاه‌های مرتفع نواحی غربی کاهش خواهد یافت؛ بنابراین اگرچه ممکن است در آینده‌ی نزدیک احتمال خطر رخداد وقایع سیلابی کاهش یابد، اما با توجه به کاهش نمایه‌های رطوبتی در حالت بدبینانه، احتمال وقوع خشکسالی‌های گسترده افزایش می‌یابد. در آینده دور، نمایه‌های بارشی تغییرات معنی‌داری نخواهند داشت و تنها تعداد روزهای بارش سنگین در نواحی مرتفع شرق استان کاهش خواهد یافت. از نظر وقوع تغییرات ناگهانی نیز می‌توان بیان کرد با حرکت به سمت سناریوی خوش‌بینانه و میانه، تغییر ناگهانی یا نقطه شکست معنی‌داری در سری داده‌های هیچ‌یک از نمایه‌های بارش تا سال ۲۱۰۰ رخ نخواهد داد. اما با حرکت به سمت سناریوی بدبینانه، نقطه تغییر افزایشی برای نمایه تعداد روزهای تر متوالی در تعدادی از ایستگاه‌های استان برای دهه ۲۰۷۰-۲۰۶۰ وجود خواهد داشت. همچنین نمایه‌های شدت روزانه بارش و تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی‌متر) به ترتیب یک تغییر ناگهانی افزایشی در سال ۲۰۶۱ و کاهش در سال ۲۰۵۱ را در نواحی نیمه شرقی استان تجربه خواهند نمود که بیانگر افزایش ناگهانی در شدت بارش‌های نزولی و کاهش وقوع تعداد روزهای بارندگی کم است.

نتیجه‌گیری: به‌طور کلی با قرار گرفتن در مسیر سناریو خوش‌بینانه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، می‌توان شاهد افزایش رخدادهای بارشی و افزایش نمایه‌های رطوبتی به خصوص در نیمه شرقی استان بود حال آنکه با ادامه مسیر کنونی و چه بسا حالت بدبینانه (افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای)، در آینده‌ی نه چندان دور می‌توان شاهد کاهش در مقدار و فراوانی بارندگی بود که متعاقب آن، با کاهش منابع آبی در استان و افزایش وقوع خشکسالی‌های خفیف تا گسترده مواجه خواهیم شد. بنابراین تدوین برنامه‌ریزی‌های مناسب در زمینه مدیریت خاک، آب و کشاورزی در سطح استان توصیه می‌شود.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، روند مکانی-زمانی، مازندران، نمایه‌های حدی بارش

مقدمه

و یا ویژگی‌های قابل تغییر آن به مدت چندین دهه و یا بیشتر دچار تغییر می‌شود (Field et al., 2015). یکی از اثرات مهم گرمایش جهانی افزایش پدیده‌های حدی جوی است که از مهمترین آن‌ها می‌توان به تغییر ناگهانی دما، گرمای بیش از حد، سرمای غیرعادی، بارش‌های سنگین و سیل‌آسا، خشکسالی و گرد و غبار ناشی از خشک شدن تالاب‌ها اشاره نمود (Fan & Xiong, 2015; Seneviratne et al., 2014). طبق تعریف

تغییر اقلیم انسان‌ساخت در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای بر الگوهای آب و هوا و چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارد و می‌تواند فراوانی یا شدت رویدادهای فرین آب و هوایی مانند سیل، امواج گرما و خشکسالی را افزایش دهد (Philip et al., 2018). هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، گرمایش جهانی را به عنوان تغییر در وضعیت اقلیم تعریف می‌کند که در آن میانگین

بالاتر، طیف گسترده‌ای از سناریوها، حساسیت آب و هوایی بیشتر و پیچیدگی فیزیکی بالاتر (به عنوان مثال، بیورئوشیمی^۱) نسبت به نسخه‌های قبلی CMIP هستند (Bock et al., 2020).

بررسی تغییرات متغیرهای اقلیمی مختلف در طول یک دوره‌ی زمانی از طریق بررسی روند انجام می‌شود که عموماً به بررسی تغییرات در میانگین سری زمانی داده‌ها تمرکز می‌کند. تحلیل روند از جمله مهم‌ترین روش‌های آماری است که به‌طور گسترده برای ارزیابی اثرات بالقوه تغییر اقلیم و سایر عوامل در نقاط مختلف جهان استفاده شده است (Xue & Gui, 2015). به‌منظور بررسی روند پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی از روش‌های پارامتری و ناپارامتری استفاده می‌شود. از مزیت‌های روش ناپارامتری نسبت به روش‌های پارامتری، عدم نیاز به پیروی داده‌های مورد بررسی از یک توزیع خاص و همچنین داشتن حساسیت کم به مقادیر حدی در سری زمانی مورد مطالعه هستند (soheili et al., 2019; Ghorbani et al., 2020) که بیشتر مورد توجه محققان قرار می‌گیرند. روند تغییرات در سری زمانی داده به دو صورت تدریجی و یا سریع (نقطه‌ای) اتفاق می‌افتد. روند سریع یا نقطه‌ای در طول یک سری زمانی بصورت شکست یا افزایش ناگهانی دیده می‌شود که عمدتاً در اثر اتفاقات و اقدامات خاص در منطقه‌ی مورد نظر رخ می‌دهد ولی روند تدریجی حاصل تغییرات جزئی در کل طول دوره آماری است (Kanani et al., 2019). یکی از روش‌های آماری پرکاربرد در زمینه تشخیص روند آزمون ناپارامتری من-کندال است که برای تعیین روند تدریجی به‌کار می‌رود. این آزمون توسط من (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) توسعه یافت که بر پایه مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی است. بررسی نتایج آزمون ناپارامتری من کندال به تنهایی نمی‌تواند تحلیل درستی از نتایج بررسی روند را به دست دهد؛ زیرا در صورت وجود تغییرات ناگهانی (نقاط شکست) در سری داده‌ها باعث می‌شود پارامترهای آماری میانگین و واریانس در سری‌های قبل از وقوع نقطه شکست و سری‌های بعد از آن دارای تفاوت معنی‌داری نسبت به هم باشند که عدم بررسی این تغییرات منجر به عدم تفسیر صحیح در تحلیل و بررسی روند سری زمانی داده‌ها می‌شود (Ghorbani et al., 2020). آزمون ناپارامتری پتیت یکی از روش‌های آماری در زمینه بررسی نقطه شکست است که یکی از روش‌های متداول برای تعیین روند سریع و تشخیص نقاط تغییر در سری‌های زمانی است که توسط پتیت (۱۹۷۹) ارائه شد و به دلیل قابلیت در زمان وقوع تغییرات ناگهانی در سری زمانی داده‌ها مورد استقبال قرار گرفته است (Faghani et al., 2016; Sharifi et al., 2020). تاکنون پژوهش‌های مختلفی به‌منظور بررسی روند تغییرات نمایه‌های حدی طی دوره آتی توسط مدل‌های GCM انجام شده است؛ راثو و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی تغییرات آتی فرین‌های بارشی طی دوره موسمی در شمال شرقی هند بر اساس پروژه GDDP-NEX پرداخته و بیان داشتند که شدت و فراوانی فرین‌های بارشی در بیشتر مناطق شبه‌جزیره جنوبی هند در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در طول فصل موسمی افزایش می‌یابد.

سازمان هواشناسی جهانی، نمایه‌های حدی اقلیمی شامل رخداد متغیرهای اقلیمی و آب و هوایی فراتر (یا فروتر) از یک حد آستانه در منطقه‌ای مشخص است (IPCC, 2013). رویدادهای بارش شدید می‌تواند منجر به سیل شود که اغلب منجر به آسیب زیرساخت‌ها و تلفات انسانی و همچنین تأثیرات بر اکوسیستم‌های طبیعی، فعالیت‌های کشاورزی، منابع آب و تولید برق آبی می‌شود (Smith & Matthews, 2015). طی سالیان اخیر بسیاری از مناطق جهان شاهد وقوع رخداد‌های حدی مانند رخداد دمای بسیار پایین در زمستان ۲۰۱۰-۲۰۰۹ در قسمت‌های اعظم نیمکره شمالی شامل اروپا، آسیا و آمریکای شمالی، وقوع مخرب‌ترین سیل پاکستان در تابستان ۲۰۱۰ و ایران در بهار سال ۱۳۹۸ بوده‌اند (WMO, 2011؛ Masoodian, 2022). در چنین شرایطی، توسعه اقتصادی و شرایط زندگی پایدار در سال‌های آتی، بستگی به توانایی ما در مدیریت ریسک‌های مرتبط با رویدادهای حدی دارد (Stocker et al., 2013). بنابراین نمایه‌های حدی اقلیمی نه تنها نقش مهمی در تجزیه و تحلیل وقایع اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی دارند، بلکه به مدلسازی اقلیمی و تصمیم‌گیران در ارزیابی اثرات بخش‌های متنوع نیز کمک نماید (Mistry, 2019).

در این راستا جهت بررسی و تحلیل مقادیر حدی اقلیمی بارش می‌توان از مجموعه نمایه‌های حدی که توسط شبکه پشتیبانی اقلیم اروپا (شامل ۱۱ نمایه حدی بارش) معرفی شده استفاده نمود؛ این نمایه‌ها در سال ۱۹۹۹ توسط کمیسیون اقلیم شناسی سازمان جهانی هواشناسی و برنامه پژوهش‌های اقلیم جهانی (WCRP)^۲ وابسته به طرح پیش‌بینی‌پذیری و تغییرپذیری اقلیم^۳ (CLIVAR) متشکل از یک تیم کارشناسی در زمینه آشکارسازی و پایش تغییر اقلیم و نمایه‌های آن‌ها (ETCCDMI)^۴ جهت بررسی و تعیین نمایه‌های حدی اقلیمی تعیین و معرفی شدند (Kar et al., 1999). بررسی چنین رویدادهایی برای توسعه راهبردهای سازگاری آینده مهم است (Ren et al., 2011; Wang et al., 2012). در این راستا، یکی از احتمالات برای نزدیک شدن و درک چگونگی رفتار رویدادهای بارش حدی در آب و هوای آینده، استفاده از شبیه‌سازی‌ها و پیش‌بینی‌های آب و هوایی گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP)^۵ است که منابع اصلی مورد استفاده در گزارش‌های ارزیابی IPCC هستند. سه نسل مدل CMIP شامل CMIP3 (Meehl et al., 2007)، CMIP5 (Taylor et al., 2012) و CMIP6 (Eyring et al., 2016) در حال حاضر در دسترس هستند، این مدل‌ها دائماً به‌روزرسانی می‌شوند تا به‌طور سیستماتیک درک ما از سیستم کامل زمین را در نسل‌های CMIP پیش ببرند. به عنوان مثال، در مقایسه با CMIP3، CMIP5 شامل چرخه‌های کربن تعاملی اقیانوس و زمین^۶، مدل‌سازی جامع‌تر اثر غیرمستقیم ذرات معلق در هوا و استفاده از آواشت آتشفشانی و خورشیدی در حال تکامل در اکثر مدل‌ها است (Knutti & Sedláček, 2013; Taylor et al., 2012). برای CMIP6، بهبودهایی عمده‌تر برای روش‌های اولیه سازی و تولید مجموعه انتظار می‌رود (Eyring et al., 2016) علاوه بر این، مدل‌های CMIP6 شامل وضوح مکانی

1- World Meteorological Organization

2- World Climate Research Program

3- Climate Variability and Predictability

4- Expert Team on Climatic Change Detection Monitoring and Indices

5- Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

6- Land Carbon Cycles

7- Biogeochemistry

همچنین حجازی زاده و همکاران (Hejazizadeh et al., 2023) چشم انداز تغییرات نمایه های حدی دما و بارش در استان کردستان را بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP) بررسی نموده و نتایج نشان داد که نمایه های فرین گرم دارای روندی مثبت و افزایشی هستند و بارش های فرین نیز در اغلب ایستگاه ها دارای روند منفی و کاهشی معنی دار است.

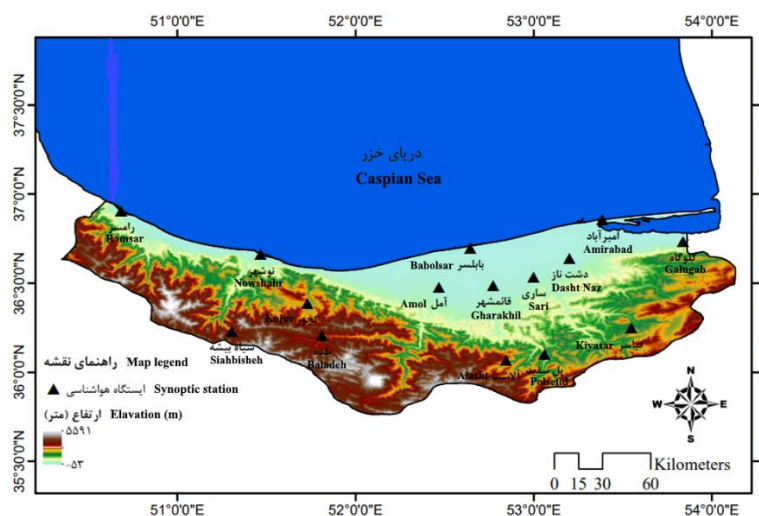
به این ترتیب، استفاده از شبیه سازی ها و پیش بینی های اقلیمی CMIP و نمایه های آب و هوایی حدی توصیه شده توسط ETCCDI یک ابزار عالی برای بررسی رویدادهای اقلیمی بارش حدی و تغییرات پیش بینی شده آن ها است. به ویژه برای ایران که نیاز به پیشرفت در مطالعات مدل سازی آب و هوا با هدف بهبود دانش در مورد تغییرات آب و هوا و تأثیرات آن در کل کشور دارد. این فقدان مطالعات حتی با دانستن اینکه ایران به شدت در برابر تغییرات آب و هوایی آسیب پذیر است، عمدتاً در منطقه بسیار مرطوب و نیمه مرطوب آن تأیید می شود. همچنین با توجه به مطالعات صورت گرفته بررسی نمایه های حدی برای آینده با استفاده مدل های گردش عمومی جو در استان مازندران بررسی نشده است در نتیجه هدف پژوهش حاضر بررسی تغییرات روند و نقطه شکست نمایه های مبتنی بر بارش با استفاده از مدل سری CMIP6 تحت سه سناریوی خوشبینانه، میانه و بدبینانه در استان مازندران برای دو دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

منطقه مطالعاتی در این پژوهش، پهنه ی استان مازندران است (شکل ۱). استان مازندران با مساحتی بالغ بر ۲۳۸۴۲ کیلومتر مربع در شمال کشور ایران و در محدوده ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۵۴ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی قرار دارد. این منطقه در شمال ایران و در ساحل دریای خزر واقع شده و در بین رشته کوه های البرز در شمال و کوه های تالش در غرب قرار گرفته است. بیشترین ارتفاع این محدوده ۵۶۷۰ متر و کمینه ارتفاع آن ۲۱- متر از سطح دریاهای آزاد است. آب و هوای استان مازندران به دلیل ویژگی های خاص جغرافیایی آن و فاصله کم بین مناطق کوهستانی و دریا، همراه با بارش های سالانه نسبتاً قابل توجه (۷۱۰ میلی متر در سال) و دمای معتدل (۱۷ درجه سلسیوس) در طول سال است. با حرکت از مناطق غربی به سمت مناطق شرقی استان، از مقدار بارش کاسته شده و بر میزان دمای هوا افزوده می شود.

وزنه و همکاران (Wazneh et al., 2020) از نمایه های حدی برای توصیف تغییرات اقلیم در سراسر جنوب کانادا استفاده کردند که بدین منظور برای پیش بینی این نمایه ها از CMIP5 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بهره گرفتند و گزارش کردند که این منطقه در آینده گرمایش شدیدتر و افزایش بیشتر در شدت بارش را تجربه خواهد کرد؛ به طوری که کل بارندگی سالانه حدود ۱۶ درصد و وقوع رویدادهای بارشی سنگین پنج روز افزایش می یابد. پوترا و همکاران (Putra et al., 2020) برای پیش بینی نمایه های اقلیمی از CMIP5 تحت دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 در اندونزی استفاده کردند، نتایج نشان داد که در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) بیشتر نمایه های اقلیمی در دوره های آینده (به جز نمایه CDD) به طور قابل توجهی افزایش خواهند یافت. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2021) شدت بارش را در چین توسط مدل های گردش عمومی (GCM) شبیه سازی نمودند؛ نتایج نشان داد که بیشترین تفاوت بین دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در مناطق نیمه خشک و نیمه مرطوب برای ناهنجاری های بارندگی تابستان است. همچنین روند افزایشی بارش های شدید در آینده به ویژه در مناطق مرطوب نسبتاً مشهود است که حاکی از خطر بالقوه افزایش سیل در این مناطق است. ربوینا و همکاران (Reboita et al., 2022) برای پیش بینی نمایه های اقلیمی از CMIP6 تحت دو سناریوی SSP245 و SSP585 در دشت شمال چین بهره گرفتند و گزارش کردند که هیچ تغییر قابل توجهی در نمایه های حدی بارش در چین وجود نداشت، اما تغییرات بارش حدی ناهمگنی مکانی قوی داشت؛ آن ها تغییرات آب و هوایی آمریکای جنوبی را از طریق نمایه های آب و هوایی پیش بینی شده توسط GCM ها تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 آشکار نمودند و گزارش کردند که برای هر دو فصل تابستان و زمستان استرالیا، فراوانی و شدت رویدادهای شدید بارندگی روزانه روند افزایشی داشته است و در آمازون در طول تابستان، تعداد روزهای خشک متوالی روند افزایشی و روزهای مرطوب متوالی روند کاهشی معنی دار داشته است. باباسمیل و همکاران (Babaousmail et al., 2022) تغییرات آبی در بارش میانگین و بارش شدید در مناطق مدیترانه و صحرا^۲ با استفاده از مدل های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کرده و گزارش نمودند که میانگین بارندگی در بیشتر بخش های منطقه مورد مطالعه تا پایان قرن بیست و یکم کاهش می یابد. تعداد روزهای خشک متوالی و روزهای خیلی مرطوب نیز به ترتیب روند افزایشی و کاهشی را نشان داده است. همچنین شدت روزانه بارش نسبت به نمایه های دیگر تحت سناریوی SSP5-8.5 بیشتر کاهش خواهد یافت.



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

تعیین شد سپس برای استخراج سری زمانی داده‌های تاریخی و سناریوی مورد استفاده برای هر نقطه‌ای ایستگاهی از روش درون‌یابی فضایی دوخطی bilinear در نرم افزار برنامه نویسی R استفاده شد. برای ارزیابی دقت شبیه‌سازی مدل‌های مورد مطالعه، مجموع بارش ماهانه هم برای مدل‌ها و هم برای داده‌های مشاهداتی با استفاده از داده‌های روزانه محاسبه شد. رابطه خطی بین مقادیر مدل و مشاهداتی و ضریب تعیین R^2 و نمایه‌های RMSE و NRMSE محاسبه شد و نتایج نشان داد که مدل MRI-ESM2-0 بیشترین دقت را در بین مدل‌های منتخب در بررسی داده‌های بارش آینده به همراه داشته است.

در تعریفی دیگر، ریزمقیاس‌نمای، راهی برای تولید داده‌های آب و هوایی با وضوح بالا از یک سری مدل‌های گردش عمومی جو با قدرت تفکیک پایین است و براساس اطلاعات به دست آمده از این روش می‌توان به توضیح شرایط آب و هوایی در مقیاس ایستگاهی و محلی پرداخت (Sobhani et al., 2017).

ریزمقیاس‌نمای آماری مدل‌های تغییر اقلیم

یکی از مشکلات بزرگ استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن نسبت به مکان و زمان منطقه مورد مطالعه است. در واقع از مدل‌های گردش عمومی جو نمی‌توان به‌صورت مستقیم برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی منطقه و یا نقطه‌ای مورد نظر استفاده کرد و نیاز به ریزمقیاس گردانی خروجی‌های این مدل‌ها است.

روش درون‌یابی دو خطی

درون‌یابی دو خطی با استفاده از درون‌یابی خطی ابتدا در یک جهت و سپس به کارگیری آن در جهت دیگر انجام می‌شود. در این روش از چهار پیکسل همسایه‌ی هر پیکسل استفاده شده و میان آن‌ها درون‌یابی برای یافتن پیکسل مورد نظر انجام می‌گردد. در این روش، ابتدا میان هر دو پیکسل مقابل یک درون‌یابی خطی انجام می‌شود، سپس با استفاده از پیکسل‌های همسایه، مقدار پیکسل مورد نظر محاسبه می‌شود. این الگوریتم برای کاهش مقیاس داده‌های شبکه‌ای است (Wang et al., 2017).

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های روزانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک استان مازندران برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب حاصل از سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) استفاده شد.

مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار

مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم^۱ (CMIP6)، جدیدترین گزارش انتشار یافته می‌باشند که به یک چارچوب اساسی برای اجرای شبیه‌سازی آب و هوایی تبدیل شده‌اند. تعداد لایه‌های عمودی در تمام مدل‌های CMIP6 نسبت به مدل‌های CMIP5 بهبود یافته که یکی از این مزایای آن، افزایش شبیه‌سازی دقیق‌تر در استراتوسفر است و همچنین تعداد سناریوهای آینده، بررسی شده و گسترش قابل‌توجهی یافته است. سناریوهای جدید اضافه شده CMIP6 از سناریو مسیریهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSP)^۲ شامل SSP1-1.9، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP4.3.4، SSP5-8.5 و SSP5-8.5 نیز به‌روز شده‌ی سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 موجود در CMIP5 است (Gupta et al., 2020). برونداد مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل داده‌های تاریخی^۳ و سناریو، از پایگاه داده‌ای ESGF^۴ قابل دریافت است. در این تحقیق، ابتدا برونداد مدل‌های اقلیمی CMIP6 از پایگاه داده استخراج و سپس اطلاعات منطقه مورد نظر استخراج شد. مدل‌های مورد استفاده از سری مدل‌های SSP است که داده‌های بارش آن‌ها در دسترس بوده و نیز در این تحقیق از سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 برای دو دوره‌ی آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده‌ی دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱) استفاده شد. بدین منظور، ابتدا داده‌ی تاریخی طی دوره پایه و داده‌های سناریو برای دوره‌ی آینده (تا سال ۲۱۰۰) مدل اقلیمی مورد مطالعه از پایگاه داده مربوطه برای کل جهان دریافت شد. سپس برای استخراج سری زمانی داده‌های حاصل از مدل MRI-ESM2-0، ابتدا برای هر شبکه در منطقه مورد نظر یک نقطه طبق ایستگاه‌های هواشناسی

پیش‌نگری رویدادهای حدی اقلیمی

R (یک زبان، محیط محاسبه و گرافیک آماری است) و بر اساس الگوریتم‌های بهبودیافته و کاهش خطای عددی طراحی کرده است (Zhang & Yang, 2004). به‌صورت مشترک به‌وسیله کمیسیون اقلیم‌شناسی، سازمان جهانی هواشناسی و برنامه جهانی دیدبانی داده‌ها، و تغییرپذیری و پیش‌بینی اقلیم (CLIVAR) حمایت می‌شود که از بین این ۲۷ نمایه، ۱۱ نمایه مربوط به بارش و ۱۶ نمایه مربوط به دما است (Sillmann & Roeckner, 2008).

در این پژوهش ۹ نمایه حدی بارش برای منطقه مورد مطالعه در مقیاس‌های سالانه محاسبه و وجود روند و نقطه شکست در این نمایه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نمایه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ آورده شده است.

نمایه‌های بارش که توسط گروه کارشناسی / JCOMM CLIVAR / CCI WMO به‌عنوان نمایه‌های حدی و نمایه‌های تغییرات آب و هوایی تعریف شده است، استفاده می‌شود. بنابراین پس از دریافت خروجی مدل‌ها و ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها، داده‌ها در دوره آینده و براساس سه سناریوی موردنظر در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه گروه‌بندی شد. برای استخراج نمایه‌های بارش روزانه از نرم‌افزار RclimDex استفاده شد. RclimDex به‌وسیله زانگ و یانگ در شعبه تحقیقات اقلیمی سرویس هواشناسی کانادا توسعه یافته است (Zhang & Yang, 2004). تیم کارشناسی آشکارسازی و نمایش تغییر اقلیم و نمایه‌ها (ETCCDI) بر اساس مجموع استاندارد ۲۷ نمایه حدی در زبان برنامه نویسی

جدول ۱- تعریف نمایه‌های حدی اقلیمی دما و بارش توصیه شده توسط گروه کارشناسی CLIVAR/CCI

واحد Unit	تعریف Definition	شرح نمایه Description Indicator	نمایه Indicator
روز Day	تعداد روزهایی با بارش روزانه بزرگتر یا مساوی ۱۰ میلی‌متر Number of days with daily precipitation greater than or equal to 10 mm	تعداد روزهای با بارش سنگین Number of days with heavy rain	R10mm
روز Day	تعداد روزهایی با بارش روزانه بزرگتر یا مساوی ۲۰ میلی‌متر Number of days with daily precipitation greater than or equal to 20 mm	تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین Number of days with very heavy rain	R20mm
روز Day	تعداد روزهایی با بارش روزانه ۱ میلی‌متر Number of days with a daily precipitation of 1 mm	تعداد روزهای مرطوب Number of wet days	R1mm
روز Day	تعداد ماکزیمم روزهای خشک متوالی با بارش کمتر از ۱ میلی‌متر Maximum number of consecutive dry days with less than 1 mm of precipitation	روزهای خشک متوالی Consecutive dry days	CDD
روز Day	تعداد ماکزیمم روزهای تر متوالی با بارش بزرگتر یا مساوی ۱ میلی‌متر Maximum number of consecutive wet days with greater than or equal to 1 mm precipitation	روزهای تر متوالی Wetter days in a row	CWD
میلی‌متر mm	جمع بارش روزانه بزرگتر از صدک ۹۵ Total daily precipitation is more than 95th percentile	روزهای خیلی مرطوب Very humid days	R95p
میلی‌متر mm	جمع بارش روزانه بزرگتر از صدک ۹۹ Total daily precipitation greater than 99th percentile	روزهای فوق‌العاده مرطوب Extremely humid days	R99p
میلی‌متر mm	مقدار کل بارش سالانه در روزهایی با بارش بزرگتر یا مساوی یک میلی‌متر The total amount of annual precipitation on days with precipitation greater than or equal to 1 mm	کل بارش روزهای مرطوب Total precipitation of wet days	PRCPTOT
میلی‌متر/روز mm/day	مقدار کل بارش سالانه تقسیم بر تعداد روزهای مرطوب در طول یکسال The total amount of annual precipitation divided by the number of wet days during a year	نمایه ساده شدت بارش A simple index of precipitation intensity	SDII

در صورت معنی‌دار شدن نقطه‌ی شکست در سری موردنظر، نسبت مقادیر میانگین اجزاء سری قبل و بعد از نقطه‌ی تغییر، برای تحلیل بزرگی شکست به کار گرفته می‌شود. برای سری‌های زمانی که نقطه‌ی شکست معنی‌دار را نشان نمی‌دهد، آزمون روند بر روی کل سری اعمال می‌شود (Salarijazi et al., 2012).

نتایج و بحث

پس از انجام کنترل کیفیت بر روی داده‌های روزانه بارش سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 در بین سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۶۰ (آینده نزدیک) و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ (آینده دور)، نمایه‌های حدی بارش برای سری زمانی بارش هر یک از سناریوها در هر یک از دوره‌ها با استفاده از نرم‌افزار RclimDex برآورد شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار XLSTAT، روند و نقطه شکست نمایه‌های بارش برای هر ایستگاه مورد مطالعه به دست آمد و نتایج هر نمایه به تفکیک هر یک از سناریوها و دوره‌ها برای پهنه استان مازندران نمایش داده شد.

آزمون تشخیص روند من‌کندال

آزمون من‌کندال یک آزمون ناپارامتری است که مبتنی بر مقایسه‌ی یک سری زمانی است (Kendall, 1975). این آزمون ناپارامتری بر پایه مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در واقع در این آزمون هر داده با تمامی داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود. در این مرحله می‌توان به‌جای استفاده از مقادیر اصلی داده‌ها، از مرتبه داده‌ها در مجموعه‌ی موردنظر (سری زمانی) استفاده کرده و برای حذف اثرات ضرایب خودهمبستگی معنی‌دار از سری زمانی، آزمون من‌کندال اصلاح شده (Hamed & Rao, 1998) استفاده شده است.

آزمون تشخیص جهش پتیت

این آزمون توسط پتیت (Pettitt, 1979) به‌منظور تعیین نقطه‌ی جهش یا تغییرات ناگهانی در سری زمانی ارائه شده است. در مکانی از سری زمانی که نقطه‌ی تغییر وجود داشته باشد، سری مورد نظر در آن مکان به دو جزء سری تقسیم می‌شود.

نتایج آزمون من‌کندال و شیب سن

در تعدادی از ایستگاه‌های نیمه غربی (مناطق مرتفع)، تعداد روزهای تر متوالی (CWD) در ایستگاه‌های نیمه شرقی و روزهای فوق‌العاده مرطوب (R99p) در ایستگاه سیاه‌بیشه (منطقه مرتفع در جنوب غربی استان) به‌صورت معنی‌دار افزایش خواهد یافت. به طوری‌که شیب روند افزایشی برای نمایه‌های CWD و R95p نسبتاً بیشتر بوده است. در حالی‌که در دوره‌ی آینده دور، اغلب نمایه‌های بارش هیچ روند معنی‌داری نشان نداده است و تنها یک روند کاهشی معنی‌دار برای نمایه تعداد روزهای خشک متوالی (CDD) در ایستگاه آمل وجود خواهد داشت.

نتایج بررسی روند برای سناریو حد متوسط (SSP245) نشان داده است که برای اغلب نمایه‌های حدی بارش در دوره‌ی آینده نزدیک و آینده دور، روند معنی‌داری مشاهده نشده است. با این حال (شکل ۳) برای دوره‌ی آینده نزدیک، نمایه شدت روزانه بارش (SDII) در ایستگاه‌های بندر امیرآباد، گلوگاه (نواحی شمال شرقی) و رامسر (نواحی شمال غرب استان) و نمایه تعداد روزهای تر متوالی (CWD) در ایستگاه کجور (نواحی مرتفع) دارای روند افزایشی معنی‌دار با شیب نسبتاً ملایم خواهند بود. در حالی‌که در برای ایستگاه‌های دیگر مورد مطالعه، هیچ روند معنی‌داری مشاهده نشده است. اما برای دوره‌ی آینده دور، نمایه تعداد روزهای خشک متوالی (CDD) در ایستگاه گلوگاه و نمایه تعداد روزهای فوق‌العاده مرطوب (R99p) در ایستگاه کجور (نواحی مرتفع) به‌صورت معنی‌دار کاهش خواهد یافت که شدت شیب کاهشی برای نمایه CDD بیشتر خواهد بود.

نتایج بررسی روند بر روی نمایه‌های بارشی برای ایستگاه‌های مختلف مورد مطالعه در دوره‌ی گذشته (دوره تاریخی، قبل از ۲۰۲۰) در جدول ۲ نشان داد که برای اغلب نمایه‌های مورد مطالعه، روند معنی‌داری وجود نداشت؛ با این حال، برای نمایه SDII در ایستگاه‌های آلاشت، بابلسر، نوشهر و رامسر، نمایه CDD در کجور و رامسر، نمایه‌های R5mm و R20mm به ترتیب در ایستگاه‌های کیاسر و نوشهر، یک روند افزایشی معنی‌دار وجود داشت. با این حال، نمایه CWD در ایستگاه قراخیل دارای روند کاهشی اما در ایستگاه کیاسر دارای روند افزایشی بوده است. همچنین نتایج بررسی روند بر روی نمایه‌های بارش سناریو SSP126 در دو دوره‌ی زمانی مورد مطالعه نشان داده است که برای دوره‌ی آینده نزدیک، تنها نمایه‌های R5p، SDII، R20mm، CWD و R99p و برای دوره‌ی آینده دور، تنها نمایه CDD دارای روند معنی‌دار در تعدادی از ایستگاه‌های مورد مطالعه بوده است در حالی‌که نمایه دیگر بارش هیچ روند معنی‌داری در هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه نداشته است. شکل ۲ نمایه‌هایی از بارش حدی که دارای روند معنی‌دار در ایستگاه‌های استان در دوره‌های مورد مطالعه بودند را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان بیان کرد در دوره‌ی آینده نزدیک و براساس سناریو خوش‌بینانه (SSP126)، تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین (R20mm)، در تعدادی از ایستگاه‌های ساحلی و نیمه شرقی استان، تعداد روزهای خیلی مرطوب (R95p) در ایستگاه‌های نیمه شرقی، نمایه ساده شدت روزانه بارش (SDII)

جدول ۲- مقادیر شیب و معنی‌داری نمایه‌های بارشی معنی‌دار در ایستگاه‌های مختلف

Table 2. Slope and significance values of significant precipitation profiles in different stations

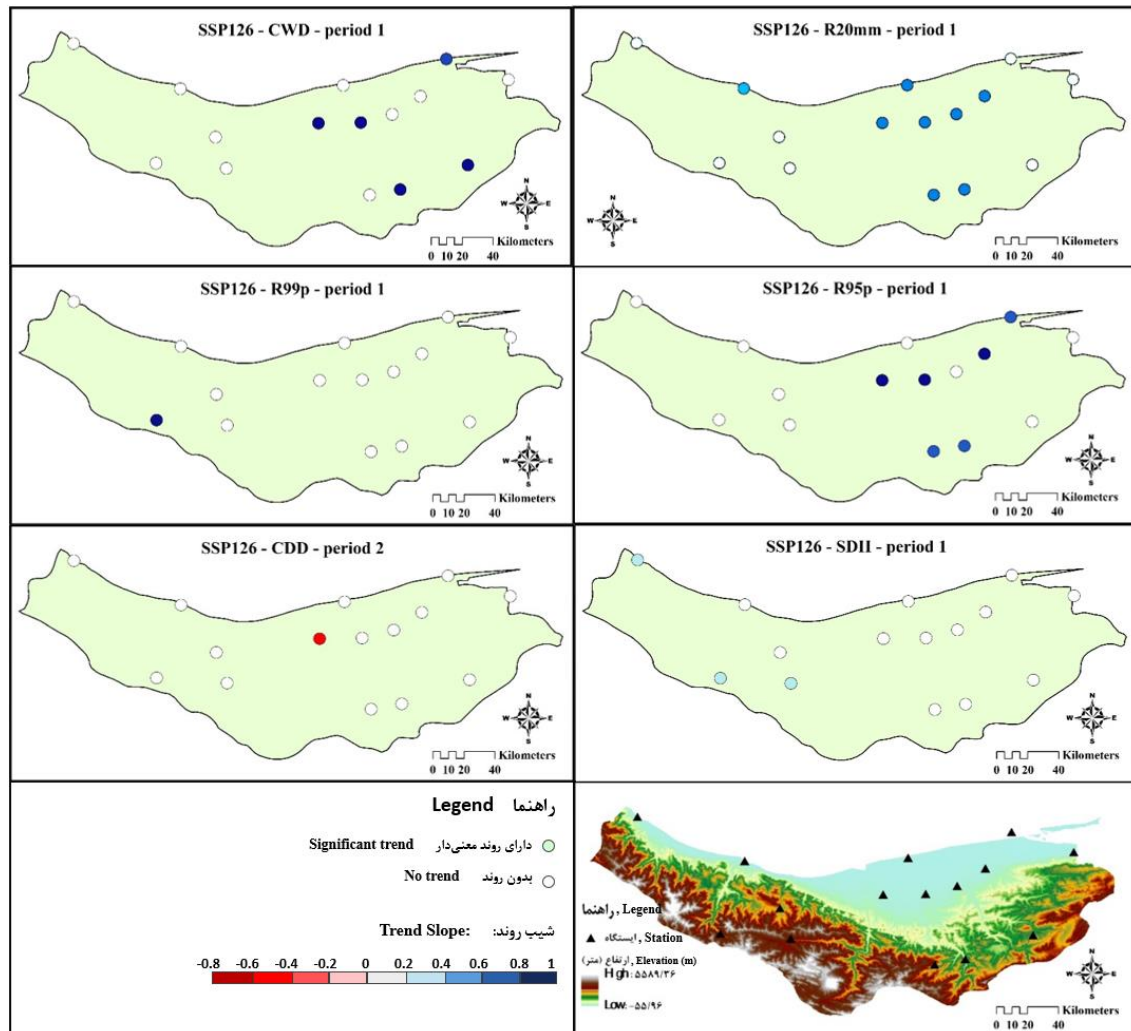
شماره No.	ایستگاه Station	نمایه بارشی Precipitation Index	شیب Slope	مقدار احتمال P-value
1	آلاشت، Alasht	SDII	0.07	0.04
2	آمل، Amol	-	-	-
3	بابلسر، Babolsar	SDII	0.04	0
4	بلده، Balade	-	-	-
5	امیرآباد، Amirabad	-	-	-
6	قراخیل، Gharakheyl	CWD	-0.15	0.01
7	کیاسر، Kiyasar	R5mm	0.48	0.04
8	کجور، Kojor	CWD	0.13	0.02
9	نوشهر، Noshahr	CDD	2.6	0.01
10	پل سفید، Polsefid	SDII	0.07	0
11	رامسر، Ramsar	R20mm	0.12	0.04
12	دشت ناز، Dasht Naz	-	-	-
13	ساری، Sari	SDII	0.05	0.01
14	سیاه‌بیشه، Siyah Bishe	CDD	0.18	0.03
15	گلوگاه، Galougah	-	-	-
		CWD	-0.15	0.01

استان و نیز نمایه تعداد روزهای با بارش سنگین (R10mm) در ایستگاه‌های سیاه‌بیشه و نوشهر (نیمه غربی) به‌صورت معنی‌دار کاهش خواهد یافت که بیشترین شدت شیب روند کاهشی برای نمایه‌های R1mm، R10mm بوده است و نیز میزان کاهش نمایه PRCptot در نواحی ساحلی کمتر از نواحی مرتفع غربی بوده است. در حالی‌که نمایه‌های دیگر بارش هیچ روند معنی‌داری و هیچ‌یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه نداشته است. با این حال، برای دوره‌ی زمانی آینده‌ی دور، تنها نمایه تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین (R20mm) در

نتایج بررسی روند تغییرات برای نمایه‌های حدی بارش بر اساس سناریو بدبینانه (SSP585) نشان داده است (شکل ۴) که با توجه به این سناریو، در اغلب موارد روندهای کاهشی معنی‌دار برای نمایه‌های حدی بارش وجود خواهد داشت و مقادیر بارش‌ها نزولی خواهد شد. برای دوره‌ی آینده نزدیک، نمایه تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین (R20mm) در مناطق مرتفع نیمه شرقی استان، نمایه مقدار سالانه بارندگی در روزهای مرطوب (PRCptot) در نواحی ساحلی و غربی، تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی‌متر، R1mm) در اغلب مناطق

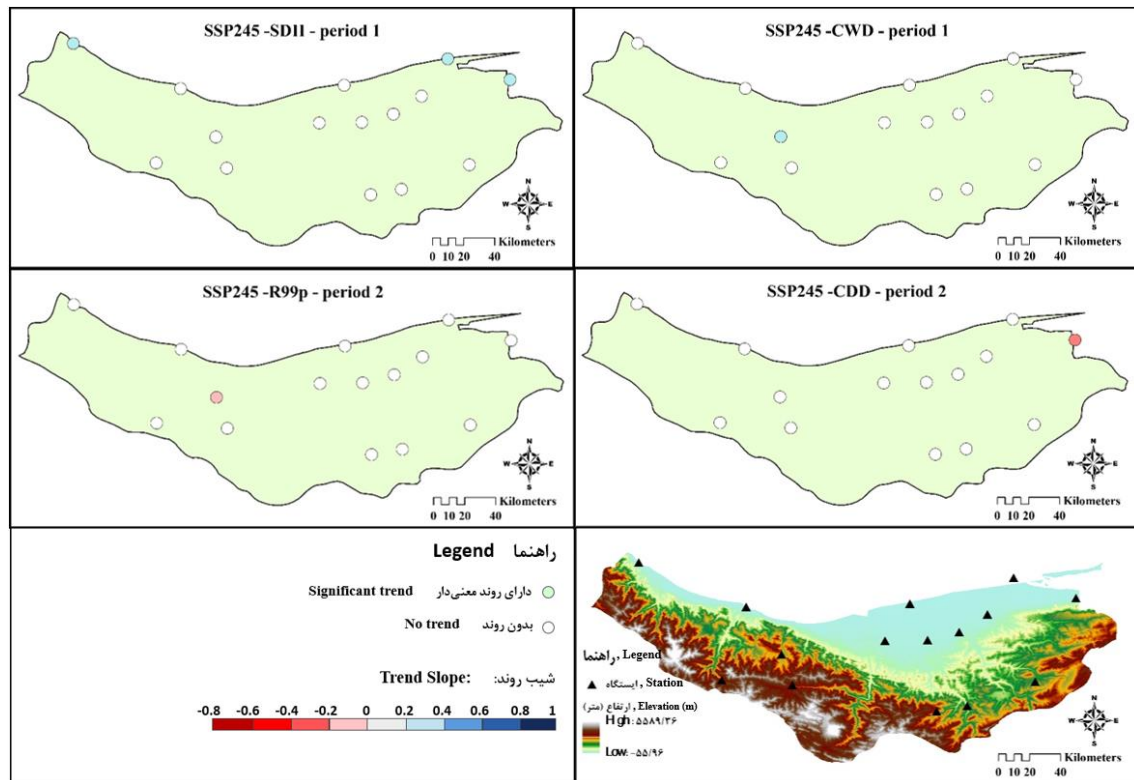
یافت حال آن که نمایه های دیگر هیچ تغییر معنی داری را نشان نداده است.

ایستگاه های پل سفید و آلاشت (نواحی مرتفع جنوب شرقی) به صورت معنی دار کاهش اما نمایه تعداد روزهای تر متوالی (CWD) در ایستگاه کجور به صورت معنی دار افزایش خواهد



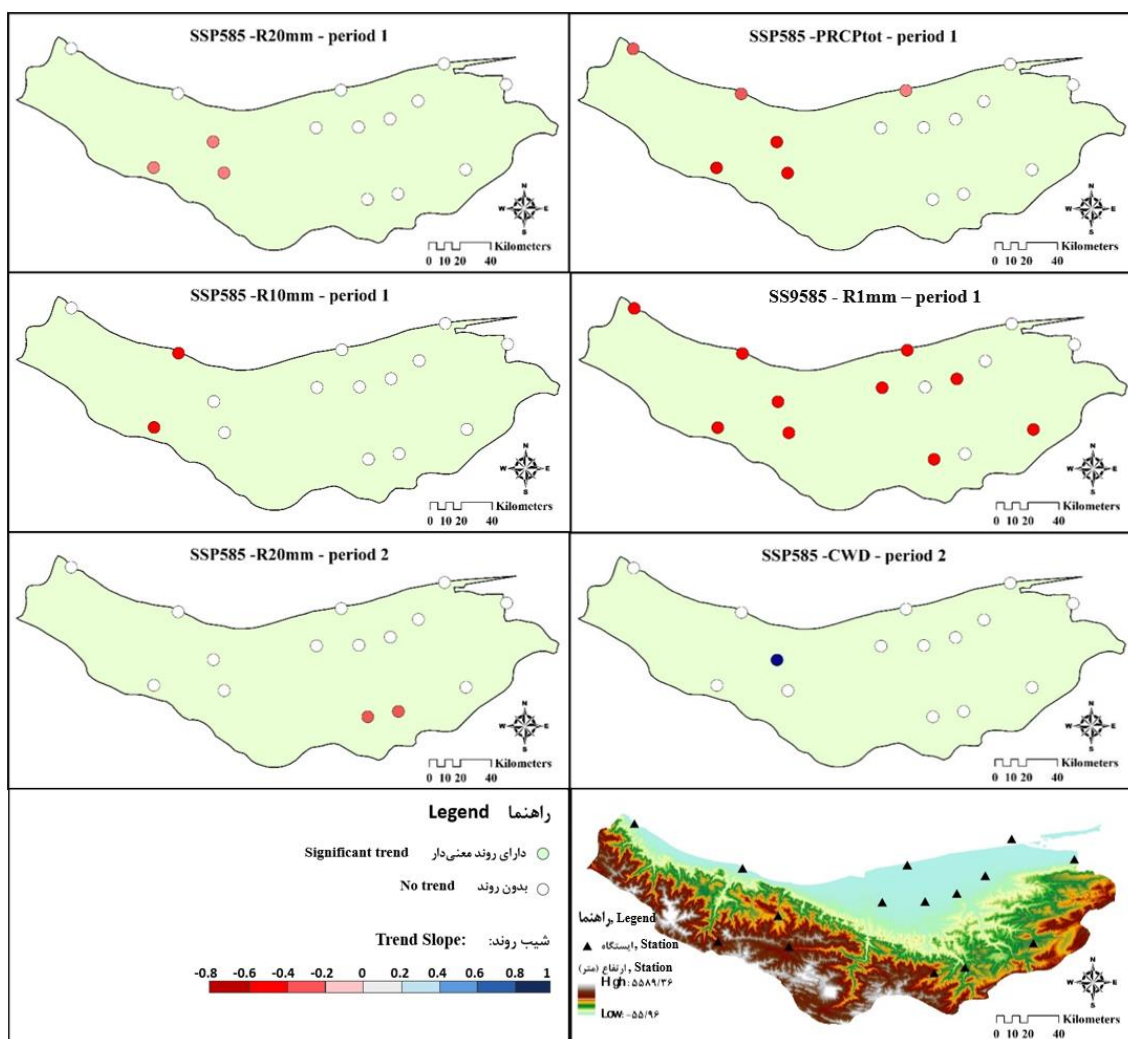
شکل ۲- نتایج آزمون ناپارامتری من کندال نمایه های بارش تحت سناریو SSP126 در دوره ی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰)

Figure 2. The results of the non-parametric Mann-Kendall test for precipitation indices under the SSP126 scenario for the near future (2021-2060) and the far future (2061-2100)



شکل ۳- نتایج آزمون ناپارامتری من‌کندال نمایه‌های بارش تحت سناریو SSP245 در دوره‌ی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و دور (۲۱۰۰-۲۰۶۱)

Figure 3. The results of the non-parametric Mann-Kendall test for precipitation indices under the SSP245 scenario for the near future (2021-2060) and the far future (2061-2100) period.



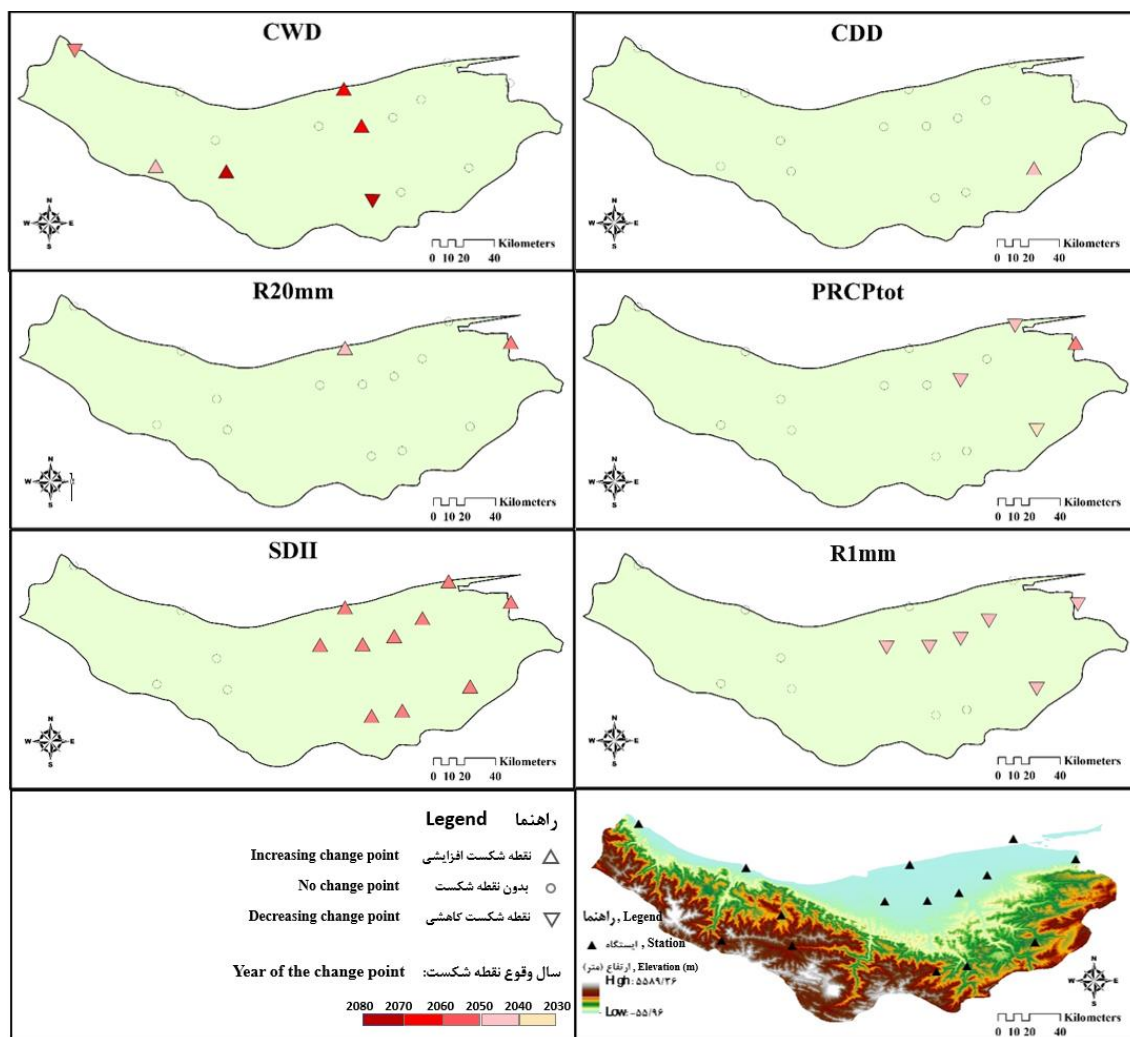
شکل ۴- نتایج آزمون ناپارامتری من کندال نمایه های بارش تحت سناریو SSP585 دوره ی زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) و دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰)

Figure 4. The results of the non-parametric Mann-Kendall test for precipitation indices under the SSP585 scenario for the near future (2021-2060) and the far future (2061-2100)

نتایج آزمون پتیت

به منظور اطلاع از وجود یا عدم وجود نقطه شکست با تغییر ناگهانی در سری داده ها برای هر نمایه، آزمون پتیت برای هر یک از سناریوهای مورد مطالعه در دوره ی زمانی ۲۰۸۰-۲۱۰۰ در تمامی ایستگاه ها انجام شد. نتایج نشان داد که برای سناریو خوش بینانه و حد متوسط (SSP126, SSP245)، نمایه های حدی بارش در هیچ یک از ایستگاه ها نقطه شکست معنی داری تا سال ۲۱۰۰ نخواهد داشت و ناهمگنی در سری داده ها دیده نمی شود. با این حال براساس سناریو بدبینانه (SSP585)، تغییرات کاهشی یا افزایشی برای تعدادی از نمایه های بارش وجود خواهد داشت (شکل ۵) به طور کلی، در زمینه تغییرات ناگهانی افزایشی یا نقطه شکست افزایشی می توان بیان کرد که نمایه روزهای خشک متوالی (CDD) یک تغییر ناگهانی افزایشی را در ایستگاه کیاسر برای سال ۲۰۵۶، نمایه تعداد روزهای تر متوالی (CWD) در تعدادی ایستگاه های شرقی و ساحلی (بابلسر و قراخیل) در سال ۲۰۷۰ و در ایستگاه های جنوب غربی (سیاه بیشه و بلده) در سال ۲۰۸۰، نمایه تعداد

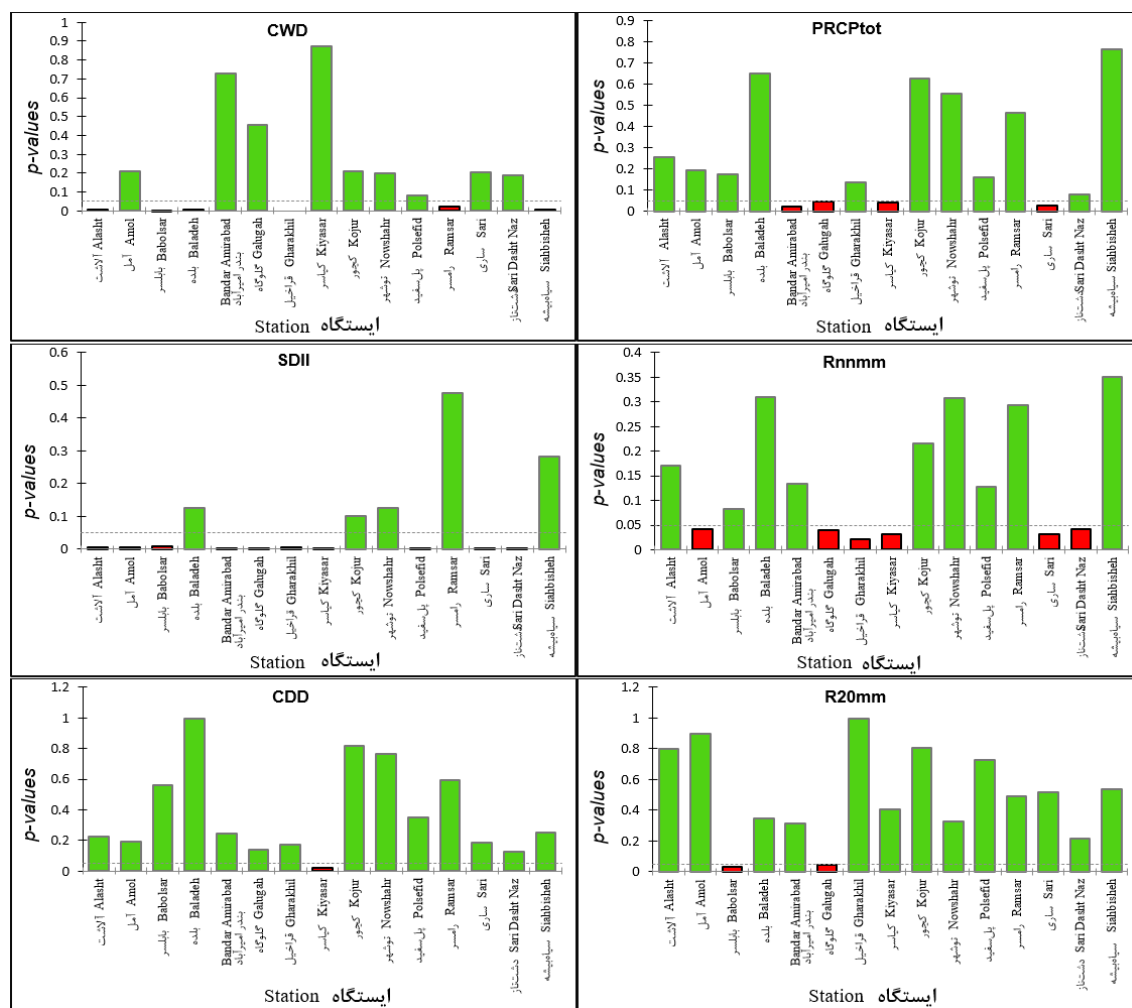
روزهای با بارش خیلی سنگین (R20mm) در ایستگاه های بابلسر و گلوگاه برای سال های ۲۰۵۷ و ۲۰۶۱، نمایه مقدار سالانه بارندگی در روزهای مرطوب (PRCPtot) در ایستگاه گلوگاه برای سال ۲۰۶۱ و نیز نمایه شدت روزانه بارش (SDII) در نواحی نیمه شرقی استان برای سال ۲۰۶۱ را تجربه خواهند نمود. در مقابل، در زمینه وجود تغییرات ناگهانی کاهشی در سری داده های این سناریو می توان بیان کرد نمایه تعداد روزهای تر متوالی (CWD) در ایستگاه های آلاشت (مرتفع) و رامسر (ساحلی) به ترتیب برای سال های ۲۰۸۷ و ۲۰۶۶، نمایه مقدار سالانه بارندگی در روزهای مرطوب در ایستگاه های نیمه شرقی استان (امیرآباد، کیاسر و ساری) به ترتیب برای سال های ۲۰۳۲، ۲۰۵۰ و ۲۰۵۰ و نیز نمایه تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی متر) در ایستگاه های نیمه شرقی برای سال ۲۰۵۱، یک نقطه شکست کاهشی معنی دار را در طول سری زمانی داده های این سناریو تجربه خواهند نمود؛ به گونه ای که بیشترین نقاط شکست معنی دار برای نمایه های CWD، SDII و R1mm دیده می شود.



شکل ۵- نتایج آزمون ناپارامتری پتیت برای نمایه‌های بارش تحت سناریو SSP585 در ایستگاه‌های مورد مطالعه
Figure 5. The results of Petit's non-parametric test for precipitation indices under the SSP585 scenario in the studied stations

دفعات بیشتری تکرار شده‌اند. با این حال در ایستگاه‌های دیگر مورد مطالعه، تعداد رخداد نقاط شکست معنی‌دار به نسبت کمتر بوده (ایستگاه‌های آلاشت، امیرآباد، قراخیل، بلده، رامسر، دشت‌ناز، سیاه‌بیشه و آمل) یا هیچ رخداد شکست معنی‌دار وجود نخواهد داشت (ایستگاه‌های کجور، نوشهر و پل سفید).

شکل ۶ میزان آماره P-value (معنی‌داری) آزمون پتیت را برای نمایه‌های بارش نشان می‌دهد. با توجه به شکل می‌توان بیان کرد نقاط شکست معنی‌دار برای نمایه‌های مختلف بارش استان مازندران در ایستگاه‌های گلوگاه، کیاسر، بابلسر و ساری (مناطق شرقی) ملموس‌تر خواهد بود؛ چه بسا که این ایستگاه‌ها در بررسی نقطه شکست نمایه‌های مختلف بارش به تعداد



شکل ۶- مقادیر Pvalue (با سطح معنی داری ۵ درصد) برای هر یک از نمایه های حدی بارش در ایستگاه های مورد مطالعه
Figure 6. Pvalue values (with a significance level of 5%) for each of the extreme precipitation indices in the studied stations

بحث و نتیجه گیری

با توجه نتایج حاصل می توان بیان کرد به دلیل اینکه رخداد وقایع حدی هواشناسی از جمله بارش یکی از مسائل اصلی در حوزه منابع آب، کشاورزی و مخاطرات طبیعی استان مازندران است، بنابراین مطالعه آن به منظور برنامه ریزی بلندمدت در حوزه های مختلف به منظور اعمال اقدامات مدیریتی و پیشگیرانه در برابر تهدیدات خشکسالی و سیل ناشی از تغییرات اقلیمی و تغییرات انسانی ضرورت دارد (Bayatani et al., 2023). تحقیقات بسیاری در سطح استان به این موضوع پرداخته شده است (Mortazavifar et al., 2019; Sadeghi et al., 2019; Habibzadeh Tilami et al., 2024) با این حال با انتشار گزارش ششم تغییر اقلیم و دسترسی به داده های مورد استفاده در این گزارش (CMIP6)، امکان بروزرسانی مطالعات در زمینه وقایع حدی بارشی به منظور بررسی تغییرات محتمل در روند آینده نمایه های حدی بارش فراهم شده است. در این مطالعه پس از ریزمقیاس نمای برون داد مدل اقلیمی MRI-ESM2-0 برای ۱۵ ایستگاه استان مازندران، پیش نگری نمایه های حدی بارش (محاسبه شده با نرم افزار Rclimdex)

بر اساس سه سناریوی خوش بینانه (SSP126)، میانه (SSP245) و بدبینانه (SSP585) برای دو دوره ی آینده نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۶۱-۲۱۰۰) انجام شد. سپس به بررسی روند و نقطه شکست برای سری زمانی نمایه های هر یک از سناریوهای مورد بررسی پرداخته شد. نتایج نشان داد در سطح اطمینان ۹۵ درصد، تحت سناریوی خوش بینانه، تعداد روزهای خیلی مرطوب، تعداد روزهای تر متوالی و تعداد روزهای با بارش خیلی سنگین در نیمه شرقی استان که آب و هوای نسبتاً خشک تری نسبت به نواحی غربی دارد، در دوره ی آینده ی نزدیک افزایش خواهد یافت؛ لذا می توان بیان کرد احتمال وقوع بارش های سیلابی در آینده ی نزدیک افزایش می یابد. این نتایج با مطالعات عسکری زاده و همکاران (۲۰۱۸)، فهیمی نژاد و همکاران (۲۰۱۹) و زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۲) همخوانی دارد. حال آنکه در دوره ی آینده ی دور تنها نمایه شدت روزانه بارش در ایستگاه های مرتفع نواحی غربی استان افزایش خواهد یافت. بر اساس سناریوی میانه، تغییرات چندانی در نمایه های بارش به صورت منطقه ای رخ نخواهد داد و تنها نمایه شدت روزانه بارش در تعداد محدودی از ایستگاه های ساحلی در

در سری داده‌های هیچ‌یک از نمایه‌های بارش تا سال ۲۱۰۰ رخ نخواهد داد. اما با حرکت به سمت سناریوی بدبینانه، نقطه تغییر افزایشی برای نمایه تعداد روزهای تر متوالی در تعدادی از ایستگاه‌های استان برای دهه ۲۰۶۰-۲۰۷۰ وجود خواهد داشت. همچنین نمایه‌های شدت روزانه بارش و تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی‌متر) به ترتیب یک تغییر ناگهانی افزایشی در سال ۲۰۶۱ و کاهش در سال ۲۰۵۱ را در نواحی نیمه شرقی استان تجربه خواهند نمود که بیانگر افزایش ناگهانی در شدت بارش‌های نزولی و کاهش وقوع تعداد روزهای با بارندگی کم است؛ لذا می‌بایست علت وقوع چنین رخدادهایی مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد. بنابراین به‌منظور کاهش ریسک سیلاب و خشکسالی در سطح استان براساس شرایط مختلف پیش‌رو می‌بایست اقدامات مدیریتی مناسبی را لحاظ نمود. لذا آگاهی از چشم‌انداز آینده وقایع حدی بارشی می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریت خاک، آب و کشاورزی به خصوص در برنامه‌های در حال تدوین توسعه اقتصادی استان، مورد استفاده قرار گیرد. اصول اخلاقی در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت شده است و این موضوع مورد تأیید همه نویسندگان است.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری تحت قرارداد با شماره تاریخ "۱۳۰۱-۱۱-۱۴" انجام شد که به این وسیله از معاونت متبوع تشکر و قدردانی می‌شود.

آینده‌ی نزدیک افزایش خواهد یافت. با این حال تحت سناریوی بدبینانه، تغییرات نمایه‌های حدی در اغلب مواقع کاهش خواهد بود؛ به طوری که در آینده‌ی نزدیک، نمایه تعداد روزهای مرطوب (با بارش ۱ میلی‌متر) در اغلب مناطق استان با شدت بالایی کاهش خواهد یافت. همچنین مقدار سالانه بارندگی در روزهای مرطوب در نواحی ساحلی و غربی، و نیز دو نمایه تعداد روزهای با بارش سنگین و خیلی سنگین در ایستگاه‌های مرتفع نواحی غربی کاهش خواهد یافت؛ بنابراین اگرچه ممکن است در آینده‌ی نزدیک احتمال خطر رخداد وقایع سیلابی کاهش یابد، اما با توجه به کاهش نمایه‌های رطوبتی در حالت بدبینانه، احتمال وقوع خشکسالی‌های گسترده افزایش می‌یابد. با این-حال در آینده‌ی دور، نمایه‌های بارشی تغییرات معنی‌داری نخواهند داشت و تنها تعداد روزهای با بارش سنگین در نواحی مرتفع شرق استان کاهش خواهد یافت. از نظر وقوع تغییرات ناگهانی نیز می‌توان بیان کرد با حرکت به سمت سناریوی خوش‌بینانه و میانه، تغییر ناگهانی یا نقطه شکست معنی‌داری

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از اداره کل هواشناسی استان مازندران در مساعدت در تهیه داده‌های هواشناسی و دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به علت حمایت مالی ایشان در انجام این پژوهش بیان می‌دارند.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافعی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید همه نویسندگان است.

اصول اخلاقی

References

- Aghani, M., Ghorbani, K., & Salarijazi, M. (2017). Trend and change point analysis of seasonal SPI drought index in Iran. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 11(4), 667-679. (In persian)
- Babaousmail, H., Hou, R., Ayugi, B., Sian, K. T. C. L. K., Ojara, M., Mumo, R., . . . Ongoma, V. (2022). Future changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean and Sahara regions using bias-corrected CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 42(14), 7280-7297.
- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2021). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain. *International Journal of Climatology*, 41, E171-E186.
- Bayatani, F., Hayatzadeh, M., Fotouhi Firozabad, F., Fathzadeh, A., Karami, A. (2023). Spatial assessment of watershed vulnerability based on climatic approach (case study: Doroodzan watershed, Fars Province). *Journal of Watershed Management Research*, 14(28), 78-88.
- Bock, L., Lauer, A., Schlund, M., Barreiro, M., Bellouin, N., Jones, C., . . . Eyring, V. (2020). Quantifying progress across different CMIP phases with the ESMValTool. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(21), e2019JD032321. <https://doi.org/10.1029/2019JD032321>
- 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.
- Fahiminezhad, E., Babaeian, I., & Entezari, A. (2019). Simulation of the effect of global warming on the mean and extreme events of some hydrochemical variables in Shandiz catchment basin Case study: The Case of the general circulation model CanESM2. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards*, 6(3), 27-48.
- Fan, L., & Xiong, Z. (2015). Using quantile regression to detect relationships between large-scale predictors and local precipitation over northern China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 32, 541-552.
- Field, C. B., Barros, V. R., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Abdrabo, M. A., Adger, W. N., . . . Barnett, J. (2015). Summary for policymakers. In *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1-32): Cambridge University Press.
- Ghorbani, K., Bararkhan Poor, S., Valizadeh, E., & Molaarazi, A. J. (2020). Regional analysis of trend and change point in seasonal series of SPEI drought index in Iran. *Journal of Water and Soil Conservation*, 27(4), 185-200. (In persian)

- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590, 125422.
- Habibzadeh Tilami, A., Shahedi, K., & Habibnejad Roshan, M. (2023). Monitoring the meteorological and hydrological drought trend in Tajan watershed, Mazandaran province. *Journal of Watershed Management Research*, 14(28), 124-133.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Hejazizadeh, Z., & Zarei, S. (2023). Investigation of Changes of Temperature and Rainfall Indicators in Kurdistan Province Based on Radiation Injection Scenarios (RCP). *Journal of Applied researches in Geographical Sciences*, 23(69), 1-14.
- Kanani, R., Fakheri-Fard, A., Ghorbani, M., & Dinpashoh, Y. (2019). Trend analysis of gradual and rapid variations of hydro-climatological factors (Case Study: Lighvanchai Basin). *Water and Soil Science*, 29(1), 97-110. (In persian)
- Karl, T. R., Nicholls, N., & Ghazi, A. (1999). Clivar/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes workshop summary. *Weather and climate extremes: Changes, variations and a perspective from the insurance industry*, 3-7.
- Kendall, M. (1975). Kendall Rank Correlation Methods; Griffin, C., Ed. In: Oxford University Press: London, UK.
- Knutti, R., & Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Climate Change*, 3(4), 369-373. <https://doi.org/10.1038/nclimates1716>
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 245-259.
- Masoodian, S. A. (2023). A Climatological Survey of Spring of 2019 Flood-causing precipitations in the western parts of Iran. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 101-116.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F., . . . Taylor, K. E. (2007). The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383-1394.
- Mistry, M. N. (2019). A high-resolution global gridded historical dataset of climate extreme indices. *Data*, 4(1), 41.
- Mortazavifar, S. M., Mobin, M. H., Mokhtari, M. H., Ekrami, M., & Rfiei Sardoi, E. (2019). Evaluation of the impact of climate change on precipitation and temperature variables based on the RCP scenarios: A case study of the east of Mazandaran Province, Iran. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 1(4), 351-364.
- Organization, W. M. (2011). Climate Knowledge for Action: A Global Framework for Climate Services- Empowering the Most Vulnerable: World Meteorological Organization.
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 28(2), 126-135.
- Philip, S. Y., Kew, S. F., Hauser, M., Guillod, B. P., Teuling, A. J., Whan, K., . . . Oldenborgh, G. J. v. (2018). Western US high June 2015 temperatures and their relation to global warming and soil moisture. *Climate Dynamics*, 50, 2587-2601.
- Putra, I., Rosid, M. S., Sopaheluwakan, A., & Sianturi, Y. C. U. (2020). The CMIP5 projection of extreme climate indices in Indonesia using simple quantile mapping method. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Rao, K. K., Kulkarni, A., Patwardhan, S., Kumar, B. V., & Kumar, T. L. (2020). Future changes in precipitation extremes during northeast monsoon over south peninsular India. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 205-217.
- Reboita, M. S., Kuki, C. A. C., Marrafon, V. H., de Souza, C. A., Ferreira, G. W. S., Teodoro, T., & Lima, J. W. M. (2022). South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Climate Dynamics*, 58(1-2), 459-485.
- Ren, G., Chen, Y., Zou, X., Zhou, Y., Ren, Y., Jiang, Y., . . . Zhang, L. (2011). Change in climatic extremes over mainland China based on an integrated extreme climate index. *Climate Research*, 50(2-3), 113-124.
- Sadeghi, H., Mohammadi, H., Shamsipour, A., Bazgeer, S., Karimi Ahmadabad, M., & Soufizadeh, S. (2019). Projection of Changes in Precipitation Index of the Southern Coast of the Caspian Sea in Order to Hazards Reduction in the Periods of 2021-2050. *Environmental Management Hazards*, 6(4), 395-421. (In persian)
- Salarijazi, M., Akhond-Ali, A.-M., Adib, A., & Daneshkhah, A. (2012). Trend and change-point detection for the annual stream-flow series of the Karun River at the Ahvaz hydrometric station. *African Journal of Agricultural Research*, 7(32), 4540-4552.
- Seneviratne, S. I., Donat, M. G., Mueller, B., & Alexander, L. V. (2014). No pause in the increase of hot temperature extremes. *Nature Climate Change*, 4(3), 161-163.
- Sillmann, J., & Roeckner, E. (2008). Indices for extreme events in projections of anthropogenic climate change. *Climatic Change*, 86, 83-104.

- Smith, A. B., & Matthews, J. L. (2015). Quantifying uncertainty and variable sensitivity within the US billion-dollar weather and climate disaster cost estimates. *Natural Hazards*, 77, 1829-1851.
- Sobhani, B., Eslahi, M., & Babaeian, I. (2017). Comparison of statistical downscaling in climate change models to simulate climate elements in Northwest Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 49(2), 301-325. (In persian)
- soheili E, Malekinezhad H, Ekhtesasi M R. (2019). Analysis of Trends in Temperature and Precipitation in Doroodzan Dam Basin using the Modified Mann-Kendall Test. *Journal of Watershed Management Research*. 9(18), 123-134. (In persian)
- Sharifi Garmdareh, A., Mirabbasi Najafabadi, R., Nasr-Esfahani, M., & Fattahi Nafchi, R. (2020). Hydrological Response to Human Activities and Climate Change in the Ghaleh-Shahrokh Watershed. *Journal of Watershed Management Research*, 11(22), 233-242. (In persian)
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., . . . Emori, S. (2013). Technical summary. In *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 33-115): Cambridge University Press.
- 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.
- Wang, H.-J., Sun, J.-Q., Chen, H.-P., Zhu, Y.-L., Zhang, Y., Jiang, D.-B., . . . Yang, S. (2012). Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(3), 279.
- Wazneh, H., Arain, M. A., & Coulibaly, P. (2020). Climate indices to characterize climatic changes across southern Canada. *Meteorological Applications*, 27(1), e1861.
- World Meteorological Organization. (2011). *Climate Knowledge for Action: A Global Framework for Climate Services-Empowering the Most Vulnerable*. World Meteorological Organization.
- Xue, J., & Gui, D. (2015). Linear and nonlinear characteristics of the runoff response to regional climate factors in the Qira River basin, Xinjiang, Northwest China. *PeerJ*, 3, e1104.
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2022). Projection of precipitation intensity in Iran using NEX-GDDP by multi-model ensemble approach. *Iranian Journal of Geophysics*, 16(1), 47-68. (In persian)
- Zhang, M., Yang, X., Ren, L., Pan, M., Jiang, S., Liu, Y., . . . Fang, X. (2021). Simulation of extreme precipitation in four climate regions in China by general circulation models (GCMs): performance and projections. *Water*, 13(11), 1509.
- Zhang, X., & Yang, F. (2004). RClimDex (1.0) user manual. *Climate Research Branch Environment Canada*, 22, 13-14.