



## Investigation of Climate Change Impact on 24-h Probable Maximum Precipitation in a Sub-Humid Climate

Z. Afzali-Gorouh<sup>1</sup>, A. Faridhosseini<sup>2\*</sup>, and B. Bakhtiari<sup>3</sup>

### Abstract

In this study, the impact of climate change on 24-h probable maximum precipitation (PMP<sub>24</sub>) was investigated in a part of Qareh-Su basin located in Golestan province, northern Iran. For this purpose, the daily and hourly climatic data during years 1987–2017 were applied. In order to generate future data, the outputs of CanESM2 model as a general circulation model (GCM) were used in two near and far future periods under three emission scenarios including optimistic (RCP 2.6), middle (RCP 4.5) and pessimistic (RCP 8.5) and statistical downscaling model (SDSM). The PMP<sub>24</sub> values were estimated using physical, Hershfield standard and revised methods in the baseline and future periods under the three scenarios. The PMP<sub>24</sub> value was estimated 421 mm for the baseline period, using Hershfield standard method. This value was obtained respectively under the three RCP scenarios as 202, 228, and 213, for the near future and 216, 201, and 230 mm for the far future. The result of Hershfield revised method was 230 mm for the baseline period. The PMP<sub>24</sub> values under the three scenarios were calculated as 81, 85, and 76 mm for the near future, and 83, 80, and 79 mm for the far future, respectively. The PMP<sub>24</sub> resulted from physical method was 143 mm for the baseline period and 98, 105, and 109 for the near future, and 129, 122, and 126 mm for the far future period, respectively. The results showed that the PMP<sub>24</sub> values tend to decrease at the rate of 18-21% in the physical method, 49% in the Hershfield standard method and 65% in the Hershfield revised method. Overall, the PMP<sub>24</sub> values tend to decrease in the future and the rate of decrease in the near future was more than the rate of the far future. The spatial distribution maps of PMP<sub>24</sub> in the baseline and the future periods showed that the PMP<sub>24</sub> values decreased from west to east. Comparison of these values indicated that PMP values obtained from physical method were closer to the actual precipitation of basin and this method obtains more accurate PMP estimates in the study area.

**Keywords:** Extreme Rainfall, Widespread Storms, Maximum 24-h Precipitation, Climate Scenarios.

Received: November 30, 2018

Accepted: February 8, 2019

## بررسی اثر تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته در یک اقلیم نیمه مرطوب

زهرا افزالی گرو<sup>۱</sup>، علیرضا فریدحسینی<sup>۲\*</sup> و بهرام بختیاری<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته (PMP<sub>24</sub>) در قسمتی از حوزه آبریز قره‌سو واقع در استان گلستان بررسی شد. به این منظور از داده‌های اقلیمی در مقیاس‌های زمانی ساعتی و روزانه طی دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۱۷ استفاده شد. جهت تولید داده‌های آینده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جو (CanESM2) تحت سه سناریوی خوش‌بینانه (RCP 2.6)، حد وسط (RCP 4.5) و بدبینانه (RCP 8.5) و مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) در دو دوره آینده نزدیک و دور استفاده گردید. مقادیر PMP<sub>24</sub> با روش‌های همدیدی، استاندارد و تجدید نظر شده هرشفیلد در دوره‌های زمانی پایه و آینده تحت سه سناریو محاسبه شدند. مقدار PMP<sub>24</sub> با استفاده از روش استاندارد Hershfield در دوره پایه ۴۲۱ میلی‌متر محاسبه شد. این مقادیر تحت سناریوهای RCP، برای دوره آینده نزدیک ۲۰۲، ۲۲۸ و ۲۱۳ و برای دوره آینده دور ۲۰۱، ۲۱۶ و ۲۳۰ میلی‌متر به دست آمدند. نتیجه حاصل از روش تجدید نظر یافته Hershfield در دوره پایه ۲۳۰ میلی‌متر بود. مقادیر PMP<sub>24</sub> تحت سه سناریو در دوره آینده نزدیک ۸۱، ۸۵ و ۷۶ و در دوره آینده دور ۸۳، ۸۰ و ۷۹ میلی‌متر محاسبه شدند. مقدار PMP<sub>24</sub> حاصل از روش همدیدی در دوره پایه ۱۴۳ میلی‌متر به دست آمد. این مقادیر در آینده نزدیک ۹۸، ۱۰۵ و ۱۰۹ و در آینده دور ۱۲۹، ۱۲۲ و ۱۲۶ میلی‌متر به دست آمد. نتایج نشان داد که PMP در روش همدیدی ۲۱-۱۸ درصد، در روش استاندارد Hershfield ۴۹ درصد و در تجدید نظر یافته Hershfield ۶۵ درصد کاهش یافت. به طور کلی عمق PMP<sub>24</sub> در دوره‌های آینده کاهش یافته و شدت کاهش در دوره آینده نزدیک بیش‌تر بود. نقشه‌های توزیع مکانی PMP<sub>24</sub> در دوره‌های پایه و آینده، نشان داد که عمق PMP<sub>24</sub> از غرب به شرق کاهش یافت. مقایسه این مقادیر نشان داد مقادیر حاصل از روش همدیدی به بارش‌های واقعی حوزه نزدیک‌تر بوده و تخمین‌های دقیق‌تری از PMP<sub>24</sub> در این منطقه به دست می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** بارش‌های حدی، توفان‌های فراگیر، حداکثر بارش ۲۴ ساعته، سناریوهای اقلیمی.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۹/۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۱/۱۹

1- Ph.D. Candidate in Agricultural Meteorology, Water Engineering Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

2- Associate Professor, Water Engineering Department, College of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: [farid-h@um.ac.ir](mailto:farid-h@um.ac.ir)

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دانشیار بخش مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۸ امکانپذیر است.

Edraki (2010) در جنوب غرب ایران اشاره کرد. علیرغم مطالعاتی که جهت برآورد PMP در ایران انجام شده، اثر تغییر اقلیم بر PMP کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است به طوری که می‌توان به مطالعات محدودی نظیر (Jahandideh (2017) و (Afrooz et al. (2015) در استان فارس، (Ramak et al. (2017) در حوزه رود کارون و (Motallebi and Saghafian (2013) در حوزه سد گلستان اشاره کرد. (Afrooz et al. (2015) اثر تغییرات اقلیمی آبی بر PMP را در استان فارس با استفاده از روش استاندارد Hershfield بررسی کردند. نتایج نشان‌گر ۱/۳ درصد افزایش در عمق PMP در دوره آینده بودند. در همین منطقه (Jahandideh, 2017) مقادیر PMP را با استفاده از روش‌های آماری (استاندارد و تجدید نظر شده Hershfield) و همدیدی تحت شرایط تغییر اقلیم برآورد کرد. در این مطالعه از سناریوهای جدید RCP<sup>۲</sup> با عنوان نماینده‌های خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای استفاده شد. این سناریوها که در گزارش پنجم IPCC مطرح شده‌اند بر اساس میزان واداشت تابشی در سال ۲۱۰۰ دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP2.6 (سناریوی خوش‌بینانه)، RCP4.5 و RCP6 (سناریوهای حد وسط) و RCP8.5 (سناریوی بدبینانه) هستند. میزان واداشت تابشی در سناریوهای مذکور در سال ۲۱۰۰ به ترتیب ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر مترمربع برآورد شده است (IPCC, 2014). نتایج این مطالعه نشان داد که نرخ افزایش PMP در این منطقه بین ۱۴ تا ۱۹ درصد است. در دنیا نیز مطالعات محدودی در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل انجام شده است. از جمله می‌توان به مطالعه (Lee and Kim (2018) اشاره کرد. در این تحقیق اثر تغییر اقلیم بر PMP کشور کره با استفاده از سه مدل منطقه‌ای اقلیم و تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بررسی شد. نتایج نشان داد که توزیع فضایی PMP های آینده شبیه به حال حاضر بوده اما عمق آن در آینده افزایش می‌یابد. علاوه بر این تفاوت بین PMP های تخمین زده شده نشان داد که پس از ۲۰۷۰ افزایش بیش‌تری در عمق PMP ایجاد خواهد شد. در زمینه بررسی اثر تغییر اقلیم بر PMP در ایالات متحده آمریکا می‌توان به مطالعات (Stratz and Hossain, Lagos-Zúñiga and Vargas (2014) و (Rastogi et al. (2017) و (Chen et al. (2017) اشاره کرد که در همه آن‌ها PMP دارای روند افزایشی است. به عنوان نمونه، در مناطق شمال غربی اقیانوس آرام مقادیر PMP در در دوره آینده با افزایش ۳۰ تا ۸۰ درصدی تحت سناریوی RCP8.5 مواجه می‌شود که این افزایش ناشی از افزایش دمای سطح دریا و میزان رطوبت در دسترس می‌باشد (Chen et al., 2017). تغییرات افزایشی مقادیر PMP در مناطق جنوب شرقی ایالات متحده در آینده نزدیک و دور به ترتیب ۲۰ و ۴۲ درصد محاسبه شده است (Rastogi et al., 2017). نتایج حاصل از مطالعه (Kunkel et al. (2013) نشان‌دهنده افزایش

یکی از پیامدهای افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی در دهه‌های اخیر، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای است که موجب ایجاد تغییراتی در اقلیم و خرداقلیم برخی از مناطق شده است. بر اساس آخرین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، متوسط دمای جو تا پایان قرن جاری بسته به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ۱/۸ تا ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. هم‌چنین تغییر اقلیم سبب تغییر در الگوی بارش‌ها به ویژه بارش‌های حدی و حداکثر بارش محتمل (PMP)<sup>۲</sup> می‌شود (IPCC, 2014). PMP برابر با بیش‌ترین ارتفاع بارش برای یک تداوم مشخص است که امکان رخداد آن از نظر فیزیکی در یک محدوده جغرافیایی و در یک زمان معین از سال وجود داشته باشد. از PMP برای محاسبه حداکثر جریان در طراحی سازه‌هایی با ریسک بالا مانند سدها و نیروگاه هسته‌ای استفاده می‌شود (WMO, 2009). هم‌چنین با استفاده از PMP و مدل‌های بارش-رواناب می‌توان حداکثر سیلاب محتمل (PMF)<sup>۳</sup> را محاسبه کرد (Nathan et al., 2016). محاسبه PMF بر اساس شرایط حدی و استثنایی عواملی هم‌چون PMP، تداوم بارندگی، توزیع زمانی بارندگی و نفوذ انجام می‌گیرد که داده‌ها و اطلاعات زیادی را می‌طلبد (Beauchamp et al., 2013). مد نظر قرار دادن PMF می‌تواند به عنوان عامل اطمینان‌بخش در این زمینه منظور گردد. جهت محاسبه PMP دو روش کلی آماری و هیدرومئتئورولوژیک وجود دارد که روش اخیر مبتنی بر انتقال و حداکثرسازی رگبارهای بیشینه ثبت شده است در حالی که روش آماری مبتنی بر تجزیه و تحلیل فراوانی بارش است. در روش آماری، PMP عبارت است از حد نهایی بارش، که با توجه به مشخصات اقلیمی منطقه قابل توجیه می‌باشد. این روش اغلب برای دستیابی به یک برآورد سریع و ساده در حوضه‌های کوچک استفاده می‌شود و زمانی که داده‌های هواشناسی نظیر دمای نقطه شبنم و سرعت باد در دسترس نیستند اما داده‌های طولانی مدت بارش موجود است، سودمند می‌باشد (WMO, 2009). در ایران مطالعات متعددی در زمینه برآورد حداکثر بارش محتمل با تکیه بر روش‌های آماری انجام شده است. از این جمله می‌توان به مطالعات (Rezaee-pazhand and Ghahraman (2006)، (Ghahraman (2008)، (Shafiei and Ghahraman (2009) و (Ghahraman et al. (2011) در شمال شرق ایران، (Bakhtiari et al. (2016a) در نیمه جنوب غربی استان گلستان، (Bakhtiari et al. (2016b) در استان گیلان و نیز مطالعه (Khalili (1999) در قالب طرح ملی برآورد PMP در گستره ایران اشاره کرد. در زمینه برآورد PMP با روش همدید نیز می‌توان به مطالعات (Afzali-Gorouh et al. (2018) در نیمه جنوب غربی استان گلستان، (Azizi and Hanafi (2011) در شمال غرب ایران و (Fattahi and

اطمینان این سازه‌ها در برابر پدیده‌های حدی اطمینان حاصل شود. لذا پژوهش حاضر جهت دستیابی به این اهداف انجام شد: ۱) برآورد PMP<sub>24</sub> در دوره مشاهداتی با استفاده از روش آماری (روش استاندارد و تجدید نظر یافته Hershfield)، ۲) محاسبه PMP<sub>24</sub> در دوره مشاهداتی با استفاده از روش همدیدی، ۳) بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر PMP<sub>24</sub> با استفاده از روش‌های آماری مذکور تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دو دوره آینده نزدیک و دور، ۴) ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر PMP<sub>24</sub> با استفاده از روش همدیدی تحت سه سناریوی مذکور در دو دوره آتی، ۵) مقایسه نتایج حاصل از روش‌های مورد استفاده در دوره‌های مشاهداتی و آینده و ۶) تعیین روند تغییرات PMP<sub>24</sub> در دوره‌های آینده در بخشی از حوزه آبریز قره‌سو.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبریز قره‌سو با مساحت ۱۷۶۰ کیلومترمربع در جنوب غرب استان گلستان واقع شده و ۸ درصد از مساحت این استان را دربر می‌گیرد (شکل ۱). این منطقه در محدوده ۲۱° ۵۴' تا ۳۳° ۵۴' طول شرقی و ۳۶° ۳۶' تا ۵۹° ۳۶' عرض شمالی واقع شده و بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش یافته دارای اقلیم نیمه‌مرطوب گرمسیر، نیمه‌مرطوب معتدل و مرطوب معتدل است (Rahimi et al., 2013). کم‌ارتفاع‌ترین و مرتفع‌ترین ایستگاه‌های این منطقه به ترتیب سیاه‌آب و شصت‌کلاته با ارتفاع ۲۶- و ۱۵۰ متر بالاتر از سطح دریا هستند (جدول ۱).

مقادیر PMP در دوره‌های آینده نزدیک و دور تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 میزان تغییرات در سناریوی RCP8.5 دو برابر سناریوی RCP4.5 و در آینده دور دو برابر آینده نزدیک خواهد بود که این افزایش به دلیل میزان بالای رطوبت جوی و انتقال رطوبت از لایه‌های بالاتر به توفان می‌باشد. اثر تغییر اقلیم بر PMP در کشور کانادا نیز بررسی شده و نشان داده شد که تغییر اقلیم نه تنها بر روی بارش و دما در این منطقه اثر می‌گذارد بلکه حداکثر آب قابل بارش ماهانه، ضرایب حداکثرسازی و PMP را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Beauchamp et al., 2013; Rousseau et al., 2014). علیرغم روند افزایشی در مطالعات مذکور، Jakob et al. (2009) اثر تغییر اقلیم بر مقادیر PMP در استرالیا را تحت سه سناریوی A1B، B2 و A2 مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که تغییرات PMP در این منطقه دارای روندی کاهشی است. به طور کلی وجود تناقض و عدم هم‌سویی میان نتایج مطالعات متعددی که در زمینه استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در دهه‌های آینده انجام شده، نشان‌دهنده وجود حتمی خطا در محاسبات است. به گونه‌ای که در مواردی علیرغم استفاده از یک مدل خاص تحت یک سناریوی معین و در یک منطقه جغرافیایی ثابت نتایج هم‌سو نیستند. به همین دلیل پیگیری مسائل مربوط به تغییر اقلیم و پیامدهای آن بر پدیده‌های حدی ضروری به نظر می‌رسد (Rahimi et al., 2018).

دریای خزر و رشته‌کوه‌های البرز از پدیده‌های جغرافیایی به شمار می‌روند که بارندگی‌های نواحی جنوبی دریای خزر و از جمله حوزه آبریز قره‌سو را تحت تأثیر قرار می‌دهند. پدیده تغییر اقلیم با تأثیر بر روی رخدادهای حدی نظیر بارش‌ها و سیلاب‌ها، ایجاب می‌کند که دبی و بارش طراحی سازه‌های آبی در این منطقه بازنگری شوند تا از

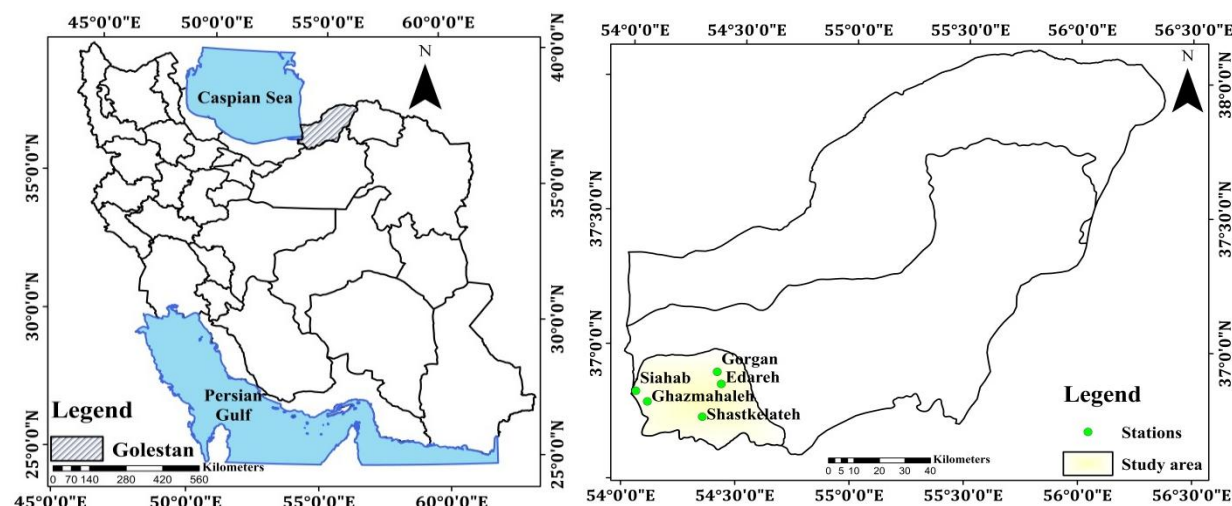


Fig. 1- Location of the Qareh-Su basin inside the Golestan province

شکل ۱- موقعیت قرارگیری حوضه آبریز قره‌سو نسبت به استان گلستان

تحقیقات منابع آب ایران، سال پانزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۸

Volume 15, No. 2, Summer 2019 (IR-WRR)

**Table 1- Geographical and meteorological characteristics of the study stations and their climates based on Extended De Martonne classification during 1987-2017**

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و هواشناسی ایستگاه‌های مطالعاتی و اقلیم آن‌ها در طبقه‌بندی اقلیمی دومارتن گسترش یافته در دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۱۷

Station	Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m)	24-hour precipitation (mm)				Climate classification
				Max	Avg.	Min	SD	
Edareh Gorgan	36° 51'	54° 25'	75	139	47.3	17	24.2	Sub humid- Warm
Ghazmahalleh	36° 47'	54° 12'	6	132	54.4	21	23.4	Sub humid- Warm
Shastkelateh	36° 44'	54° 20'	150	97	51.3	25	15.2	Humid- Moderate
Gorgan	36° 54'	54° 25'	13.3	105	50.9	28.8	17.2	Sub humid- Warm
Siahhab	36° 45'	54° 30'	-26	150.2	53.6	20.4	25.6	Sub humid- Moderate

\*Max: Maximum, Avg: Average, Min: Minimum, SD: Standard Deviation

منحنی‌های کاهش سطح تصحیح شوند. این روش توسط (Desa et al., 2001) تصحیح گردید. در این روش عامل فراوانی از معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$K_m = \frac{(X_L - X_{n-L})}{\sigma_{n-L}} \quad (2)$$

که در آن  $X_L$  حداکثر بارندگی مشاهده شده در ایستگاه مورد نظر،  $X_{n-L}$  میانگین بارندگی‌های سالانه بدون احتساب بارندگی حداکثر و  $\sigma_{n-L}$  انحراف معیار بارندگی‌های سالانه بدون احتساب بارندگی حداکثر می‌باشد. برای هر مقدار حداکثر مشاهده شده در سری داده‌ها یک مقدار عامل فراوانی به دست می‌آید. پس از محاسبه کلیه عامل‌های فراوانی حداکثر آن‌ها انتخاب شده و برای تمامی ایستگاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش تنها ضریب تصحیح فاصله زمانی دیدبانی ( $1/13$ ) در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش جهت محاسبه PMP به روش آماری Hershfield از بسته نرم‌افزاری PMP Calculator استفاده گردید (Afzali-Gorouh et al., 2018; Bakhtiari et al., 2016b).

### ۲-۲-۲- روش همیدی

در روش همیدی، سازوکار اصلی در توفان بر پایه همگرایی رطوبت به درون توفان، فرازش هوا، انتقال رطوبت به نقطه میعان، آزاد شدن انرژی و تولید بارش است. این روش بر اساس داده‌ها در طی پدیده توفان، با توجه به رطوبت هوای درون‌شارش که با سنجش‌های نقطه شبنم در سطح زمین و همچنین داده‌های بارش در شبکه باران‌سنجی حوزه، استوار است (Ministry of Energy, 2013). شرط لازم جهت برآورد PMP به روش همیدی، توجه به حالت‌های حداکثر تقرب هوا یا به عبارت دیگر توفان‌های شدید و فراگیر است که عبارت است از شرایط آب و هوایی که منجر به ایجاد بارشی می‌شود که در تمامی ایستگاه‌ها به وقوع پیوسته باشد. از آنجا که آمار بارش اندازه‌گیری شده به صورت نقطه‌ای دارای تغییرات مکانی هستند به منظور بررسی توزیع مکانی بارش و تعمیم بارش‌های ایستگاهی به منطقه باید نقشه‌های

در مطالعه حاضر از سه سری داده استفاده شد. دسته اول شامل داده‌های بارش چهار ایستگاه باران‌سنجی متعلق به وزارت نیرو و نیز داده‌های دمای نقطه شبنم، فشار، سمت و سرعت باد مربوط به ایستگاه سینوپتیک گرگان متعلق به سازمان هواشناسی کشور، طی دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۱۷ است. دسته دوم داده‌های اقلیمی بازتحلیل<sup>۵</sup> که شامل ۲۶ متغیر جوی بزرگ‌مقیاس با دقت مکانی  $2/5^\circ \times 2/5^\circ$  طی دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۱۷ است. دسته سوم داده‌های خروجی مدل اقلیمی CanESM2<sup>۶</sup> تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۷۹ و همچنین داده‌های تاریخی مدل بزرگ‌مقیاس در دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۱ که از وب سایت شبکه سناریوهای تغییر اقلیم کانادا<sup>۷</sup> دریافت شدند.

### ۲-۲-۲- روش‌ها

در مطالعه حاضر جهت برآورد حداکثر بارش محتمل از دو روش همیدی و آماری (استاندارد و تجدید نظر یافته) استفاده شده که در ادامه هر کدام از روش‌ها به اختصار ذکر می‌شود.

### ۱-۲-۲- روش آماری Hershfield

روش آماری Hershfield بر اساس معادله عمومی تناوب ارائه شده توسط Chow (1951) پایه‌ریزی شده است به صورت معادله ۱ تعریف می‌شود (WMO, 2009):

$$PMP = \bar{x}_n + K_m \sigma_n \quad (1)$$

که در آن PMP حداکثر بارش محتمل برای یک ایستگاه مشخص در تداوم معین،  $K_m$  عامل فراوانی و  $\bar{x}_n$  و  $\sigma_n$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری حداکثر بارندگی‌های سالانه ثبت شده در دوره مشخص می‌باشند (WMO, 2009). در این روش عامل فراوانی با استفاده از منحنی‌های تجربی Hershfield معین می‌شود و جهت برآورد PMP لازم است میانگین ( $\bar{x}_n$ ) و انحراف معیار ( $\sigma_n$ ) سری سالانه بر اساس حداکثر بارش مشاهده شده، اندازه نمونه، فاصله زمانی دیدبانی و

هم‌باران و منحنی‌های عمق-مساحت-تداوم (DAD) ترسیم شوند. به منظور انتخاب بزرگ‌ترین عمق بارش رخ داده شده در منطقه، اقدام به رسم منحنی پوش گردید. برای محاسبه آب قابل بارش توفان، بهترین روش برآورد گرم‌ترین اشباع آدیاباتیک است که به این منظور از داده‌های حداکثر دمای نقطه شبنم با پایداری ۱۲ ساعته استفاده می‌شود. جهت محاسبه ضریب بیشینه‌سازی رطوبت<sup>۹</sup> (FM) از معادله ۳ استفاده می‌شود:

$$FM = \frac{W_m}{W_s} \quad (۳)$$

که در آن  $W_m$  حداکثر آب قابل بارش در سطوح ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌بار است که از داده‌های حداکثر دمای نقطه شبنم با پایداری ۱۲ ساعته با دوره بازگشت ۵۰ ساله به دست می‌آید و  $W_s$  حداکثر آب قابل بارش در سطوح ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌بار در طول دوره توفان است (WMO, 2009). ضریب بیشینه‌سازی باد<sup>۱۰</sup> (MW) از معادله ۴ محاسبه می‌شود:

$$MW = \frac{MW_1}{MW_2} \quad (۴)$$

در این معادله  $MW_1$  و  $MW_2$  به ترتیب حداکثر سرعت باد با پایداری ۱۲ ساعته با دوره بازگشت ۱۰۰ ساله و حداکثر سرعت باد با پایداری ۱۲ ساعته در زمان وقوع توفان است (WMO, 2009). در نهایت حداکثر بارش محتمل از حاصل ضرب ضرایب بیشینه‌سازی رطوبت و باد در متوسط عمق بارش (R) حاصل از منحنی‌های DAD طبق معادله ۵ به دست می‌آید (WMO, 2009):

$$PMP = FM \times MW \times R \quad (۵)$$

### ۳-۲-۲- ریزمقیاس‌نمایی داده‌های بارش و دمای نقطه شبنم

در این پژوهش جهت شبیه‌سازی داده‌های بارش و دمای آینده از مدل گردش عمومی جو CanESM2 تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده گردید. ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی جو با استفاده از مدل آماری SDSM<sup>۱۱</sup> انجام شد. مدل جامع و جفت شده CanESM2 نسل چهارم مدل‌های گردش عمومی جو است که جزو مدل‌های CMIP5<sup>۱۲</sup> و گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم است. قدرت تفکیک اتمسفری این مدل ۲/۸۱ × ۲/۸۱ درجه طول و عرض جغرافیایی و قدرت تفکیک اقیانوسی آن ۰/۹۴ × ۱/۴۱ درجه طول و عرض جغرافیایی است که توسط مرکز مدل‌سازی و تحلیل آب و هوای کانادا (CCCma)<sup>۱۳</sup> زیر نظر سازمان محیط زیست توسعه یافته است (Chylek et al., 2011). مدل SDSM مبتنی بر روش‌های رگرسیون خطی چندگانه است که به عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس‌نمایی و بهترین مولد داده‌های شرطی در جهان شناخته شده و برای کاهش مقیاس فضایی روابط متغیرهای روزانه پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی شونده استفاده می‌شود (Wilby and Dawson, 2013). ساختار مدل SDSM شامل انتخاب

متغیرهای پیش‌گو به منظور یافتن قوی‌ترین ارتباط بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی شونده، واسنجی مدل، صحت‌سنجی مدل و تولید سناریوها برای دوره‌های آینده می‌باشد (Wilby and Dawson, 2013). پس از غربال‌گری، مرحله واسنجی نهایی مدل با استفاده از داده‌های مشاهداتی بارش و دمای نقطه شبنم هر یک از ایستگاه‌ها به همراه پیش‌گوهای منتخب مربوطه انجام می‌گیرد. دوره واسنجی در هر ایستگاه با سعی و خطا و مبتنی بر معیارهای  $R^2$ <sup>۱۴</sup> و SE<sup>۱۵</sup> انتخاب می‌شود. بر این اساس واسنجی مدل در دوره زمانی ۲۰۰۲-۱۹۸۷ و صحت‌سنجی مدل طی دوره زمانی ۲۰۰۳-۲۰۱۷ صورت پذیرفت. سپس با استفاده از خروجی مدل CanESM2 اقدام به شبیه‌سازی داده‌های دوره پایه شد و دقت ریزمقیاس‌نمایی با مقایسه داده‌های مشاهداتی با داده‌های تولید شده توسط مدل در دوره پایه و نیز دوره‌های واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی ارزیابی گردید. برای ارزیابی کارایی مدل، از معیارهای  $R^2$ ، RMSE<sup>۱۶</sup>، MAE<sup>۱۷</sup> و ضریب NSE<sup>۱۸</sup> استفاده شد (Taei Semirami et al., 2014). در نهایت با استفاده از مدل SDSM و خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای مختلف RCP اقدام به تولید داده‌های بارش و دمای نقطه شبنم طی دوره‌های زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و آینده دور (۲۰۴۹-۲۰۷۸) گردید.

### ۳- نتایج

همان‌طور که در مراحل قبل ذکر شد از مدل SDSM و خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای مختلف RCP برای تولید داده‌های بارش و دمای نقطه شبنم طی دوره‌های زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و آینده دور (۲۰۴۹-۲۰۷۸) استفاده گردید. دقت ریزمقیاس‌نمایی مدل SDSM با مقایسه داده‌های مشاهداتی و داده‌های تولید شده توسط مدل در دوره پایه و نیز دوره‌های واسنجی، صحت‌سنجی و شبیه‌سازی بررسی شد (جدول‌های ۲ و ۳). بر اساس جدول ۲، مقادیر میانگین ماهانه  $R^2$  مربوط به داده‌های بارش در مرحله واسنجی نسبت به دما پایین می‌باشد. طبق جدول ۳، عملکرد مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی بارش مربوط به همه ایستگاه‌ها مشابه بوده و  $R^2$  شبیه‌سازی در سطوح ۹۰ و ۹۵ درصد معنی‌دار است. مقادیر NSE و  $R^2$  مربوط به دما نشان‌دهنده دقت بالای ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها می‌باشد. بررسی آماره‌های مربوط به داده‌های بارش تولید شده در مرحله صحت‌سنجی و شبیه‌سازی دوره پایه نشان‌گر همبستگی معنادار این داده‌ها می‌باشد. آماره‌های مذکور در جدول ۳ مؤید این امر است که مدل SDSM در مدل‌سازی داده‌های دمای نقطه شبنم و بارش حوزه آبریز قره‌سو موفق عمل کرده و می‌توان این مدل را جهت برآورد مقادیر آبی این متغیرها استفاده کرد.

**Table 2- The results of model calibration**

جدول ۲- نتایج ارزیابی مدل در مرحله واسنجی

Variable	Stations	Calibration period	R <sup>2</sup> (Monthly Average)	SE
Rainfall	Edareh Gorgan	1987-2002	0.313	0.365
	Ghazmahalleh	1987-2002	0.37	0.385
	Shastkelateh	1987-2002	0.29	0.354
	Gorgan	1987-2002	0.275	0.39
	Siahab	1987-2002	0.37	0.37
Dew point temperature	Gorgan	1987-2002	0.7	1.6

**Table 3- Evaluation of model performance in validation and projection of the baseline period**

جدول ۳- نتایج ارزیابی مدل در مرحله صحت‌سنجی و شبیه‌سازی دوره پایه

Variable	Stations	R <sup>2</sup>	Significant level of F test	RMSE	MAE	NSE
Validation	Edareh Gorgan	0.80	4.5×10 <sup>-14</sup>	0.78	0.62	0.71
	Ghazmahalleh	0.77	2.4×10 <sup>-16</sup>	1.3	1.01	0.29
	Shastkelateh	0.75	6.5×10 <sup>-15</sup>	1.2	0.97	0.48
	Gorgan	0.79	1×10 <sup>-4</sup>	1.1	0.84	0.41
	Siahab	0.81	2.1×10 <sup>-12</sup>	1.31	1.18	0.49
Dew point temperature	Gorgan	0.99	7.5×10 <sup>-14</sup>	0.63	0.5	0.99
Projection	Edareh Gorgan	0.57	0.004	1.42	1.13	0.08
	Ghazmahalleh	0.43	0.02	1.87	1.69	0.02
	Shastkelateh	0.26	0.09	2.01	2.3	0.06
	Gorgan	0.52	0.008	1.5	1.6	0.07
	Siahab	0.28	0.07	2.42	2.11	0.05
Dew point temperature	Gorgan	0.98	9.8×10 <sup>-14</sup>	1.06	0.85	0.98

با استفاده از روش استاندارد Hershfield، مقدار PMP<sub>24</sub> در دوره پایه ۴۲۱ میلی‌متر، در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و در آینده دور به ترتیب ۲۰۲، ۲۲۸ و ۲۱۳ میلی‌متر و در آینده نزدیک به ترتیب ۲۰۱، ۲۳۰ و ۲۰۱ میلی‌متر به دست آمد. با توجه به جدول ۴ مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از روش استاندارد Hershfield در دوره آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و تحت هر سه سناریوی مورد استفاده در همه ایستگاه‌های مطالعاتی نسبت به دوره مشاهداتی به طور متوسط در محدوده ۲۵ تا ۶۲ درصد کاهش نشان داد.

### ۳-۱- برآوردهای آماری PMP

به منظور برآورد PMP با روش آماری Hershfield، از سری‌های سالانه حداکثر بارش ۲۴ ساعته در دوره پایه (۱۹۸۷-۲۰۱۷) و دوره آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و دور (۲۰۴۹-۲۰۷۸) استفاده گردید. جدول ۴ مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از روش استاندارد و تجدید نظر شده طی دوره پایه و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و دور (۲۰۴۹-۲۰۷۸) تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP را نشان می‌دهد.

**Table 4- The values of PMP<sub>24</sub> using Hershfield standard and revised methods during the baseline, and the near and the far future periods under the RCP scenarios**

جدول ۴- مقادیر PMP<sub>24</sub> با استفاده از روش‌های استاندارد و تجدید نظر شده Hershfield طی دوره‌های مشاهداتی، آینده نزدیک

و دور تحت سناریوهای RCP

Method	Stations	2019-2048				Diff. (%)	2049-2078			Diff. (%)
		PMP <sub>24</sub> (mm)					PMP <sub>24</sub> (mm)			
		Baseline	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5		RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	
Standard method	Edareh Gorgan	436	344	364	277	25	311	270	288	29
	Ghazmahalleh	460	200	235	193	55	224	228	227	51
	Shastkelateh	362	166	219	227	44	206	194	244	43
	Gorgan	391	148	156	173	59	133	152	157	66
	Siahab	458	154	167	197	62	204	162	234	56
Modified method	Edareh Gorgan	243	127	124	104	51	120	107	104	55
	Ghazmahalleh	247	81	91	71	67	90	92	80	65
	Shastkelateh	194	68	83	75	61	76	73	79	61
	Gorgan	206	57	56	57	72	52	60	54	73
	Siahab	259	72	71	72	72	75	67	76	72

\*Diff: Difference

کمترین و بیشترین میزان کاهش متعلق به ایستگاه‌های اداره گرگان و سینوپتیک گرگان است. شکل ۲ توزیع مکانی PMP<sub>24</sub> حاصل از دو روش استاندارد و تجدید نظر شده Hershfield در دوره‌های پایه و آینده را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه تغییر اقلیم یک پدیده بزرگ‌مقیاس است انتظار نمی‌رود که تغییرات در پهنه‌های کوچک تفاوت چشمگیری داشته باشند؛ اما نقشه‌های توزیع مکانی PMP<sub>24</sub> حاصل از روش آماری نشان می‌دهند که مقادیر PMP از غرب به شرق روندی کاهشی دارد و در همه نقشه‌ها کاهش عمق PMP<sub>24</sub> به وضوح مشخص است.

در روش استاندارد و دوره پایه، تغییرات PMP در ۶۵ درصد از مساحت حوزه بین ۴۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است. در حالی که در دوره‌های آینده هیچ نقطه‌ای از حوزه این مقدار PMP<sub>24</sub> را نشان نمی‌دهد. در دوره پایه، عمق PMP<sub>24</sub> حاصل از هر دو روش، از غرب به شرق کاهش می‌یابد در حالی که در دوره‌های آینده مناطق غربی حوزه که در مجاورت ساحل دریای خزر قرار دارند مقادیر PMP<sub>24</sub> کمتری را نشان می‌دهند. بر اساس نقشه‌های PMP<sub>24</sub> روش تجدید نظر شده Hershfield در آینده نزدیک در ۹۲ تا ۹۶ درصد و در آینده دور ۹۳ تا ۹۶ درصد از مساحت حوزه، عمق PMP<sub>24</sub> بین ۵۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر است.

### ۳-۲- برآورد PMP به روش همدیدی

به منظور شناسایی توفان‌های شدید و فراگیر، از داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل SDSM استفاده گردید. پس از بررسی دقیق آمار روزانه بارش در هر یک از دوره‌های پایه، آینده نزدیک و دور تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP، تعداد ۱۳ توفان شدید و فراگیر شناسایی و استخراج گردید. تاریخ وقوع توفان‌های منتخب طی دوره‌های پایه و آینده در جدول ۵ ذکر شده است.

پس از تعیین تاریخ وقوع توفان‌های شدید و فراگیر، جهت تحلیل توزیع مکانی و ترسیم نقشه‌های هم‌باران برای هر توفان، گرادیان بارندگی محاسبه گردید. به این منظور همبستگی بین دو عامل بارندگی و ارتفاع مورد بررسی قرار گرفت. به دلیل عدم همبستگی ارتفاع و بارش توفان‌های منتخب، نقشه‌های هم‌باران ۲۴ ساعته در محیط نرم‌افزار ArcGIS v10.5 و با استفاده از روش درون‌یابی IDW<sup>۱۹</sup> ترسیم شدند. مساحت‌های محصور بین خطوط هم‌باران نیز در این نرم‌افزار محاسبه گردید.

در سناریوی RCP2.6 طی دوره آینده نزدیک حداقل و حداکثر تغییرات بین ۲۱ تا ۶۶ درصد است که به ترتیب مربوط به ایستگاه اداره گرگان و سیاه‌آب است. مقادیر PMP<sub>24</sub> در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۳۴۴ و ۱۵۴ میلی‌متر می‌باشد. مقادیر PMP<sub>24</sub> در این دوره تحت سناریوی RCP4.5 افت ۱۷ الی ۶۴ درصدی را نشان داد که مقادیر حداقل و حداکثر کاهش مربوط به ایستگاه‌های اداره گرگان و سیاه‌آب است. سناریوی RCP8.5 تغییراتی بین ۳۶ تا ۵۸ درصد را در ایستگاه‌های اداره گرگان و غازمحله نشان می‌دهد و مقادیر PMP<sub>24</sub> نظیر آن‌ها ۲۷۷ و ۱۹۳ میلی‌متر به دست آمد. در دوره آینده دور (۲۰۷۸-۲۰۴۹) هر سه سناریو در همه ایستگاه‌های مطالعاتی به طور متوسط ۲۹ تا ۶۶ درصد کاهش را نشان دادند. در سناریوی RCP2.6 بیشترین و کمترین میزان کاهش در مقادیر PMP<sub>24</sub> به میزان ۲۹ و ۶۶ درصد متعلق به ایستگاه‌های اداره گرگان و سینوپتیک گرگان بود. این مقادیر در سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۳۸ و ۶۵ درصد متعلق به ایستگاه‌های اداره گرگان و سیاه‌آب و در سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳۳ و ۶۰ درصد متعلق به ایستگاه‌های شصت کلاته و سینوپتیک گرگان بودند. به طور کلی درصد کاهش در سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک به ترتیب ۵۲، ۴۶ و ۴۹ و برای آینده دور ۵۲ و ۴۵ درصد بود.

با استفاده از روش تجدید نظر یافته Hershfield، مقدار PMP<sub>24</sub> در دوره پایه ۲۳۰ میلی‌متر، در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک به ترتیب ۸۱، ۸۵ و ۷۶ میلی‌متر و در آینده دور به ترتیب ۸۳، ۸۰ و ۷۹ میلی‌متر به دست آمد. مقایسه مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از نگرش تجدید نظر شده Hershfield در دوره مشاهداتی و دوره‌های آتی نشان‌دهنده کاهش در میزان PMP است. به طوری که درصد کاهش در سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک به ترتیب ۶۵، ۶۳ و ۶۷ درصد و در آینده دور به ترتیب ۶۴، ۶۵ و ۶۶ درصد مشاهده گردید. حداقل مقادیر PMP<sub>24</sub> در سناریوی RCP2.6 در دوره نزدیک و دور به ترتیب ۵۷ و ۵۲ میلی‌متر متعلق به ایستگاه سینوپتیک گرگان و حداکثر آن در دوره نزدیک و دور ۱۲۷ و ۱۲۰ میلی‌متر متعلق به ایستگاه اداره گرگان است. در سناریوی RCP4.5 بیشترین و کمترین مقادیر PMP در هر دو دوره آینده به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های اداره گرگان و سینوپتیک گرگان بودند. در این سناریو ایستگاه سیاه‌آب بیشترین درصد کاهش PMP را در هر دو دوره تجربه می‌کند و کمترین درصد کاهش متعلق به ایستگاه اداره گرگان است. در سناریوی RCP8.5 در آینده نزدیک، ایستگاه اداره گرگان کمترین و ایستگاه سیاه‌آب بیشترین میزان کاهش در PMP<sub>24</sub> را تجربه کردند. این در حالی است که در آینده دور

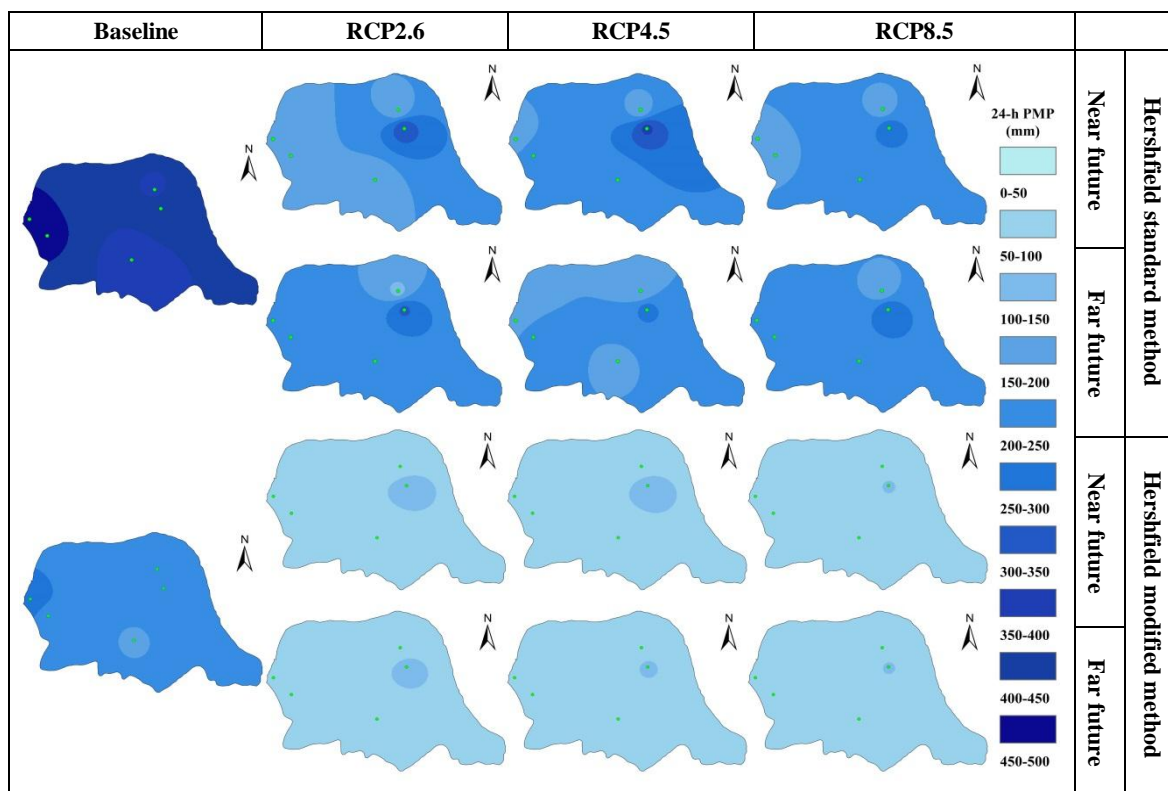


Fig. 2- The spatial distribution of PMP<sub>24</sub> over the study area in the baseline and the future periods

شکل ۲- توزیع مکانی PMP<sub>24</sub> در منطقه مطالعاتی طی دوره‌های پایه و آینده

برای توفان مورخ ۲۷ سپتامبر ۲۰۴۵ را نمایش می‌دهد. شکل ۳ منحنی‌های DAD مربوط به سناریوی RCP2.6 در دوره آینده نزدیک را نشان می‌دهد که بر اساس آن منحنی توفان مورخ (۲۰۴۵/۰۹/۲۷) در سمت راست منحنی سایر توفان‌ها قرار دارد و شدیدترین توفان در این دوره به شمار می‌رود.

در نهایت منحنی‌های عمق-مساحت-تداوم (DAD) برای هر توفان در دوره پایه و نیز در سناریوهای مورد بررسی در دوره‌های آتی، استخراج شدند و به منظور انتخاب بزرگ‌ترین عمق بارش برای هر سه سناریو در دوره آینده نزدیک و دور اقدام به رسم منحنی‌های پوش DAD گردید. جدول ۶ نمونه‌ای از مراحل محاسبه منحنی DAD

Table 5- Dates of 24-h duration severe and widespread storms in the study area during the baseline, and the near and the far future periods under the RCP scenarios

جدول ۵- توفان‌های شدید و فراگیر ۲۴ ساعته منتخب طی دوره‌های پایه، آینده نزدیک و دور تحت سناریوهای RCP

No.	Baseline (1987-2017)	Near future (2019-2048)	Far future (1049-2078)
	Date of occurrence (mm/dd/yyyy)	Date of occurrence (mm/dd/yyyy)	Date of occurrence (mm/dd/yyyy)
1	11/12/1995	09/27/2045	09/30/2064
2	10/29/1993	04/25/2044	11/11/2062
3	10/09/2006	05/11/2025	10/06/2059
4	07/17/2012	03/14/2023	10/06/2057
5	01/11/2013	05/11/2040	10/23/2060
6	09/29/2008	09/14/2019	01/30/2051
7	09/27/1995	05/19/2031	03/10/2066
8	10/13/1991	04/26/2027	10/24/2078
9	10/21/2011	02/27/2040	03/30/2065
10	10/13/2012	05/09/2034	10/24/2074
11	08/16/1993	02/02/2026	04/21/2053
12	12/26/2005	10/21/2048	02/05/2051
13	06/04/2014	09/12/2030	10/05/2059



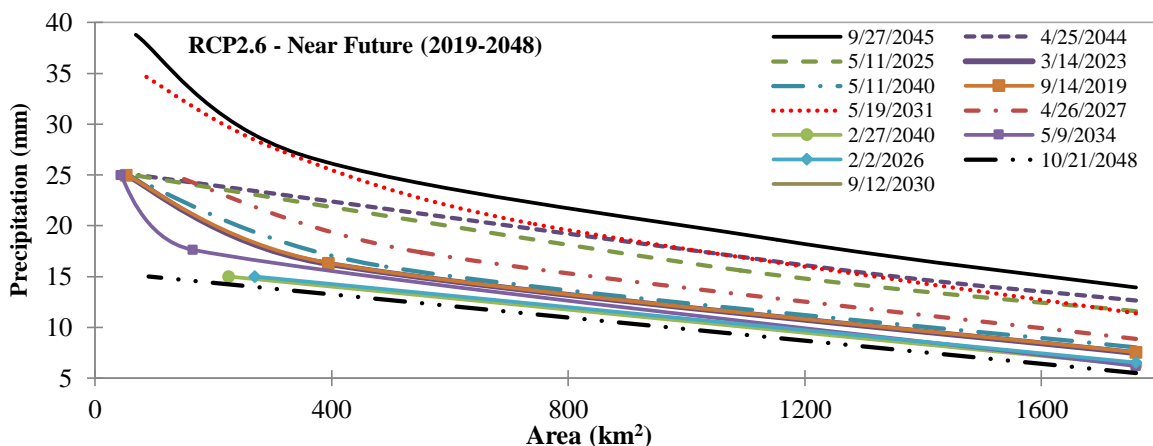


Fig. 3- Depth–Area–Duration curves for selected storms in near future period under RCP2.6 scenario  
 شکل ۳- منحنی‌های عمق-مساحت-تداوم برای توفان‌های منتخب در دوره آینده نزدیک تحت سناریوی RCP2.6

Table 6- The average 24-hours rainfall for the storm of 27 September 2045 in the study area.

جدول ۶- متوسط بارش برای توفان مورخ ۲۷ سپتامبر ۲۰۴۵ در منطقه مطالعاتی

Limit of isohyetal lines (mm)	Average of isohyetal (mm)	Area (km <sup>2</sup> )	Cumulative area (km <sup>2</sup> )	Volume of the rainfall (1000m <sup>3</sup> )	Cumulative volume of the rainfall (1000m <sup>3</sup> )	Average of maximum rainfall (mm)
40-37.5	38.75	10.0	10.0	387.5	387.5	38.8
37.5-35	36.25	14.3	24.3	518.4	905.9	37.3
35-32.5	33.75	17.5	41.8	590.6	1496.5	35.8
32.5-30	31.25	27.2	69.0	850.0	2346.5	34.0
30-27.5	28.75	45.3	114.3	1303.3	3649.8	31.9
27.5-25	26.25	69.4	183.7	1821.8	5471.6	29.8
25-22.5	23.75	81.8	265.5	1941.9	7413.5	27.9
22.5-20	21.25	84.0	349.5	1785.3	9198.8	26.3
20-17.5	18.75	124.0	473.5	2325.1	11523.9	24.3
17.5-15	16.25	220.1	693.6	3576.9	15100.7	21.8
15-12.5	13.75	153.1	846.7	2105.0	17205.8	20.3
12.5-10	11.25	305.8	1152.5	3439.8	20645.6	17.9
10-7.5	8.75	219.0	1371.5	1916.6	22562.1	16.5
7.5-5	6.25	180.2	1551.7	1126.1	23688.2	15.3
5-2.5	3.75	124.0	1675.7	464.9	24153.1	14.4
2.5-0	1.25	84.3	1760.0	105.4	24258.6	13.8

با استفاده از روش همدیدی، مقدار PMP<sub>24</sub> در دوره پایه ۱۴۳ میلی‌متر، در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک به ترتیب ۹۸، ۱۰۵ و ۱۰۹ میلی‌متر و در آینده دور به ترتیب ۱۲۹، ۱۲۲ و ۱۲۶ میلی‌متر به دست آمد. نتایج حاضر با مطالعه Motallebi and Saghafian (2013) هم‌خوانی دارد. آن‌ها مقدار PMP<sub>24</sub> همدیدی در حوزه سد گلستان در نزدیکی حوزه قره‌سو را ۱۸۶ میلی‌متر محاسبه کردند و مقادیر PMP<sub>24</sub> همدیدی در دوره آتی را با استفاده از مدل اقلیمی HadCM3 تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب ۱۹۸/۸ و ۱۸۳/۹ میلی‌متر به دست آوردند. بر اساس شکل ۴ حداکثر و حداقل نرخ تغییرات مقادیر PMP<sub>24</sub> توفان‌های منتخب در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در دوره آینده نزدیک نسبت به دوره مشاهداتی به ترتیب ۶۴، ۶۲ و ۵۹ و ۴۸، ۳۳ و ۲۴ درصد و در دوره

جهت محاسبه آب قابل بارش توفان‌های منتخب از داده‌های سه ساعته دمای نقطه شبنم متعلق به ایستگاه سینوپتیک گرگان استفاده شد. به این منظور ضرایب بیشینه‌سازی رطوبت از طریق بیشینه‌سازی دمای نقطه شبنم با دوره بازگشت ۵۰ ساله با استفاده از نمودار اریبی دما (تفی‌گرام یا نمودار Skew-T) محاسبه شدند. ضرایب بیشینه‌سازی باد نیز با استفاده از داده‌های سرعت باد متعلق به ایستگاه سینوپتیک گرگان در زمان توفان و دوره بازگشت ۱۰۰ ساله به دست آمدند و ضرایب بیشینه‌سازی توفان محاسبه شدند. از آن‌جا که باد یک کمیت برداری است و شبیه‌سازی رفتار آن تحت تأثیر تغییر اقلیم با خطای بسیاری همراه است، ضرایب باد برای دوره‌های آینده بر اساس متوسط مقادیر سرعت باد روزانه طی دوره آماری ۲۰۱۷-۱۹۸۷ در نظر گرفته شدند.

از شدت بالاتری نسبت به آینده دور برخوردار است. در دوره آینده نزدیک مقادیر  $PMP_{24}$  تحت سناریوهای RCP4.5، RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۳۱، ۲۷ و ۲۴ درصد کاهش یافته و از مقدار ۱۴۳ میلی‌متر در دوره مشاهداتی به ترتیب به ۹۸، ۱۰۵ و ۱۰۹ میلی‌متر تقلیل یافت. همچنین مشاهده شد که درصد تغییرات در سناریوی RCP2.6 بیش‌تر از RCP4.5 و RCP8.5 است. در دوره آینده دور روند تغییرات  $PMP_{24}$  نسبت به دوره مشاهداتی همچنان کاهش است، با این تفاوت که نرخ تغییرات آن کم‌تر از دوره آینده نزدیک است اما عمق  $PMP_{24}$  در دوره آینده دور نسبت به دوره آینده نزدیک افزایش یافته است. بر این اساس مقادیر  $PMP_{24}$  تحت سناریوهای مذکور به ترتیب ۱۲۹، ۱۲۲ و ۱۲۶ میلی‌متر به دست آمد.

آینده دور به ترتیب ۴۵، ۴۷ و ۴۶، ۱۳ و ۱۷ درصد به دست آمد. در دوره آینده نزدیک حداقل دامنه تغییرات متعلق به سناریوی RCP2.6 و حداکثر آن متعلق به سناریوی RCP8.5 است و در دوره آینده دور کم‌ترین دامنه تغییرات در سناریوی RCP4.5 مشاهده شد. در دوره آینده نزدیک و دور دامنه تغییرات سناریوی RCP8.5 به ترتیب ۳۵ و ۳۴، سناریوی RCP4.5 به ترتیب ۲۹ و ۳۰ و در سناریوی RCP2.6 به ترتیب ۱۶ و ۳۲ درصد است. در جدول ۷ تاریخ وقوع توفان، مقادیر ضرایب بیشینه‌سازی، عمق  $PMP_{24}$  و درصد تفاوت دوره پایه با دوره‌های آینده نشان داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد مقادیر  $PMP_{24}$  در دوره آینده نزدیک و دور تحت هر سه سناریوی RCP کاهش یافته و روند تغییرات در آینده نزدیک

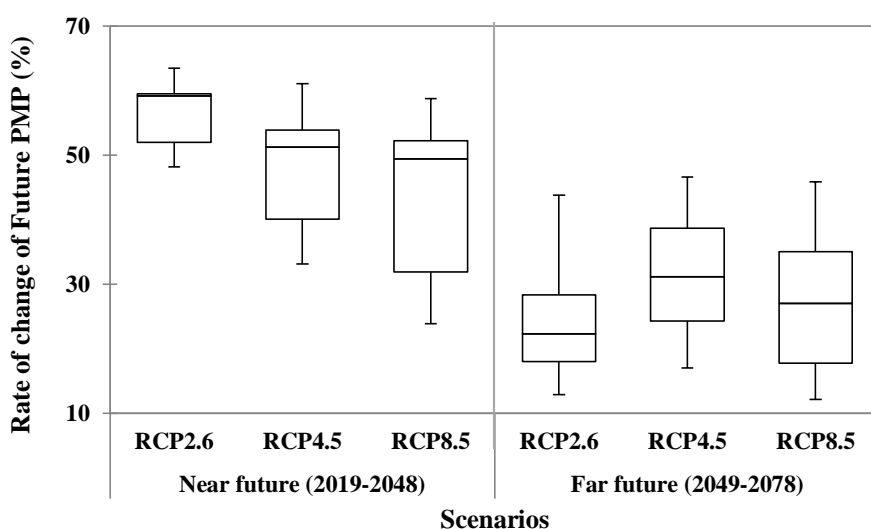


Fig. 4- Rate of changes of future  $PMP_{24}$  in the future periods under the RCP scenarios

شکل ۴- نرخ تغییرات مقادیر  $PMP_{24}$  در دوره آینده تحت سناریوهای RCP

Table 7- The maximization factors, PMP values and percentage of differences between the baseline and the future periods under the RCP scenarios

جدول ۷- مقادیر ضرایب بیشینه‌سازی، PMP و درصد تفاوت دوره‌های مشاهداتی و آینده تحت سناریوهای RCP

Period	Scenario	date of occurrence (mm/dd/yyyy)	maximum persisting 12 hour dew point in 1000 mb level (°C)		Maximum persisting 12hr wind (Knot)		maximization factor		PMP Factor	PMP (mm)	.Diff (%)
			In the storm time	50-year return period	In the storm time	100-year return period	FM	MW			
1987-2017	Baseline	10/29/1993	14.1	20.6	1.5	7.0	10.7	1.5	2.2	143	---
2019-2048	RCP2.6	02/02/2026	3.7	14.3	9.7	19.2	2.1	1.98	4.1	98	-31
	RCP4.5	02/02/2026	5.8	15.3	9.7	19.2	1.8	1.98	3.6	105	-27
	RCP8.5	02/02/2026	4.6	14.9	9.7	19.2	1.9	1.98	3.7	109	-24
2049-2078	RCP2.6	01/30/2051	8.7	17.2	8.3	16.6	1.8	2.0	3.6	129	-10
	RCP4.5	01/30/2051	10.8	17.8	8.3	16.6	1.6	2.0	3.2	122	-15
	RCP8.5	01/30/2051	8.9	18.0	8.3	16.6	1.9	2.0	3.7	126	-12

\*Diff: Difference

منطقی‌ترین مقادیر است. با توجه به اهمیت PMP در حوزه‌های آبریز، تأثیر اجتناب‌ناپذیر تغییر اقلیم بر آن و وجود حتمی خطا و عدم قطعیت در مدل‌های اقلیمی در مطالعات آبی با بررسی مدل‌های اقلیمی و ریزمقیاس‌نمایی دیگر، میزان عدم قطعیت در برآورد PMP بررسی خواهند شد.

#### پی‌نوشت‌ها

- 1- Intergovernmental Panel on Climate Change
- 2- Probable Maximum Precipitation
- 3- Probable Maximum Flood
- 4- Representative Concentration Pathways
- 5- Reanalysis, Available at: <https://sds.org.uk/data.html>
- 6- Second Generation Canadian Earth System Model, Available at: <http://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2>
- 7- Canadian Center for Climate Scenario Network
- 8- Depth-Area-Duration
- 9- Moisture Maximization Factor
- 10- Wind Maximization Factor
- 11- Statistical Downscaling Model
- 12- The Coupled Model Inter-comparison Project Phase5
- 13- Canadian Center for Climate Modelling and Analysis
- 14- Coefficient of Determination
- 15- Standard Error
- 16- Root Mean Squared Error
- 17- Mean Absolute Error
- 18- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 19- Inverse Distance Weighted
- 20- Skew T diagram

#### ۵- مراجع

- Afroz AH, Akbari H, Rakhshandehroo GR, and Pourtouserkani A (2015) Climate change impact on probable maximum precipitation in chenar-rahdar river basin. Proceedings of the Watershed Management Symposium: 36-47
- Afzali-Gorouh Z, Bakhtiari B and Qaderi K (2018) Probable maximum precipitation estimation in a humid climate. Natural Hazards and Earth System Science 18:3109-3119
- Azizi G and Hanafi A (2011) Estimation of probable maximum precipitation by using Synoptic method. Arid Regions Geographic Studies 1(2):55-71 (In Persian)
- Bakhtiari B, Afzali-Gorouh Z and Qaderi K (2016a) Probable maximum precipitation estimation using two different approaches of Hershfield's method

در این دوره بیش‌ترین تغییرات کاهش در سناریوی RCP2.6 و حدود ۱۰ درصد و حداقل تغییرات کاهش در سناریوی RCP8.5 و حدود ۱۲ درصد مشاهده شد. در دوره پایه مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از روش استاندارد Hershfield، ۲/۹ برابر نتایج حاصل از روش هم‌مدیدی است که این نسبت در دوره آینده نزدیک بین ۲ تا ۲/۲ و در دوره آینده دور بین ۱/۶ تا ۱/۸ به دست آمد. این مقادیر نشان‌دهنده بیش‌برآورد و عدم کارایی در برآورد عمق PMP<sub>24</sub> در منطقه مورد مطالعه است. دلیل این امر می‌تواند وابستگی مطلق روش استاندارد به داده‌های بارش باشد در حالی که در روش سینوپتیک از خصوصیات فیزیکی توفان و از داده‌های بارش، دمای نقطه شبنم، باد و فشار استفاده می‌شود و مقادیر PMP<sub>24</sub> واقعی‌تری را برای منطقه ارائه می‌دهد. نسبت مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از روش تجدید نظر یافته و روش هم‌مدید در دوره پایه ۱/۶ به دست آمد. به نظر می‌رسد این روش به دلیل تعدیل مقادیر عامل فراوانی بر اساس بارش‌های مشاهده شده در منطقه نتایج منطقی‌تری نسبت به روش استاندارد ارائه می‌دهد و نتایج حاصل از آن به روش هم‌مدیدی نزدیک است. نسبت مقادیر PMP<sub>24</sub> حاصل از روش تجدید نظر یافته و روش هم‌مدیدی در دو دوره آینده بین ۰/۶ تا ۰/۸ به دست آمد که نشان‌دهنده کم‌برآورد در روش تجدید نظر یافته در دوره‌های آینده است. ممکن است دلیل این امر تغییر در میانگین بارش طی دوره‌های آینده باشد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر PMP<sub>24</sub> و مقایسه روش‌های آماری و هم‌مدیدی در حوزه آبریز قره‌سو انجام شد. جهت تولید داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آینده از خروجی‌های مدل اقلیمی جهانی CanESM2 استفاده شد و ریزمقیاس‌نمایی این داده‌ها با مدل آماری SDSM انجام گردید. پس از انتخاب متغیرهای پیش‌گوی مناسب، واسنجی و صحت‌سنجی اقدام به تولید داده‌های اقلیمی آینده تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای دو دوره آینده نزدیک و دور گردید. مقادیر PMP<sub>24</sub> با استفاده از روش‌های آماری (استاندارد و تجدید نظر شده Hershfield) و روش هم‌مدیدی برآورد شدند. به طور کلی نتایج حاصل از سناریوهای مورد بررسی، نشان‌دهنده کاهش عمق PMP<sub>24</sub> در دوره‌های آینده نزدیک و دور بودند به طوری که شدت کاهش در دوره آینده نزدیک بیش‌تر از دوره آینده دور بود. بررسی نقشه‌های توزیع مکانی PMP<sub>24</sub> در روش آماری و در همه سناریوها نشان داد که مقادیر PMP<sub>24</sub> از غرب به شرق حوزه افزایش می‌یابد. در یک جمع‌بندی کلی مقایسه نتایج حاصل از سه روش در دوره‌های پایه و آینده نشان می‌دهد که جهت برآورد PMP<sub>24</sub> روش هم‌مدیدی دارای بهترین توجیه علمی و

- Jakob D, Smalley R, Meighen J, Xuereb K, and Taylor B (2009) Series climate change and probable maximum precipitation. Australian Government, Bureau of Meteorology, Melbourne
- Khalili A (1999) Investigation of record length impacts on 24-72 hour probable maximum precipitation across Iran. 2nd Regional Conference on Climate Change, Tehran (In Persian)
- Kunkel KE, Karl TR, Easterling DR, Redmond K, Young J, Yin X, and Hennon P (2013) Probable maximum precipitation and climate change. *Geophysical Research Letters* 40(7):1402-1408
- Lagos-Zúñiga MA and Vargas M X (2014) PMP and PMF estimations in sparsely-gauged Andean basins and climate change projections. *Hydrological Sciences Journal* 59(11):2027-2042, Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0262667.2013.877588>
- Lee O and Kim S (2018) Estimation of future probable maximum precipitation in Korea using multiple regional climate models. *Water (Switzerland)* 10(637):1-17
- Ministry of Energy (2013) Manual on estimation of probable maximum precipitation (PMP) and depth-area-duration curves (DAD). (In Persian)
- Motallebi M and Saghafian B (2013) Investigation of climate change impact on probable maximum precipitation in Golestan dam basin. International Conference of Civil, Architecture and Sustainable Urban Development (In Persian)
- Nathan R, Jordan P, Scorah M, Lang S, Kuczera G, Schaefer M, and Weinmann E (2016) Estimating the exceedance probability of extreme rainfalls up to the probable maximum precipitation. *Journal of Hydrology* 543:706-720
- Rahimi J, Ebrahimpour M, and Khalili A (2013) Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 112(3-4):409-418
- Rahimi J, Malekian A, and Khalili A (2018) Climate change impacts in Iran: assessing our current knowledge. *Theoretical and Applied Climatology* 1-20, Available at: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2395-7>
- Ramak Z, Porhemmat J, Sedghi H, Fattahi E, and Lashni-Zand M (2017) The climate change effect on probable maximum precipitation in a catchment: A case study of the Karun river catchment in the Shalu bridge site (Iran). *Russian Meteorology and Hydrology* 42(3):204-211
- Rastogi D, Kao SC, Ashfaq M, Mei R, Kabela ED, Gangrade S, Naz BS, Preston BL, Singh N, and over Qareh-Su basin, Golestan province, Iran. *Iran-Water Resources Research* 12(1):56-67 (In Persian)
- Bakhtiari B, Afzali Gorouh Z and Qaderi K (2016b) Designing PMP calculator for statistical estimation of probable maximum precipitation (Case study: selected stations in Gilan Province, Iran). *Iranian Journal of Rainwater Catchment Systems* 4(10):1-12 (In Persian)
- Beauchamp J, Leconte R, Trudel M and Brissette F (2013) Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate. *Water Resources Research* 49(6):3852-3862
- Chen X, Hossain F, and Leung LR (2017) Probable maximum precipitation in the U.S. Pacific Northwest in a changing climate. *Water Resources Research* 53(11):9600-9622
- Chow VT (1951) A general formula for hydrologic frequency analysis. *American Geophysic Union* 32:231-237
- Chylek P, Li J, Dubey MK, Wang M, and Lesins G (2011) Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 11(8):22893-22907
- Desa MN, Noriah AB, and Rakhecha PR (2001) Probable maximum precipitation for 24h duration over southeast Asian monsoon region- Selangor, Malaysia. *Atmospheric Research* 58(1):41-54
- Fattahi E and Edraki M (2010) Estimation of probable maximum precipitation based on synoptic-convergence method in Bakhtiari river basin. *Application of Natural Geography in the Environmental Programming*
- Ghahraman B (2008) Estimation of one day duration probable maximum precipitation over atrak watershed in Iran. *Iranian Journal of Science and Technology* 19(6):21-29
- Ghahraman B, Hossein-Poor Tehrani M, Farahi G, and 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)
- IPCC (2014) Climate change 2014: Synthesis report contribution of working groups I II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Core Writing Team R K Pachauri and L A Meyer (eds )] IPCC Geneva Switzerland 151 pp .
- Jahandideh Z (2017) Investigation of climate change effects on probable maximum precipitation (PMP) in Fars province. Water Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman (In Persian)

- Stratz SA and Hossain F (2014) Probable maximum precipitation in a changing climate: Implications for dam design. *Journal of Hydrologic Engineering* 19(12)
- Taei Semiromi S, Moradi HR, and Khodagholi M (2014) Simulation and prediction some of climatic variables by multiple linear model SDSM and atmospheric general circulation models (Case study: Neishabour). *Journal of Human and Environment* 12(28):1-16 (In Persian)
- Wilby RL and Dawson CW (2013) The statistical downscaling model: Insights from one decade of application. *International Journal of Climatology* 33(7):1707-1719
- WMO (2009) Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation. Third Edition Publication 1045. World Meteorological Organization. Geneva
- Anantharaj VG (2017) Effects of climate change on probable maximum precipitation: A sensitivity study over the Alabama-Coosa-Tallapoosa River Basin. *Journal of Geophysical Research* 122(9):4808-4828
- Rezaee-pazhand H and Ghahraman B (2006) Estimating maximum daily precipitation by multi-station method: A Case study of North Khorasan. *Iran-Water Resources Research* 2(1):45-53 (In Persian)
- Rousseau AN, Klein IM, Freudiger D, Gagnon P, Frigon A, and Ratté-Fortin C (2014) Development of a methodology to evaluate probable maximum precipitation (PMP) under changing climate conditions: Application to southern Quebec, Canada. *Journal of Hydrology* 519(PD):3094-3109
- Shafiei M and Ghahraman B (2009) Spatial distribution of probable maximum precipitation for 24 h duration over Ghareh Ghum watershed. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage* 3(2):50-59 (In Persian)