Sari Agriculture Sciences and Natural Resources University

Journal of Watershed Management Research, Vol. 17, Issue 1, 2026 ..... p: 94-107

OPEN ACCESS

Research Paper

Predicting Climate Change Effect on Probable Maximum Precipitation (PMP) in Iran According to the CMIP6 of IPCC

Pouya Allahverdipour[1] and Yagob Dinpashoh[2]

1- Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran,
(Corresponding author: Dinpazhoh@Tabrizu.ac.ir)

Received: 28 August, 2025 Revised: 10 November, 2025 Accepted: 08 December, 2025

Extended Abstract

Background: Global warming has increased the frequency of extreme precipitation events across the globe during the past decades. Information about precipitation and its forecast in various hydrological applications is important in terms of economic studies and risk assessment, such as estimating the maximum probable flood and engineering and management of water resources. One of the important parameters that changes with climate change is probable maximum precipitation (PMP), defined as the maximum probable precipitation depth in a certain duration, such as 24 hours, at a single site. There is no comprehensive study on the impact of climate change on PMP in Iran. This study fills the mentioned gap in the country by generating the precipitation depths for future periods in Iran. As a result of climate change, PMP and the negative consequences of such precipitation are expected to increase until the end of the century. As a result, studying the effect of climate change on extreme precipitation and PMP of different stations in Iran can be very important and practical.

Methods: In this study, the effects of future climate changes on PMP values in different climates in Iran were investigated using two distinct scenarios, namely SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (optimistic and pessimistic scenarios, respectively), and the HadGEM3-GC31-LL model from the output of the latest report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), i.e., CMIP6 report. The output of this model and scenarios was downscaled using the LARS-WG model. The statistical measures of the correlation coefficient (r) and Root Mean Square Error (RMSE) were used to evaluate the performance of the LARS-WG model. Two statistical methods, generalized Hershfield and Hershfield-DESA and 30-year data (1993-2022) related to 13 synoptic stations located in different climates across Iran, were used to estimate the PMP values.

Results: The results of the simulation of precipitation and temperature in the base period (1993-2022) using the Lars-WG model indicate that the correlation coefficient (r) for precipitation ranges between 0.95 and 0.99, and for minimum and maximum temperatures is equal to 0.99 in all 13 synoptic stations in Iran. The range of RMSE for precipitation is between 1.22 and 16.29 mm, and for minimum and maximum temperatures is in the range of 0.18-0.42 and 0.14-0.32 °C, respectively. Therefore, the Lars-WG model has an acceptable performance in simulating the climate variables in the base period at all stations. The effect of climate change on the average annual precipitation is increasing in all regions of Iran, and the highest range of increase in the next 20-year period (2021-2040) is at Isfahan with a +61.18% increase compared to the base period and under the pessimistic scenario (SSP5-8.5). The maximum annual 24-hour precipitation will increase in most areas with arid climates and decrease in per-humid climates (Bandar Anzali and Astara). The maximum annual 24-hour precipitation of the stations in the base period ranges from 25 mm in Tabas to 214 mm in Bandar Anzali. In the future period, the annual maximum 24-hour precipitation will increase in Isfahan, Tabas, Kashan, Birjand, Zahedan, Ardabil, and Yasuj under both scenarios, and in Khorramabad under the SSP5-8.5 scenario. A decrease in the maximum annual 24-hour precipitation is predicted in Tehran, Mashhad, Tabriz, BandareAnzali, and Astara under both scenarios and in Khorramabad under the SSP1-2.6 scenario. The largest increase and decrease in maximum 24-hour precipitation is predicted with a +55.70% increase in Yasouj and a -26.92% decrease in Bandar Anzali, respectively, compared to the base period. The highest ratio of PMP to maximum annual 24-hour precipitation is estimated in arid climates. According to the Desa method, the highest ratio of PMP to the maximum 24-hour precipitation in the future will be at Zahedan under both scenarios. The biggest increase in this ratio will be in Mashhad. According to the generalized Hershfield method, the value of PMP in all stations has

Copyright ©2026. Allahverdipour and Dinpashoh. Published by Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non-Commercial 4.0 Unported License, which allows users to read, copy, distribute, and make derivative works for non-commercial purposes from the material, as long as the author of the original work is cited properly.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

been estimated many times higher than that of the modified Desa method. According to the modification of the frequency factor (K_m) in the Desa method, the estimated values seem more expected according to this method. The amount of PMP will increase in most synoptic stations in Iran. The highest PMP increase in Zahedan under the SSP1-2.6 scenario and decrease under both scenarios are predicted only in Bandar Anzali. The percentage of PMP changes in the future will be higher in most arid and semi-arid climates than in humid climates.

Conclusion: The general results of this study indicate that the average annual precipitation will increase in all climates of Iran under the effect of climate change. In addition, the maximum annual 24-hour precipitation will increase in most regions with arid climates. This amount will decrease in per-humid climates. The generalized Hershfield method overestimates PMP values, but the values estimated using the Hershfield-DESA method are more expected. In general, the PMP will increase in most synoptic stations in Iran in the future. The percentage of PMP changes in the future will be higher in arid and semi-arid climates than in humid climates. Therefore, it is necessary to pay attention to the areas prone to adverse consequences from probable floods resulting from such precipitation. The results of the present research can be used by managers and decision-makers in engineering and water resources management issues to anticipate the effects of climate change on extreme precipitation and maximum probable precipitation in different cities and regions of Iran.

Keywords: Iran, Climate Change, Maximum Probable Precipitation, Hershfield Methode, CMIP6

How to Cite This Article: Allahverdipour, P., & Dinpashoh, Y. (2026). Predicting Climate Change Effect on Probable Maximum Precipitation (PMP) in Iran According to the CMIP6 of IPCC. *J Watershed Manage Res,* 17(1), 94-107. DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

مقاله پژوهشی

پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل (PMP) ایران مطابق گزارش ششم IPCC

پویا الله ویردی‌پور[۱] و یعقوب دین‌پژوه[۲]

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز ، ایران، (نویسنده مسوول: dinpazhoh@tabrizu.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۶/۰۶ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۷
صفحه: ۹۴ تا ۱۰۷

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف: با توجه به گرمایش جهانی، رویدادهای مربوط به بارش‌های سیل‌آسا در سراسر جهان در دهه‌های گذشته افزایش یافته‌اند. اطلاعات مربوط به بارش و پیش‌بینی آن در کاربردهای مختلف هیدرولوژیکی از نظر مطالعات اقتصادی و ارزیابی ریسک مانند برآورد حداکثر سیلاب محتمل و مهندسی و مدیریت منابع آب اهمیت دارد. یکی از پارامترهای مهم مرتبط با تغییر اقلیم، حداکثر بارش محتمل (PMP) است. PMP به‌عنوان حداکثر عمق بارش محتمل در مدت‌زمان مشخص مانند ۲۴ ساعت و در یک مکان معین تعریف می‌شود. مطالعه جامعی در مورد تأثیر تغییر اقلیم بر PMP در ایران انجام نشده است. این مطالعه با پیش‌بینی مقدار بارش برای دوره آتی در ایران، شکاف مذکور در مطالعات این موضوع در کشور را پر می‌کند. در نتیجه تغییرات اقلیمی، انتظار می‌رود که PMP و پیامدهای منفی چنین بارشی تا پایان قرن افزایش یابد. در نتیجه، مطالعه اثر تغییر اقلیم بر بارش شدید و PMP ایستگاه‌های مختلف ایران می‌تواند بسیار مهم و کاربردی باشد.

مواد و روش‌ها: در این مطالعه، با هدف بررسی اثرات تغییرات اقلیمی آینده بر مقادیر PMP در اقلیم‌های مختلف ایران، از دو سناریو مختلف به نام‌های SSP1-2.6 و SSP5-8.5 (به‌ترتیب سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه) و مدل HadGEM3-GC31-LL از خروجی آخرین گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) یعنی گزارش CMIP6 استفاده شد. برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی این مدل و سناریوها، از مدل LARS-WG و برای ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG از معیارهای آماری ضریب همبستگی (r) و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. برای برآورد مقادیر PMP از دو روش آماری هرشفیلد تعمیم‌یافته و هرشفیلد – دسا و داده‌های ۳۰ساله (۲۰۲۲-۱۹۹۳) مربوط به ۱۳ ایستگاه همدید واقع در اقلیم‌های مختلف در سراسر ایران استفاده شد.

یافته‌ها: نتایج شبیه‌سازی بارش و دمای دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) با استفاده از مدل Lars-WG حاکی از آن هستند که در کل ۱۳ ایستگاه همدید ایران، محدوده معیار r برای بارش بین ۰/۹۹-۰/۹۵ و برای دماهای کمینه و بیشینه برابر با ۰/۹۹ است. محدوده معیار RMSE نیز برای بارش بین ۱/۲۲ و ۱۶/۲۹ میلی‌متر و برای دماهای کمینه و بیشینه به ترتیب، در دامنه ۰/۴۲-۰/۱۸ و ۰/۳۲-۰/۱۴ درجهٔ سانتی‌گراد است. بنابر این، مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دوره پایه همه ایستگاه‌ها عملکرد قابل قبولی دارد. تأثیر تغییر اقلیم بر میانگین بارش سالانه در همه اقلیم‌های ایران افزایشی است و بیشترین درصد افزایش آن در دوره ۲۰ساله آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه، در اصفهان با ۶۱/۱۸ درصد افزایش نسبت به دوره پایه و تحت سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) پیش‌بینی می‌شود. حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در اکثر مناطق با اقلیم خشک افزایش و در اقلیم بسیار مرطوب (بندر انزلی و آستارا) کاهش خواهد یافت. حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه ایستگاه‌ها در دوره پایه از ۲۵ میلی‌متر در طبس تا ۲۱۴ میلی‌متر در بندر انزلی متغیر است. در دوره آتی، حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در اصفهان، طبس، کاشان، بیرجند، زاهدان، اردبیل و یاسوج تحت هر دو سناریو و در خرم‌آباد تحت سناریو SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت. در تهران، مشهد، تبریز، بندر انزلی و آستارا تحت هر دو سناریو و در خرم‌آباد تحت سناریو SSP1-2.6 کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه پیش‌بینی می‌شود. بیشترین افزایش و کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته نسبت به دوره پایه، به‌ترتیب با ۵۵/۷۰+ درصد افزایش در یاسوج و ۲۶/۹۲- درصد کاهش در بندر انزلی پیش‌بینی می‌شود. بیشترین نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در اقلیم‌های خشک برآورد می‌شود، به‌طوری‌که طبق روش دسا، بیشترین نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته در آینده و تحت هر دو سناریو، در زاهدان خواهد بود. بیشترین افزایش این نسبت نیز در مشهد اتفاق خواهد افتاد. مقدار PMP طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته در همه ایستگاه‌ها به‌مراتب بیشتر از روش اصلاحی دسا برآورد شده است. ولی با توجه به اصلاح عامل فرکانس (K_m) در روش دسا، مقادیر برآورد شده طبق این روش بیشتر مورد انتظار به نظر می‌رسد. مقدار PMP در اکثر ایستگاه‌های همدید ایران افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش PMP در زاهدان تحت سناریو SSP1-2.6 و کاهش تحت هر دو سناریو موردبررسی، فقط در بندر انزلی پیش‌بینی می‌شود. درصد تغییرات PMP در آینده در اکثر اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم مرطوب خواهد بود.

نتیجه‌گیری: نتایج کلی این مطالعه حاکی از آن هستند که تحت تأثیر تغییر اقلیم، میانگین بارش سالانه در همه اقلیم‌های ایران افزایش خواهد یافت. افزون بر این، حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در اکثر مناطق با اقلیم خشک افزایش خواهد یافت. این مقدار در اقلیم بسیار مرطوب کاهشی خواهد بود. روش هرشفیلد تعمیم‌یافته در برآورد مقادیر PMP بیش‌برآوردی دارد، ولی مقادیر برآوردشده با استفاده از روش هرشفیلد – دسا مورد انتظار هستند. به‌طور کلی، مقدار PMP در اکثر ایستگاه‌های همدید ایران در آینده افزایش خواهد یافت. درصد تغییرات مقدار PMP در آینده در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم مرطوب خواهد بود. بنابر این، توجه به مناطق مستعد پیامدهای ناگوار در برابر سیلاب‌های محتمل حاصل از بارش‌های این‌چنینی ضروری است. نتایج تحقیق حاضر می‌توانند در موضوعات مهندسی و مدیریت منابع آب، مورد استفاده مدیران و تصمیم‌گیران در جهت پیش‌آگاهی از تأثیرات تغییر اقلیم بر بارش‌های شدید و حداکثر بارش محتمل در شهرها و مناطق مختلف ایران قرار گیرند.

واژه‌های کلیدی: ایران، تغییر اقلیم، حداکثر بارش محتمل، روش هرشفیلد، گزارش ششم

مقدمه

پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و تأثیر تغییر اقلیم در آینده همواره مورد توجه محققین مختلف است و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام شده‌اند (Lin *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2022; Allahverdipour *et al.*, 2024). یکی از پارامترهای مهم مرتبط با تغییر اقلیم، حداکثر بارش محتمل[۱] (PMP) است.

[1] Probable Maximum Precipitation

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

هرشفیلد از پیش‌گامان کاربرد مفهوم PMP در هیدرولوژی است (Hershfield, 1961). بعدها بتلاهمی (Bethlahmy, 1984) و الیاسون (Eliason, 1997) نیز روی PMP کار کردند. در بنگلادش، میانگین PMP در کل کشور بیش از ۴۰۰ میلی‌متر (Bari, 2021) و در بریتانیا از ۶۰۰ میلی‌متر در مناطق مرتفع تا ۴۰۰ میلی‌متر در شرق متغیر است. برای ایرلند مقدار آن در نواحی مرتفع ۵۵۰ میلی‌متر و در جنوب غرب ۶۰۰ میلی‌متر و در مناطق پست آن ۳۵۰ میلی‌متر گزارش شد (Clark & Dent, 2021).

اثر تغییر اقلیم بر تغییرات PMP در کشورهای مختلف مطالعه شده است. مثلا کانکل و همکاران (Kunkel *et al.*, 2013) در امریکا، حسین و همکاران (Hussain *et al.*, 2015) در مالزی، لی و همکاران (Lee *et al.*, 2016) در کره جنوبی، چن و همکاران (Chen *et al.*, 2017) در منطقه شمال‌غربی اقیانوس آرام در ایالات متحده، راستوگی و همکاران (Rastogi *et al.*, 2017) در حوضه رودخانه آلاباما کوزا – تالاپوسا در جنوب شرقی ایالات متحده و سرکار و مایتی (Sarkar & Maity, 2020) در هند تحقیقاتی را در این زمینه انجام دادند.

در ایالات متحده، افزایش ۳۰–۲۰ درصد در مقادیر PMP در دوره آینده (۲۱۰۰–۲۰۷۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰–۱۹۷۱) گزارش شد (Kunkel *et al.*, 2013). در کره جنوبی، با استفاده از CMIP5 مقدار PMP در دوره ۲۱۰۰–۲۰۸۱ افزایشی پیش‌بینی شد، به‌طوری‌که افزایش۳۰ درصد تحت سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵–۱۹۸۱) پیش‌بینی شد (Lee *et al.*, 2016). افزایش PMP در حوضه‌ای واقع در جنوب شرقی ایالات متحده معادل با ۲۰ و ۴۴ درصد به‌ترتیب، در دوره‌های ۲۰۵۰–۲۰۲۱ و ۲۱۰۰–۲۰۷۱ نسبت به دوره تاریخی ۲۰۱۰–۱۹۸۱ پیش‌بینی شد (Rastogi *et al.*, 2017). در شمال شرقی ویتنام، افزایش مقدار PMP در دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ تحت سناریو RCP8.5 پیش‌بینی شد (Thuy *et al.*, 2019). در هند، افزایش مقادیر PMP تحت دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 در آینده بین ۳۵–۲۰ درصد پیش‌بینی شد (Sarkar & Maity, 2020). در استرالیا، مقدار PMP تا انتهای قرن تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 به‌ترتیب، ۱۳ و ۳۳ درصد افزایشی برآورد شد (Visser *et al.*, 2022). در هنگ‌کنگ، افزایش مقدار PMP از ۱۳۱۸ میلی‌متر در دوره پایه، به ۱۷۲۴، ۱۴۳۵ و ۱۷۸۸میلی‌متر به‌ترتیب، تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد (Chan *et al.*, 2024).

در ایران نیز مطالعاتی در زمینه PMP انجام شده‌اند. مطابق نتایج بررسی تغییرات PMP در حوضه قره‌قوم با روش هرشفیلد، بیشترین مقدار آن بین ۱۴۰–۸۰ میلی‌متر در غرب این حوضه برآورد شد (Shafiee & Ghahraman, 2009). نتایج برآورد PMP در حوضه آبریز اترک، حاکی از برآورد بسیار زیاد و غیرمنطقی مقدار آن در روش هرشفیلد و برآورد منطقی‌تر آن در روش هرشفیلد تعمیم‌یافته بود (Ghahraman *et al.*, 2011). برآورد PMP در استان فارس با دو روش آماری هرشفیلد و هرشفیلد تعمیم‌یافته انجام شد. نتایج روش هرشفیلد با ۸۵۰–۲۸۰ میلی‌متر، بیش از دو و نیم برابر روش تعمیم‌یافته میلی‌متر بود (Bakhtiari *et al.*, 2017). برآورد PMP در بوشهر با استفاده از روش‌های آماری هرشفیلد و هرشفیلد تعمیم‌یافته و روش فیزیکی (همدیدی) در دوره ۲۰۱۸–۱۹۶۸ انجام شد. مطابق نتایج، مقادیر PMP در روش‌های هرشفیلد و هرشفیلد تعمیم‌یافته به‌ترتیب ۶۶۰/۵ و ۱۸۱/۴ میلی‌متر و در روش فیزیکی ۱۳۹/۹ میلی‌متر برآورد شد (Farmanara & Bakhtiari. 2020). در تحقیقی، فتاحی و حبیبی (Fattahi & Habibi, 2022) از روش هرشفیلد و هرشفیلد – دسا برای برآورد PMP ایران در دوره ۲۰۲۱–۱۹۸۱ استفاده کردند. بیشترین مقادیر PMP بین ۱۱۰۰–۷۰۰ میلی‌متر در شمال و در سایر مناطق بین ۷۰۰–۱۱۰ میلی‌متر بود. در تحقیقی، مقادیر PMP حوضه آبخیز بختگان با استفاده از دو روش آماری هرشفیلد و هرشفیلد تعمیم‌یافته برآورد شد. مطابق نتایج، مقدار PMP در این منطقه با روش هرشفیلد ۷۹۱/۴–۳۲۶/۷ میلی‌متر و طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته در محدوده ۱۸۷/۶–۱۲۳/۲ میلی‌متر برآورد شد (Akbari *et al.*, 2023).

اثر تغییرات اقلیمی بر PMP در ایران به‌طور محدود مطالعه شده است. مثلا افروز و همکاران (Afrooz *et al.*, 2015) تأثیر تغییر اقلیم بر PMP را در حوضه رودخانه چنار راهدار شیراز پیش‌بینی کردند. افزایش مقادیر PMP در دوره ۲۰۴۰–۲۰۱۱ نسبت به دوره پایه (۲۰۰۰–۱۹۷۱) و تحت سناریوهای مختلف، بین ۲۷/۳–۱۸/۲ درصد پیش‌بینی شد. افضلی – گروه و همکاران (Afzali-Gorouh *et al.*, 2022) تأثیر تغییر اقلیم بر PMP را در بخشی از حوضه قره‌سو با استفاده از CMIP5 بررسی کردند. مطابق با نتایج، در دوره پایه (۲۰۱۷–۱۹۸۸) مقدار PMP برابر با ۱۴۳ میلی‌متر و مقدار آن تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۹۸، ۱۰۵ و ۱۰۹ میلی‌متر برای آینده نزدیک (۲۰۴۸–۲۰۱۹) و ۱۲۹، ۱۲۲ و ۱۲۶ میلی‌متر برای آینده دور (۲۰۷۸–۲۰۴۹) پیش‌بینی شد. منجزی و همکاران (Monjezi et al., 2023) برای برآورد مقدار PMP در حوضه آبریز پارسیان در استان فارس، از دو روش هرشفیلد و هرشفیلد – دسا استفاده کردند. مقدار PMP تحت سناریوهای RCP8.5 و RCP4.5 در مقایسه با دوره پایه (۲۰۱۰–۱۹۸۰) در روش هرشفیلد – دسا کاهشی و در روش هرشفیلد افزایشی پیش‌بینی شد.

جدیدترین گزارش هیئت بین دولتی IPCC[1] شامل مدل‌ها و سناریوهای جدیدی است که شرایط اقلیمی متفاوتی را نسبت به گزارش‌های قبلی پیش‌بینی می‌کند. بنابر این، هدف این مطالعه پیش‌بینی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر PMP ایستگاه‌های همدید مختلف ایران با استفاده از گزارش CMIP6[2] شامل سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و مدل HadGEM3-GC31-LL است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

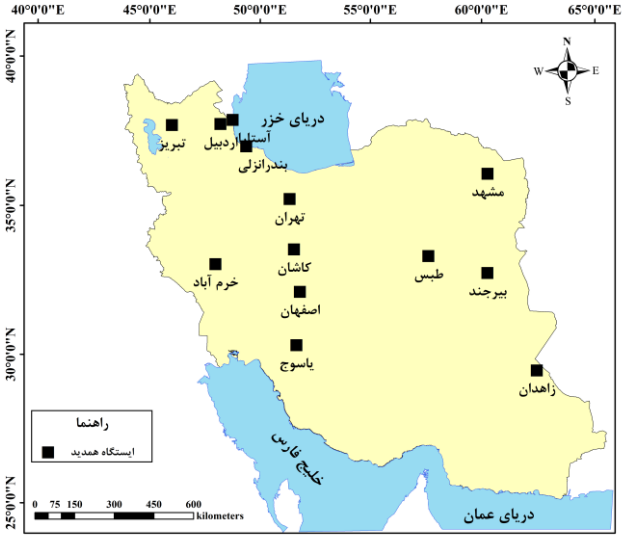
[1] Intergovernmental Panel on Climate Change

[2] Coupled Model Intercomparison Project Phase 6

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

ایران در عرض ۴۰-۲۵ درجه شمالی و طول ۶۳-۴۵ درجه شرقی گسترده شده است و مساحتی در حدود ۱/۶۴۸ میلیون کیلومتر مربع دارد. در این مطالعه از داده‌های متغیرهای اقلیمی ۱۳ ایستگاه همدید ایران (با اقلیم‌های متنوع) در یک دوره زمانی ۳۰ساله (۲۰۲۲-۱۹۹۳) استفاده شد. داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. شکل ۱ موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های همدید منتخب را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های همدید منتخب در ایران
Figure 1. Geographical location of the selected synoptic stations in Iran

در این تحقیق، از داده‌های روزانه بارش (میلی‌متر)، میانگین دمای کمینه (درجهٔ سانتی‌گراد)، میانگین دمای بیشینه (درجهٔ سانتی‌گراد)، میانگین دمای متوسط (درجهٔ سانتی‌گراد) و ساعات آفتابی (ساعت) مربوط به ۱۳ ایستگاه همدید ایران استفاده شد. بی‌تردید، مقدمه هر مطالعه علمی که در آن از داده‌های هواشناسی استفاده می‌شود، بررسی کیفی و صحت‌سنجی داده‌ها است. بدون اطمینان از صحت و کیفیت داده‌ها، نمی‌توان از آن‌ها برای استخراج نتایج بعدی استفاده کرد (Allahverdipour & Sattari, 2023). بازسازی داده‌های گمشده (و پرت) از مهم‌ترین بخش‌های یک پژوهش علمی است. بسته به نوع داده‌ها (دما، بارش و غیره)، روش‌های مختلفی بدین منظور ارائه شده است (Hasanpour Kashani & Dinpashoh 2012). داده‌ها ابتدا مورد بررسی آماری و صحت‌سنجی قرار گرفته و سپس نسبت به تشخیص داده‌های پرت و بازسازی داده‌های گمشده اقدام شد. جدول ۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب، مشخصات آماری و نوع اقلیم ایستگاه‌های همدید ایران را نشان می‌دهد.

جدول ۱- موقعیت جغرافیایی، مشخصات آماری و نوع اقلیم ایستگاه‌های همدید ایران
Table 1. Geographical locations, statistical characteristics, and climate types of the synoptic stations in Iran

ایستگاه همدید Synoptic station	طول جغرافیایی (درجه) Longitude (degrees)	عرض جغرافیایی (درجه) Latitude (degrees)	ارتفاع (m) Altitude (m)	بارش سالانه (mm) Annual precipitation (mm)	میانگین دمای سالانه (°C) Average annual temperature (°C)	نوع اقلیم Climate type
آستارا (Astara)	48.85	38.37	-21.10	1380	15.8	بسیار مرطوب (Per-humid)
بندر انزلی (Bandar Anzali)	49.46	37.48	-23.60	1740.20	17.04	بسیار مرطوب (Per-humid)
یاسوج (Yasuj)	51.56	30.70	1816.30	778.63	15.41	مرطوب (Humid)
اردبیل (Ardabil)	48.33	38.22	1335.20	271.85	9.98	نیمه‌خشک (Semi-Arid)
خرم‌آباد (Khorramabad)	48.28	33.44	1147.80	476.91	17.27	نیمه‌خشک (Semi-Arid)
تبریز (Tabriz)	46.24	38.12	1361.00	255.58	13.61	نیمه‌خشک (Semi-Arid)
مشهد (Mashhad)	59.63	36.24	999.20	231.57	15.97	خشک (Arid)
زاهدان (Zahedan)	60.90	29.47	1370.00	71.62	19.21	خشک (Arid)
بیرجند (Birjand)	59.28	32.89	1491.00	143	16.8	خشک (Arid)
کاشان (Kashan)	51.48	33.97	955.00	126.42	19.59	خشک (Arid)
طبس (Tabas)	56.95	33.60	711.00	76.50	23.19	خشک (Arid)
اصفهان (Esfahan)	51.71	32.52	1550.40	132	17.1	خشک (Arid)
تهران (Tehran)	51.31	35.69	1191.00	233	18.5	خشک (Arid)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

گزارش ششم (CMIP6) هیئت بین دولتی تغییر اقلیم

مدل‌های GCM وضعیت آتی اقلیم مناطق مختلف زمین را در مقیاس جهانی و قاره‌ای ارائه می‌دهند (Wilby & Harris, 2006). این مدل‌ها باهدف بررسی و ارزیابی نحوه تغییر متغیرهای اقلیمی در دوره‌های زمانی گذشته، حال و آینده و باتوجه‌به سناریوهای مختلف تهیه شده‌اند. IPCC از سال ۱۹۹۰ هر چند سال یک‌بار گزارش‌های ارزیابی تغییر اقلیم را منتشر می‌کند. آخرین گزارش IPCC که در قالب گزارش ششم (CMIP6) تدوین شده است، شامل مدل‌های مختلف و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای متفاوت برای آینده است. مثلا در سناریوی خوش‌بینانه (SSP2.6) میزان گرمایش زمین تا حدود ۲ درجهٔ سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. مدل‌های گردش عمومی ارائه شده در گزارش ششم، شکل‌های بهبودیافته گزارش‌های قبلی هستند. از مزایای مدل‌ها و سناریوهای گزارش ششم نسبت به گزارش پنجم، می‌توان به افزایش تعداد لایه‌های عمودی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر وضعیت لایه استراتوسفر اشاره کرد (Frame *et al.*, 2018).

یکی از مشکلات کاربرد مدل‌های GCM، ابعاد سلولی آنها است که کاهش دقت پیش‌بینی‌ها و تحلیل‌های مکانی را به دنبال دارد. بنابراین، در مطالعه تغییرات اقلیمی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی مانند مدل Lars-WG استفاده می‌شود. این مدل با دریافت اطلاعات آب‌وهوای گذشته، مقادیر روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه در آینده را تولید می‌کند (Racsko *et al.*, 1991; Semenov *et al.*, 1998).

در این تحقیق، از خروجی گزارش CMIP6 شامل مدل HadGEM3-GC31-LL تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 (به‌ترتیب ، سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه) برای تولید داده‌های اقلیمی در آینده استفاده شد.

روش آماری هرشفیلد تعمیم‌یافته برای برآورد PMP

متداول‌ترین روش آماری که برای محاسبه حداکثر بارش محتمل (PMP) به کار می‌رود، روش پیشنهادی هرشفیلد (Hershfield, 1961) است. این روش بر اساس مدل فراوانی چاو (Chow, 1951) به شرح رابطه ۱ در نظر گرفته شد.

$$X_t = \bar{X} + K \cdot \sigma_n \qquad (۱)$$

که در آن، $\boldsymbol{X_t}$ حداکثر عمق بارش با دوام معین و با دوره بازگشت t سال است و $\boldsymbol{\bar{X}}$ و $\boldsymbol{\sigma_n}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری زمانی بارش‌های با دوام مذکور در سال‌های مختلف مربوط به دوره آماری هستند. ضمنا K عامل فراوانی است. در تحقیق هرشفیلد (Hershfield, 1961) معلوم شد که اگر ۱۵ برابر انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای هر ایستگاه به میانگین داده‌ها افزوده شود، PMP حاصل می‌شود (رابطه ۲).

$$PMP = \bar{X} + K_m \sigma_n \qquad (۲)$$

که در آن، PMP حداکثر بارش محتمل، و $\boldsymbol{\bar{X}}$ و $\boldsymbol{\sigma_n}$ به‌ترتیب میانگین و انحراف معیار سری حداکثر بارش‌های سالانه استفاده شده در دوره موردمطالعه هستند. $\boldsymbol{K_m}$ نیز عامل فراوانی برای مقادیر حداکثر بارش روزانه مشاهده‌شده در طی سال، برابر با ۱۵ است.

در مطالعات بعدی مشخص شد که استفاده از عدد ثابت ۱۵ برای $\boldsymbol{K_m}$ صحیح نیست. هرشفیلد نموداری تهیه کرد که $\boldsymbol{K_m}$ باتوجه‌به میانگین حداکثر بارش سالانه تعیین شود. سازمان جهانی هواشناسی (WMO, 1986) یافته‌های هرشفیلد را به‌صورت یک دستور کار به شرح زیر منتشر کرد:

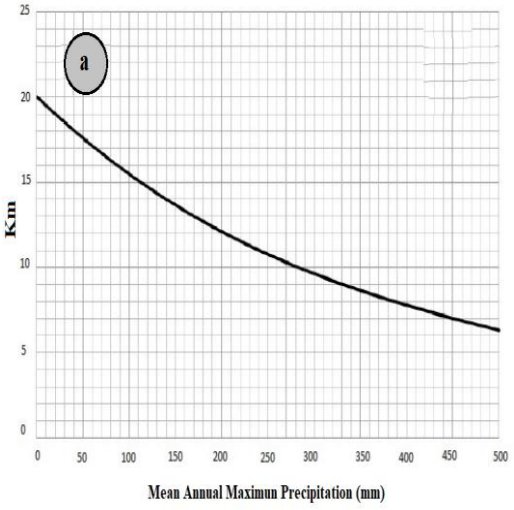
۱. مقدار $\boldsymbol{K_m}$ با استفاده از نمودار و باتوجه‌به مقدار $\boldsymbol{\bar{X}_n}$ به دست می‌آید (شکل ۲–a).

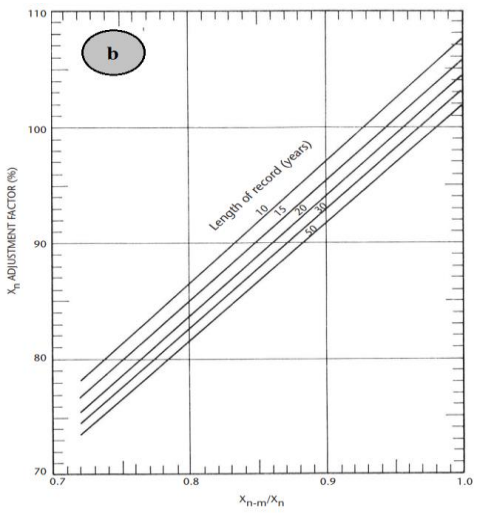
۲. بیشترین مقدار مشاهده‌شده از سری حداکثر بارش‌های با دوام معین در طی دوره آماری حذف می‌شود و $\boldsymbol{\bar{X}_{n-1}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{n-1}}$ که به ترتیب میانگین و انحراف معیار داده‌ها پس از حذف بزرگ‌ترین مشاهده هستند، محاسبه می‌شود.

۳. با توجه به $\boldsymbol{\bar{X}_n}$، $\boldsymbol{\sigma_n}$، $\boldsymbol{\bar{X}_{n-1}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{n-1}}$، ضرایب تصحیح $\boldsymbol{\bar{X}_n}$ و $\boldsymbol{\sigma_n}$ از شکل‌های ۲–b و ۲–c به دست می‌آیند.

۴. با توجه به طول دوره آماری نیز، ضرایب تصحیح دیگری برای $\boldsymbol{\bar{X}_n}$ و $\boldsymbol{\sigma_n}$ از شکل ۲–d به دست می‌آیند.

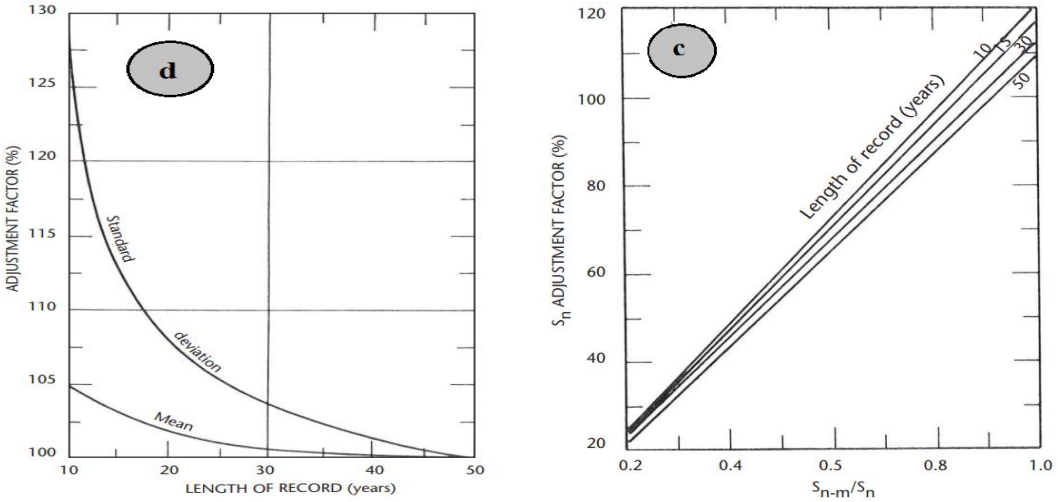
۵. مقادیر $\boldsymbol{\bar{X}_n}$ و $\boldsymbol{\sigma_n}$ تصحیح و مقدار PMP از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.





[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]



شکل ۲- نمودارهای مورداستفاده در محاسبه PMP. a- نمودار K_m تابعی از متوسط حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه، b- ضریب تصحیح میانگین سری سالانه حداکثر بارش ۲۴ ساعته مشاهداتی، c- ضریب تصحیح انحراف معیار سری سالانه حداکثر بارش ۲۴ ساعته مشاهداتی و d- ضریب تصحیح میانگین و انحراف معیار سری سالانه حداکثر بارش ۲۴ ساعته مشاهداتی تابعی از طول دوره آماری (Hershfield, 1961)

Figure 2. Charts used in PMP calculation. a- The chart of K_m as a function of the average annual maximum 24-hour precipitation, b- the correction factor for the average annual series of maximum 24-hour precipitation observations, c- the correction factor for the standard deviation of the annual series of maximum 24-hour precipitation observations, and d- the correction factor of the mean and standard deviation of the annual series of maximum 24-hour precipitation observations as a function of the length of the statistical period (Hershfield, 1961)

روش اصلاحی دسا برای برآورد PMP

برای محاسبه PMP موارد دیگری توسط دسا و همکاران (Desa *et al.*, 2021) اضافه شدند. آنها برای اصلاح رابطه پیشنهادی هرشفیلد، ضریب $\boldsymbol{K_m}$ را مطابق رابطه ۳ ارائه کردند.

$$K_m = \frac{X_1 - \bar{X}_{n-1}}{\sigma_{n-1}} \qquad (۳)$$

که در آن، $\boldsymbol{X_1}$ بزرگترین مشاهده در سری حداکثر بارش‌های با دوام معین در یک دوره آماری است و $\boldsymbol{\bar{X}_{n-1}}$ و $\boldsymbol{\sigma_{n-1}}$ به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری پس از حذف بزرگترین مشاهده هستند.

در این مطالعه از دو روش هرشفیلد تعمیم‌یافته و هرشفیلد- دسا برای محاسبه PMP در دوره پایه و آینده استفاده شد.

معیارهای ارزیابی

برای بررسی عملکرد مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های منتخب در دوره پایه، از معیارهای آماری ضریب همبستگی (r) و جذر میانگین مربعات خطاها (RMSE) به ترتیب از روابط ۴ و ۵ استفاده شد.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{N}(O_{i-}\bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(O_{i-}\bar{O})^2 * \sum_{i=1}^{N}(P_i - \bar{P})^2}} \qquad (۴)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i - O_i)^2}{N}} \qquad (۵)$$

در روابط ۴ و ۵، $\boldsymbol{O(i)}$ مقدار مشاهداتی (واقعی) i ام، $\boldsymbol{P(i)}$ مقدار شبیه‌سازی‌شده i ام، $\boldsymbol{\bar{O}}$ میانگین مقادیر مشاهداتی، $\boldsymbol{\bar{P}}$ میانگین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و N تعداد مشاهدات است. هرچه r بیشتر و RMSE کمتر باشد، دقت مدل بیشتر و عملکرد آن بهتر است.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دوره پایه

نتایج ارزیابی عملکرد مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های منتخب در دوره پایه در جدول ۲ ارائه شده‌اند. مطابق این جدول، در کل ۱۳ ایستگاه منتخب، محدوده معیار r برای بارش بین ۰/۹۹-۰/۹۵ و برای دماهای کمینه و بیشینه برابر با ۰/۹۹ است. محدوده معیار RMSE نیز برای بارش بین ۱/۲۲ و ۱۶/۲۹ میلی‌متر و برای دماهای کمینه و بیشینه به ترتیب در دامنه ۰/۴۲-۰/۱۸ و ۰/۳۲-۰/۱۴ درجهٔ سانتی‌گراد است. مشاهده می‌شود که شبیه‌سازی مقادیر بارش، با دقت کمتر و خطای بیشتری همراه است. این امر می‌تواند به دلیل پراکندگی بیشتر داده‌های بارش نسبت به داده‌های دما باشد. در کل، مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دوره پایه همه ایستگاه‌ها عملکرد قابل‌قبولی دارد.

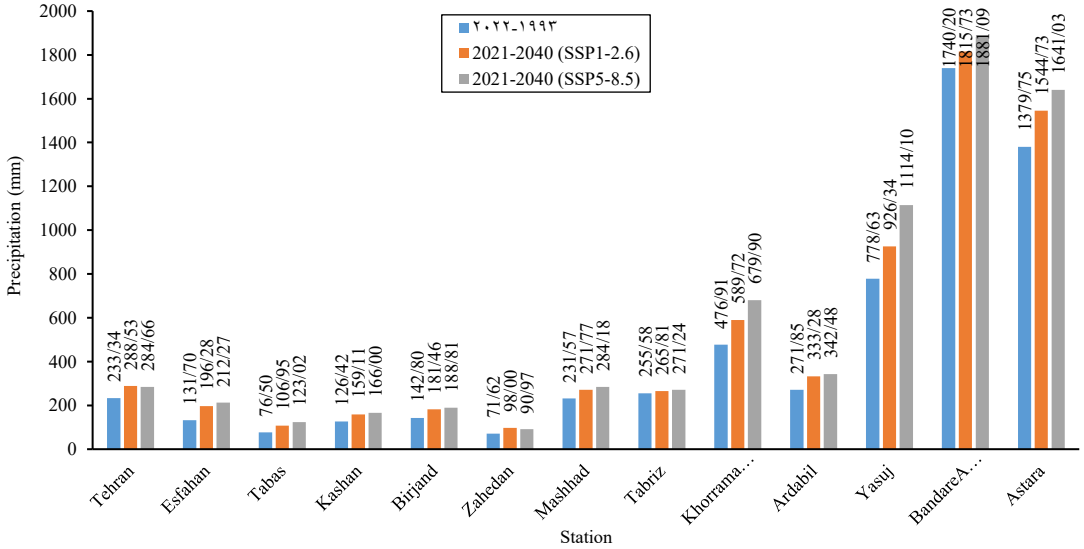
[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

جدول ۲- نتایج ارزیابی عملکرد مدل Lars-WG در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی ایستگاه‌های همدید ایران در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳)
Table 2. The results of evaluating the performance of the Lars-WG model in the simulation of climatic variables of the synoptic stations in Iran in the base period (1993-2022)

دمای بیشینه (°C) Maximum temperature (°C)	دمای کمینه (°C) Minimum temperature (°C)	بارش (mm) Precipitation (mm)	معیار ارزیابی Evaluation criteria	ایستگاه همدید Synoptic station
0.99	0.99	0.99	r	آستارا
0.27	0.18	9.07	RMSE	Astara
0.99	0.99	0.99	r	بندر انزلی
0.31	0.24	16.29	RMSE	Bandar Anzali
0.99	0.99	0.99	r	یاسوج
0.22	0.20	7.56	RMSE	Yasuj
0.99	0.99	0.96	r	اردبیل
0.21	0.42	2.61	RMSE	Ardabil
0.99	0.99	0.99	r	خرم‌آباد
0.27	0.18	3.78	RMSE	Khorramabad
0.99	0.99	0.99	r	تبریز
0.26	0.24	2.40	RMSE	Tabriz
0.99	0.99	0.98	r	مشهد
0.14	0.30	4.62	RMSE	Mashhad
0.99	0.99	0.98	r	زاهدان
0.23	0.23	1.22	RMSE	Zahedan
0.99	0.99	0.99	r	بیرجند
0.32	0.32	1.66	RMSE	Birjand
0.99	0.99	0.98	r	کاشان
0.30	0.21	2.54	RMSE	Kashan
0.99	0.99	0.98	r	طبس
0.25	0.29	1.27	RMSE	Tabas
0.99	0.99	0.93	r	اصفهان
0.24	0.22	3.44	RMSE	Esfahan
0.99	0.99	0.96	r	تهران
0.24	0.29	4.17	RMSE	Tehran

پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۰)

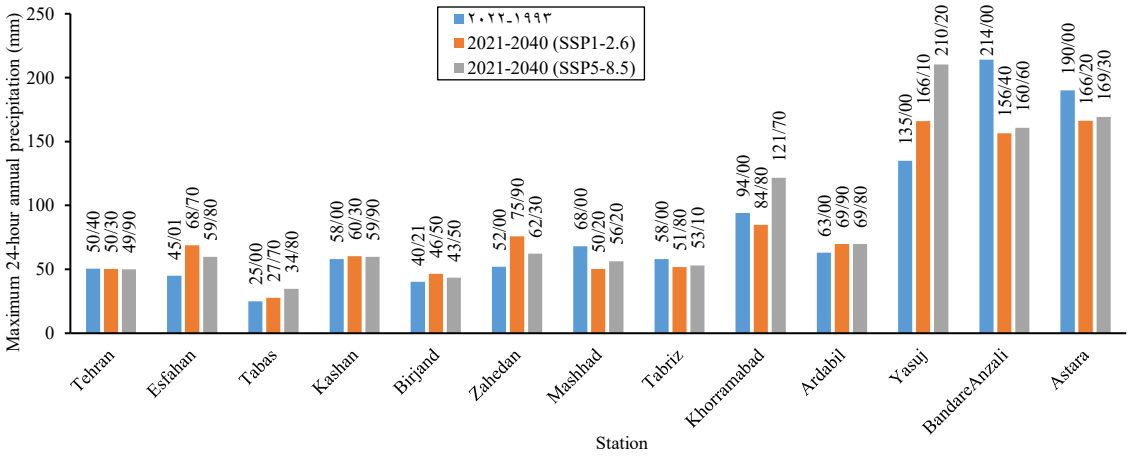
شکل ۳ میانگین بارش سالانه ایستگاه‌های موردمطالعه در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) و مقادیر پیش‌بینی‌شده برای دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰) تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 را نشان می‌دهد. میانگین بارش سالانه ایستگاه‌ها یکسان نیست و در دوره پایه از ۷۱/۶۲ میلی‌متر در ایستگاه زاهدان با اقلیم خشک تا ۱۷۴۰/۲۰ میلی‌متر در بندر انزلی با اقلیم بسیار مرطوب متغیر است. بیشترین درصد افزایش بارش سالانه با ۶۱/۱۸ درصد افزایش نسبت به دوره پایه، در ایستگاه اصفهان و تحت سناریو SSP5-8.5 پیش‌بینی شد. در آینده، میانگین بارش سالانه در همه ایستگاه‌ها و تحت هر دو سناریو مورد بررسی افزایش خواهد یافت. با پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی همچون بارش علاوه بر مدیریت بهره‌برداری از منابع آب، می‌توان حوادث طبیعی نظیر سیل و خشکسالی را نیز پیش‌بینی و مهار کرد (Mohammadi & Allahverdipour, 2024). در تحقیق (Mousavi *et al.* 2016) نیز مقدار بارش در نواحی مختلف ایران در دوره‌های آتی افزایشی گزارش شد. افزایش بارش در حوضه قزل‌اوزن نیز برای دوره آتی گزارش شده است (Sadeqi *et al.*, 2019). تحقیق فونگ و همکاران (Phuong *et al.*, 2024) در شهر هوچی‌مین در ویتنام با استفاده از سناریوهای گزارش CMIP6 نیز حاکی از افزایش بارش سالانه در آینده بود که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد.



شکل ۳- میانگین بارش سالانه (میلی‌متر) ایستگاه‌های همدید ایران در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) و آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱)
Figure 3. Average annual precipitation (mm) of the synoptic stations in Iran in the base period (1993-2022) and future (2021-2040)

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

شکل ۴ مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و پیش‌بینی شده برای دوره آینده تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 را نشان می‌دهد. حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه ایستگاه‌ها در دوره پایه از ۲۵ میلی‌متر در طبس تا ۲۱۴ میلی‌متر در بندر انزلی متغیر است. در دوره آتی، حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در ایستگاه‌های اصفهان، طبس، کاشان، بیرجند، زاهدان، اردبیل و یاسوج تحت هر دو سناریو و در ایستگاه خرم‌آباد تحت سناریو SSP5-8.5 افزایشی است. در ایستگاه‌های تهران، مشهد، تبریز، بندر انزلی و آستارا تحت هر دو سناریو و در خرم‌آباد تحت سناریو SSP1-2.6، کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه پیش‌بینی می‌شود. بیشترین افزایش و کاهش نسبت به دوره پایه، به ترتیب با ۵۵/۷۰+ درصد افزایش در یاسوج و ۲۶/۹۲- درصد کاهش در بندر انزلی است. نتایج تحقیق چان و همکاران (Chan *et al.*, 2024) در هنگ‌کنگ نیز حاکی از افزایش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در آینده بودند که با یافته‌های مطالعه حاضر تطابق دارد. نکته حائز اهمیت، کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در هر دو ایستگاهی است که در اقلیم بسیار مرطوب قرار دارند (بندر انزلی و آستارا). با توجه به افزایش میانگین بارش در همه ایستگاه‌ها، این موضوع نشان‌دهنده بهبود وضعیت توزیع بارش‌ها در طول سال است. از طرفی، در اکثر ایستگاه‌های همدید با اقلیم خشک (پنج ایستگاه از بین هفت ایستگاه)، افزایش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه پیش‌بینی می‌شود. با توجه به این افزایش، در چنین مناطقی بارش‌های یک‌روزه سنگین انتظار می‌رود و برای مقابله با آن، مدیریت منابع آب قوی مورد نیاز است.



شکل ۴- حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه (میلی‌متر) ایستگاه‌های همدید ایران تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) و آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱)

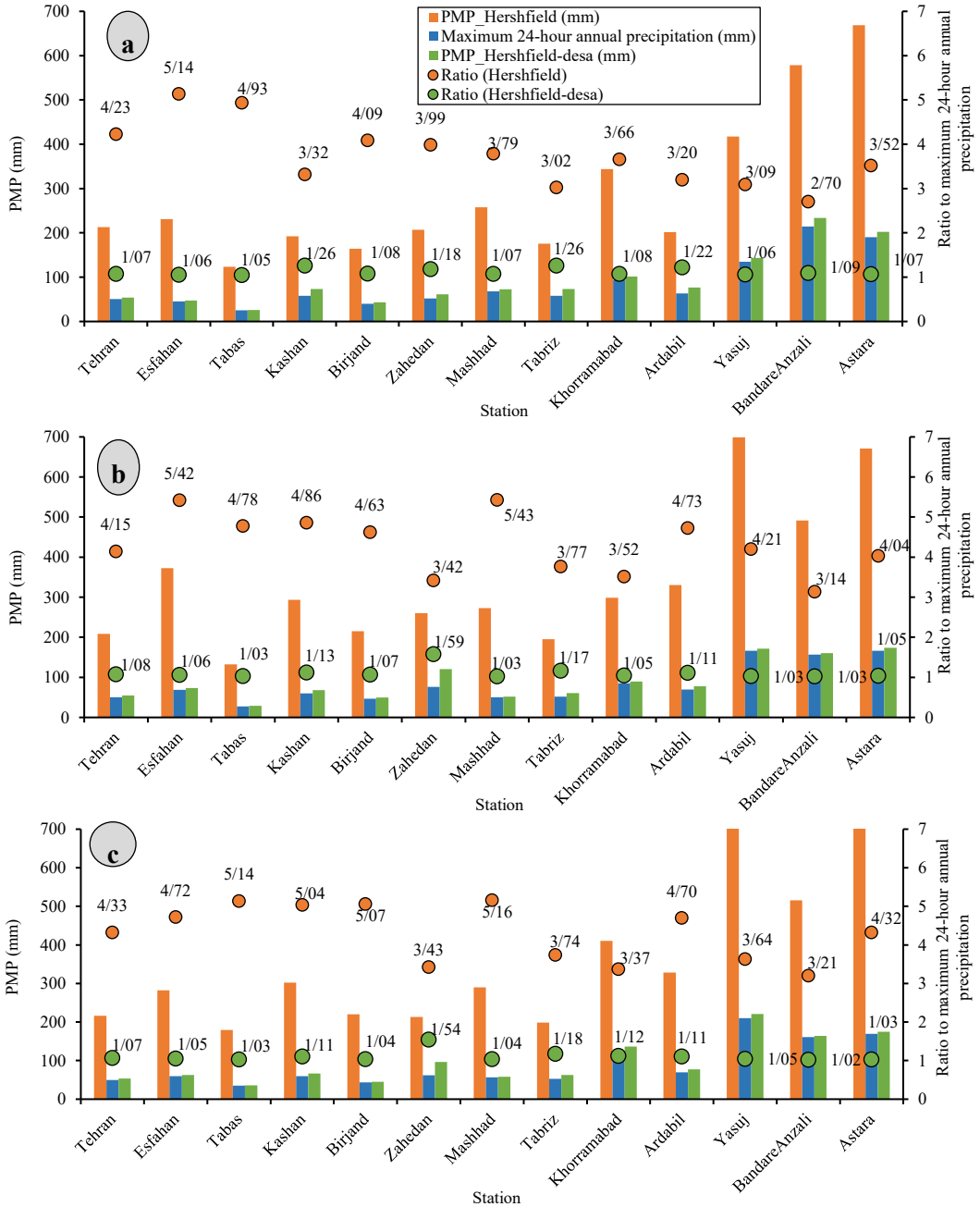
Figure 4. Maximum annual 24-hour precipitation (mm) of the synoptic stations in Iran under the SSP1-2.6 and SSP5-8.5 scenarios in the base period (1993-2022) and future (2021-2040)

پیش‌بینی تأثیر تغییر اقلیم در آینده بر PMP ایستگاه‌های همدید ایران

شکل ۵ مقدار PMP ایستگاه‌های همدید ایران را به دو روش هرشفیلد تعمیم‌یافته و هرشفیلد-دسا و نسبت آن به حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره‌های پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) و آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) نشان می‌دهد. بیشترین نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در دوره پایه، طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته مربوط به ایستگاه اصفهان با ۵/۱۴ و طبق روش دسا مربوط به ایستگاه کاشان با نسبت ۱/۲۶ است. در دوره ۲۰ساله آینده و تحت سناریوی SSP1-2.6 نیز طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته مربوط به ایستگاه مشهد با ۵/۴۳ و طبق روش دسا مربوط به زاهدان با ۱/۵۹ است. همچنین، در دوره ۲۰ساله آینده و تحت سناریو SSP5-8.5 طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته مربوط به ایستگاه مشهد با ۵/۱۶ و طبق روش دسا مربوط به ایستگاه زاهدان با ۱/۵۴ است. مشاهده می‌شود که این نسبت در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، کمی بیشتر از اقلیم‌های مرطوب است. به‌طوری که طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته، نسبت بالای پنج فقط در ایستگاه‌های خشک به‌دست‌آمده است.

نتایج نشان می‌دهند که بیشترین افزایش نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در آینده، متعلق به مشهد است که طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته، این نسبت از ۳/۷۹ در دوره پایه به ۵/۴۳ تحت سناریو SSP1-2.6 در دوره ۲۰ساله آینده افزایش خواهد یافت. همچنین، طبق روش دسا فقط در زاهدان این نسبت (نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه) بیش از ۱/۵ برابر است. این خود هشدار در قبال سیلاب‌های محتمل حاصل از این قبیل بارش‌ها است.

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]



شکل ۵- مقدار PMP (میلی‌متر) و نسبت آن به حداکثر بارش ۲۴ ساعته در ایستگاه‌های همدید ایران. a- در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳)، b- در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) تحت سناریو SSP1-2.6، و c- در دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) تحت سناریو SSP5-8.5.

Figure 5. The value of PMP (mm) and its ratio to the maximum 24-hour precipitation at the synoptic stations in Iran. a- In the base period (1993-2022), b- in the future period (2021-2040) under the SSP1-2.6 scenario, and c- in the future period (2021-2040) under the SSP5-8.5 scenario.

در همه ایستگاه‌ها و در هر دو دوره پایه و آینده، مقدار PMP طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته زیاد و به‌مراتب بیشتر از روش اصلاحی دسا برآورد شده است که نامعقول به نظر می‌رسد. در همه ایستگاه‌ها در دوره پایه و تحت هر دو سناریو برای دوره آینده، نسبت PMP برآوردشده به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه طبق روش اصلاحی دسا در محدوده ۱/۵۹-۱/۰۲ قرار دارد و مورد انتظار است. درحالی‌که در روش هرشفیلد تعمیم‌یافته، این نسبت در محدوده ۵/۴۳-۲/۷۰ برای ایستگاه‌های مختلف متغیر است. این نتیجه با یافته‌های فتاحی و حبیبی (Fattahi & Habibi, 2022) مطابقت دارد. مقادیر این نسبت‌ها، به‌دلیل بیش‌برآورد K_m در روش هرشفیلد تعمیم‌یافته هستند که این ضعف در روش دسا رفع شده است (جدول ۳).

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]
[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

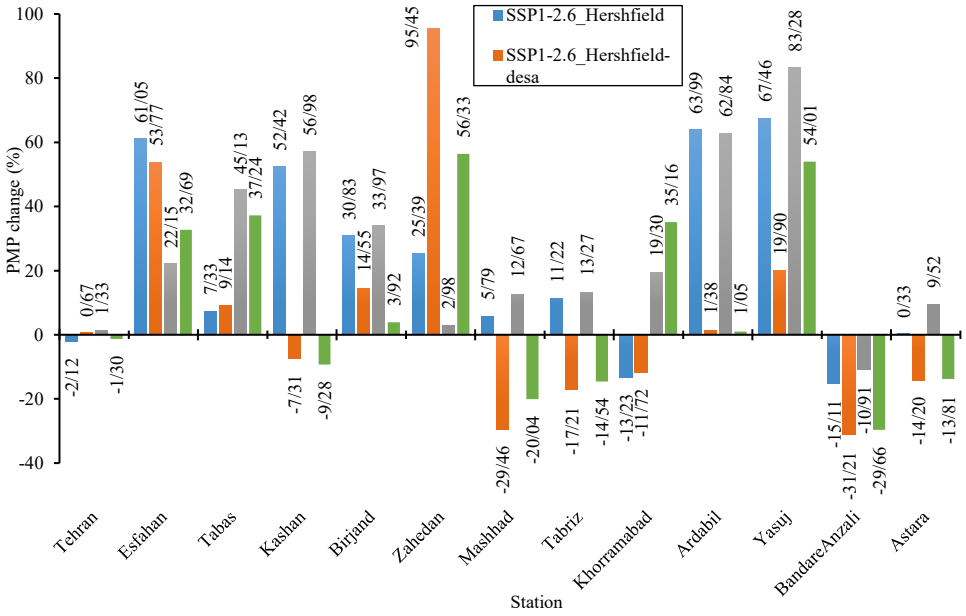
جدول ۳- مقادیر K_m ایستگاه‌های همدید ایران در دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) و آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱)

Table 3. K_m values of synoptic stations in Iran the base period (1993-2022) and the future (2021-2040)

Station	1993-2022		2021-2040 (SSP1-2.6)		2021-2040 (SSP5-8.5)	
	K_m (Generalized Hershfield)	K_m (Hershfield-Desa)	K_m (Generalized Hershfield)	K_m (Hershfield-Desa)	K_m (Generalized Hershfield)	K_m (Hershfield-Desa)
Tehran	18.5	2.89	18.5	2.68	18.5	2.46
Esfahan	19	2.41	18.2	2.14	18.2	2.16
Tabas	19.5	2.33	19.0	1.79	18.8	1.73
Kashan	19	5.11	18.5	2.91	18.5	2.70
Birjand	19	3.04	18.5	2.40	18.5	1.84
Zahedan	19	4.13	19.0	6.47	19.1	6.31
Mashhad	18	2.97	18.2	1.50	18.2	1.80
Tabriz	19	5.36	18.6	3.67	18.6	3.74
Khorramabad	17.5	3.02	17.1	2.39	16.7	3.32
Ardabil	18.5	4.83	18.2	2.81	18.2	2.80
Yasuj	16	2.95	15.0	1.77	14	2.13
Bandar Anzali	14.5	3.45	14.9	1.87	14.5	1.72
Astara	15.5	2.80	15.1	2.00	15	1.66

شکل ۶ درصد تغییرات PMP ایستگاه‌ها را در آینده نسبت به دوره پایه، تحت دو سناریو و طبق هر دو روش هرشفیلد تعمیم‌یافته و هرشفیلد–دسا نشان می‌دهد. مقادیر PMP در اکثر ایستگاه‌های ایران افزایش خواهند یافت. بیشترین افزایش با ۹۵/۴۵ درصد در زاهدان تحت سناریو SSP1-2.6 و طبق روش هرشفیلد–دسا پیش‌بینی می‌شود. در تحقیقات مشابه مثلا یونگ و همکاران (Xiong *et al.*, 2024) در کشور چین و چان و همکاران (Chan *et al.*, 2024) در هنگ‌کنگ که هر دو تحقیق با استفاده از گزارش CMIP6 انجام شدند، افزایش PMP در آینده نسبت به دوره پایه پیش‌بینی شد که با یافته‌های این مطالعه هم‌راستا است.

کاهش PMP تحت هر دو سناریو و طبق هر دو روش هرشفیلد تعمیم‌یافته و هرشفیلد – دسا، فقط در بندر انزلی خواهد بود. به‌طوری که بیشترین کاهش با ۳۱/۲۱- نسبت به دوره پایه، تحت سناریو SSP1-2.6 و طبق روش هرشفیلد–دسا در این ایستگاه پیش‌بینی می‌شود. به‌جز تهران که کمترین درصد تغییرات تحت سناریوهای مختلف را دارد، درصد تغییرات PMP در آینده در اکثر اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم‌های مرطوب خواهد بود.



شکل ۶- درصد تغییرات PMP در آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۲۲-۱۹۹۳) در ایستگاه‌های همدید ایران

Figure 6. The percentage of PMP changes in the future (2040-2021) compared to the base period (1993-2022) at the synoptic stations in Iran

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق، اثر تغییر اقلیم بر مقادیر PMP سیزده ایستگاه همدید ایران، با استفاده از گزارش CMIP6 شامل سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و مدل HadGEM3-GC31-LL پیش‌بینی شد. نتایج نشان می‌دهند که میانگین بارش سالانه در همه ایستگاه‌ها و تحت هر دو سناریو افزایشی خواهد بود. بیشترین درصد افزایش نسبت به دوره پایه، متعلق به اصفهان تحت سناریو SSP5-8.5 پیش‌بینی می‌شود. با وجود این‌که تأثیر تغییر اقلیم بر میانگین بارش سالانه در همه ایستگاه‌ها افزایشی است، باید از نحوه توزیع بارش در طول سال غافل نماند. این مطالعه نشان می‌دهد که حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در ایستگاه‌های همدید اصفهان، طبس، کاشان، بیرجند، زاهدان، اردبیل و یاسوج تحت هر دو سناریو و در خرم‌آباد تحت سناریو SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین در تهران، مشهد، تبریز، بندر انزلی و آستارا تحت هر دو سناریو و در ایستگاه خرم‌آباد تحت سناریو SSP1-2.6 کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه پیش‌بینی می‌شود. بیشترین افزایش و کاهش نسبت به دوره پایه به‌ترتیب در یاسوج و بندر انزلی خواهند بود. کاهش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در بندر انزلی و آستارا با اقلیم بسیار مرطوب، باتوجه به پیش‌بینی افزایش میانگین بارش، نشان‌دهنده بهبود توزیع بارش‌ها در طول سال است. از طرفی، در اکثر ایستگاه‌های با اقلیم خشک (پنج ایستگاه از بین هفت ایستگاه)، افزایش حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه پیش‌بینی می‌شود. بیشترین نسبت PMP به حداکثر بارش ۲۴ ساعته سالانه در ایستگاه‌های با اقلیم خشک است. طبق روش هرشفیلد، نسبت بالای ۵ فقط در ایستگاه‌های با اقلیم خشک به‌دست آمد و پیش‌بینی می‌شود که بیشترین نسبت در آینده طبق روش دسا، متعلق به ایستگاه زاهدان با اقلیم خشک خواهد بود. بیشترین افزایش این نسبت نیز در مشهد با اقلیم خشک دیده شد. به نظر می‌رسد که پیامدهای تغییر اقلیم در اقلیم‌های خشک، مخرب‌تر و خسارت‌بارتر باشد و توجه به مدیریت سیل در این مناطق ضروری است.

مقدار PMP طبق روش هرشفیلد تعمیم‌یافته در همه ایستگاه‌ها و در هر دو دوره پایه و آینده، زیاد و به‌مراتب بیشتر از روش اصلاحی دسا برآورد شد. ولی مقادیر برآورد شده با روش اصلاحی دسا واقعی‌تر به‌نظر می‌رسد. علت این موضوع، برآورد مقدار عامل فرکانس (K_m) بالا در روش هرشفیلد تعمیم‌یافته است که در روش دسا تصحیح شده است.

مطابق با نتایج، مقدار PMP در اکثر ایستگاه‌های همدید ایران افزایش خواهد یافت. بیشترین افزایش در زاهدان تحت سناریو SSP1-2.6 و کاهش PMP تحت هر دو سناریو، فقط در ایستگاه بندر انزلی پیش‌بینی می‌شود. همچنین، به‌جز تهران که کمترین درصد تغییرات PMP تحت سناریوهای مختلف را خواهد داشت، درصد تغییرات PMP در آینده در اکثر اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک بیشتر از اقلیم‌های مرطوب خواهد بود. نتایج تحقیق حاضر می‌توانند در مدیریت منابع آب ایران کاربردی باشند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از سازمان هواشناسی ایران به‌خاطر مساعدت در ارائه داده‌های موردنیاز سپاسگزاری می‌نمایند.

References

Afrooz, H., Akbari, H., Rakhshandehroo, G.R., & Pourtouiserkani, A. (2015). Climate change impact on probable maximum precipitation in Chenar-Rahdar River basin. Watershed Management Symposium, Virginia, USA. doi: 10.1061/9780784479322.004

Afzali-Gorouh, Z., Faridhosseini, A., Bakhtiari, B., Mosaedi, A., & Salehnia, N. (2022). Monitoring and projection of climate change impact on 24-h probable maximum precipitation in the Southeast of Caspian Sea. *Natural Hazards, 114*(1), 77-99. doi: 10.1007/s11069-022-05380-1

Akbari, G., Lotfi, I., & Nejatbakhsh, M. (2023). Statistical estimation of the maximum possible 24-hour rainfall in the Bakhtegan catchment area. *Extension and Development of Watershed Management, 11*(42), 60-70. doi: 10.22034/wmji.2023.710724 [In Persian]

Allahverdipour, P., & Sattari, M. T. (2023). Comparing the performance of the multiple linear regression classic method and modern data mining methods in annual rainfall modeling (Case study: Ahvaz city). *Water and Soil Management and Modelling, 3*(2), 125-142. doi: doi:10.22098/mmws.2022.11337.1120 [In Persian]

Allahverdipour, P., Ghorbani, M. A., & Asadi, E. (2024). Evaluating the effects of climate change on the climatic classification in Iran. *Water and Soil Management and Modelling,* 4(3), 95-112. doi: 10.22098/mmws.2023.12755.1271 [In Persian]

Bakhtiari, B., Jahandideh, Z., & Qaderi, K. (2017). Derivation of Depth-Area-Duration curves for estimating areal Probable Maximum Precipitation in Fars province. *Iran-Water Resources Research, 13*(2), 199-206. [In Persian]

Bari, S. H. (2021). Estimating probable maximum precipitation for Bangladesh. *International Journal of Hydrology Science and Technology, 11*(4), 415-421. doi: 10.1504/IJHST.2021.115489

Bethlahmy, N. (1984). Long-term Hydrologic Events from Short-term Records. *Journal of Hydrology, 68*(1-4), 141-148. doi: 10.1016/0022-1694(84)90208-7

Chan, S. S., Li, J., & Lee, T. C. (2024). Estimation of probable maximum precipitation (PMP) in Hong Kong under future changing climate based on statistical downscaling. *Urban Climate, 55*, 101988. doi: 10.1016/j.uclim.2024.101988

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

Chen, H. P., Sun, J. Q., & Li, H. X., (2017). Future changes in precipitation extremes over China using the NEX-GDDP high-resolution daily downscaled data-set. *Atmospheric and Oceanic Science Letters, 10*(6), 403-410. doi: 10.1080/16742834.2017.1367625.

Chow, V. T. (1951). A general formula for hydrologic frequency analysis. *Transactions American Geophysical Union, 32*(2), 231-237. doi: 10.1029/TR032i002p00231

Clark, C., & Dent, J. (2021). New estimates of 24-hour probable maximum precipitation (PMP) for the British Isles. *Journal of Geoscience and Environment Protection, 9*(7), 209-228. doi: 10.4236/gep.2021.97014

Desa, M. N., Noriah, A. B., & Rakhecha, P. R. (2001). Probable maximum precipitation for 24 h duration over Southeast Asia monsoon region-Selangor, Malaysia. *Atmospheric Research, 58*(1), 41-54. doi: 10.1016/S0169-8095(01)00070-9

Eliason, J. (1997). A Statistical model for extreme precipitation. *Water Resources Research, 33*(3), 449-455. doi: 10.1029/96WR03531

Farmanara, S. M., & Bakhtiari, B. (2020). Evaluation of two physical and statistical approaches in probable maximum precipitation estimation in Bushehr province. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage, 13*(6), 1612-1622. [In Persian]

Fattahi, E., & Habibi, M. (2022). Estimation of probable maximum precipitation 24-h (PMP 24-h) through statistical methods over Iran. *Water Supply, 22*(8), 6543-6557. doi: 10.2166/ws.2022.281

Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A. G., Reisinger, A., & Daigneault, A. (2018). Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. *Climate Risk Management, 21*, 39-51. doi: 10.1016/j.crm.2018.05.001

Ghahraman, B., Hossein-Poor Tehrani, M., Farahi, G., & Davari, K. (2011). A comparative study for determination of PMP by some statistical methods in Atrak watershed, Iran. *Iran-Water Resources Research, 7*(2), 61-70. [In Persian]

Hasanpour Kashani, M., Dinpashoh, Y. (2012). Evaluation of efficiency of different estimation methods for missing climatological data. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 26*, 59-71. doi: 10.1007/s00477-011-0536-y

Hershfield, D. M. (1961). Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of the Hydraulics Division, 87*(5), 99-116. doi: 10.1061/JYCEAJ.0000651

Hussain, M., Nadya, S., & Chia, F. J. (2014). Estimating probable maximum precipitation for Linau river basin in Sarawak. *Journal of Civil Engineering, Science and Technology, 5*(3), 1-5. doi: 10.33736/jcest.138.2014

Kim, S., Sharma, A., Wasko, C., & Nathan, R. (2022). Linking total precipitable water to precipitation extremes globally. *Earths Future, 10*, e2021EF002473. doi: 10.1029/2021EF002473

Kunkel, K.E., Karl, T.R., Easterling, D.R., Redmond, K., Young, J., Yin, X., & Hennon, P. (2013). Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters, 40*(7), 1402-1408. doi: 10.1002/grl.50334.

Lee, O., Park, Y., Kim, E.S., & Kim, S., (2016). Projection of Korean probable maximum precipitation under future climate change scenarios. *Advances in Meteorology*, 3818236. doi: 10.1155/2016/3818236

Lin, P., He, Z., Du, J., Chen, L., Zhu, X., & Li, J. (2018). Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: Historical trends and projected changes. *International Journal of Climatology, 38*(7), 2980-2993. doi: 10.1002/joc.5477

Mohammadi, M., & Allahverdipour, P. (2024). Uncertainty analysis of artificial neural network (ANN) and support vector machine (SVM) models in predicting monthly river flow (Case study: Ghezelozan River). *Water and Soil Management and Modelling*, *4*(2), 311-326. doi: 10.22098/mmws.2023.12702.1267 [In Persian]

Monjezi, S., Gandomkar, A., Zarei, H., & Abbasi, A. (2023). Estimation of probable maximum precipitation under climate change in Parsian basin. *Irrigation Sciences and Engineering, 45*(4), 31-48. doi: 10.22055/jise.2019.29703.1848 [In Persian]

Mousavi, S. S., Karandish, F., & Tabari, H. (2016). Temporal and spatial variation of rainfall in Iran under climate change until 2100. *Irrigation and Water Engineering, 7*(1), 152-165. [In Persian]

Phuong, D. N. D., Vu, N. D., & Loi, N. K. (2024). Historical trends and future projections of annual rainfall from CMIP6 models in Ho Chi Minh City, Vietnam. *Climate Research, 92*, 97-115. doi: 10.3354/cr01736

Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling, 57*(1-2), 27-41. doi: 10.1016/0304-3800(91)90053-4

Rastogi, D., Kao, S. C., Ashfaq, M., Mei, R., Kabela, E. D., Gangrade, S., Naz, B. S., Preston, B. L., Singh, N. & Anantharaj, V.G. (2017). Effects of climate change on probable maximum precipitation: A sensitivity study over the Alabama-Coosa-Tallapoosa River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122*(9), 4808-4828. doi: 10.1002/2016JD026001

Sarkar, S., & Maity, R. (2020). High-resolution one-day probable maximum precipitation dataset across India and its future-projected changes over India. *Data in Brief, 30*, 105525. doi: 10.1016/j.dib.2020.105525

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]

Sadeqi, A., Dinpashoh, Y., & Zarghami, M. (2019). Projection and spatial analysis of agroclimatic indices in Ghezel Ozan River basin during the growing season. *Water and Soil Resources Conservation, 9*(1), 139-162 (In Persian).

Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., & Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research, 10*(2), 95-107. doi: 10.3354/cr010095

Shafiee, M., & Ghahraman, B. (2009). Investigation of spatial variation of 24-hour PMP in Ghareghoom basin. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage, 3*(2), 50-59. [In Persian]

Thuy, L. T., Kawagoe, S., & Sarukkalige, R. (2019). Estimation of probable maximum precipitation at three provinces in Northeast Vietnam using historical data and future climate change scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies, 23*, 100599. doi: 10.1016/j.ejrh.2019.100599

Visser, J. B., Kim, S., Wasko, C., Nathan, R., & Sharma, A. (2022). The impact of climate change on operational probable maximum precipitation estimates. *Water Resources Research, 58*(11), e2022WR032247. doi: 10.1029/2022WR032247Wilby, R. L., & Harris. I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research, 42*(2), W02419. doi: 10.1029/2005WR004065

World Meteorological Organization (WMO). (1986). Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation (PMP), 2nd edition, 298p. World Meteorological Organization, Geneva.

Xiong, J., Guo, S., Abhishek, Yin, J., Xu, C., Wang, J., & Guo, J. (2024). Variation and attribution of probable maximum precipitation of China using a high-resolution dataset in a changing climate. *Hydrology and Earth System Sciences, 28*(8), 1873-1895. doi: 10.5194/hess-28-1873-2024

[Downloaded from jwmr.sanru.ac.ir on 2026-11-09]

[DOI: 10.61882/jwmr.2026.1299]