

## Assessment of Climate Change Scenarios Uncertainty in Estimating Probable Maximum Precipitation (PMP) in the Caspian Sea Coastal Provinces

Farideh Yahyaei<sup>1</sup>  | Mahdi Delghandi<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Water and Soil Department, Faculty of Agricultural Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup> Water and Soil Department, Faculty of Agricultural Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### Article Info

#### Article type:

Research Article

#### Article history:

Received 04 August 2024

Received in revised form 31

October 2024

Accepted 20 November 2024

Published online 29 January  
2024

#### Keywords:

climate change,  
maximum probable  
precipitation,  
AOGCM models,  
greenhouse gases

### ABSTRACT

**Objective:** One of the most critical meteorological variables influenced by climate change is the Probable Maximum Precipitation (PMP), a key parameter in the design of high-risk water infrastructures such as dams. This study assesses the impacts of climate change on PMP across the coastal provinces of the Caspian Sea (including synoptic stations in Anzali, Rasht, Ramsar, Babolsar, Qaemshahr, and Gorgan).

**Methods:** To generate climate change scenarios for two periods (2025-2054 and 2055-2084), the outputs of 18 AOGCM models and three greenhouse gas emission scenarios (SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) were used. To reduce uncertainties in the AOGCM outputs, two methods-weighted averaging and probabilistic analysis-were employed. In the weighted averaging method, AOGCM models were ranked and weighted based on their accuracy in simulating precipitation of baseline period. In the probabilistic method, probability distributions were applied to generate precipitation scenarios at probability levels of 0.5, 0.75, and 0.90.

**Results:** The findings revealed significant uncertainty among AOGCM outputs and emission scenarios in estimating PMP, indicating that PMP changes in the studied stations do not follow a consistent pattern. However, in the weighted averaging approach, PMP is generally expected to decrease in the first period and show a slight increase in the second period.

**Conclusions:** For designing high-risk structures, it is recommended to utilize the results from the critical scenario with a 0.90 probability level. In this case, the increase in PMP due to climate change varies from approximately 12% at Qaemshahr station to a maximum of 48% at Gorgan station.

\*Corresponding author, Email:delghandi@gmail.com

**Cite this article:** Cite this article: Yahyaei, F., & Delghandi, M. (2024). Assessment of Climate Change Scenarios Uncertainty in Estimating Probable Maximum Precipitation (PMP) in the Caspian Sea Coastal Provinces. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.22034/nawee.2024.487529.1117>

Publisher: Gonbad Kavous University.



## بررسی عدم قطعیت سناریوهای تغییر اقلیم در برآورد حداکثر بارش محتمل (PMP) استان‌های ساحلی دریای خزر

فریده یحیائی<sup>۱</sup>، مهدی دلقندی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> گروه آموزشی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

<sup>۲</sup> گروه آموزشی آب و خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله	هدف: یکی از مهم‌ترین متغیرهای هواشناسی که تغییر اقلیم بر آن تأثیر می‌گذارد، حداکثر بارش محتمل (PMP) است؛ معیاری که نقش مهمی در طراحی سازه‌های آبی با ریسک بالا، مانند سدها، دارد. در این پژوهش، اثرات تغییرات اقلیمی بر PMP در استان‌های ساحلی دریای خزر (ایستگاه‌های سینوپتیک انزلی، رشت، رامسر، بابلسر، قائم‌شهر و گرگان) بررسی شده است.
مقاله پژوهشی	<b>مواد و روش‌ها:</b> برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، در دو دوره زمانی (۲۰۲۵-۲۰۵۴ و ۲۰۸۴-۲۰۵۵)، از خروجی ۱۸ مدل AOGCM و سه سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) استفاده شد. به منظور کاهش عدم قطعیت نتایج حاصل از این مدل‌ها، دو روش میانگین وزنی و احتمالاتی به کار گرفته شد. در روش میانگین وزنی، مدل‌های AOGCM بر اساس دقت شبیه‌سازی بارش در دوره‌های گذشته رتبه‌بندی و وزن‌دهی شدند، در حالی که در روش احتمالاتی، توزیع‌های احتمالی برای تولید سناریوهای بارش با سطوح احتمالی ۰/۵۰، ۰/۷۵ و ۰/۹۰ به کار رفت.
تاریخ دریافت:	نتایج: نتایج نشان‌دهنده عدم قطعیت بالا در بین خروجی‌های مدل‌ها و سناریوهای مختلف در تخمین PMP بود و بیانگر این نکته است که تغییرات PMP در ایستگاه‌های مورد مطالعه، الگوی ثابتی را دنبال نمی‌کند. با این حال، در روش میانگین وزنی، به‌طور کلی انتظار می‌رود PMP در دوره اول کاهش و در دوره دوم افزایش کمی را تجربه کند.
تاریخ بازنگری:	<b>نتیجه‌گیری:</b> برای طراحی سازه‌های با ریسک بالا، توصیه می‌شود که از نتایج سناریوی انتشار بحرانی با سطح احتمال ۰/۹۰ استفاده شود. در این حالت، افزایش PMP در اثر تغییرات اقلیمی بین حدود ۱۲ درصد برای ایستگاه قائم‌شهر تا حداکثر ۴۸ درصد برای ایستگاه گرگان متغیر خواهد بود.
تاریخ پذیرش:	کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، حداکثر بارش محتمل، مدل‌های AOGCM، گازهای گلخانه‌ای.
تاریخ انتشار:	

\*نویسنده مسئول، Email: delghandi@gmail.com

استناد: یحیائی، ف؛ و دلقندی، م (۱۴۰۳). بررسی عدم قطعیت سناریوهای تغییر اقلیم در برآورد حداکثر بارش محتمل (PMP) استان‌های ساحلی دریای خزر. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*.

<http://doi.org/10.22034/nawee.2024.487529.1117>



## مقدمه

انقلاب صنعتی، جنگل‌زدایی و تخریب محیط‌زیست طی دهه‌های اخیر غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین را به شدت افزایش داده است (جورابلو و همکاران، ۱۳۹۷؛ حمزه و همکاران، ۱۳۹۷). این فرآیند باعث برهم‌خوردن تعادل دمایی زمین و در نتیجه، افزایش دمای جو (گرمايش جهانی) شده است (Imani et al., 2023؛ دلقندی و مؤذن‌زاده، ۱۳۹۵). گرمایش جهانی با تغییر در متغیرهای تعیین‌کننده اقلیم باعث شکل‌گیری پدیده تغییر اقلیم شده است که به عنوان هر نوع تغییر مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت میانگین آب و هوایی تعریف می‌شود (Lee & Singh, 2020؛ دلقندی و همکاران، ۱۳۹۳). از جمله اثرات مهم تغییر اقلیم، تغییر در چرخه هیدرولوژی و منابع آب است که افزایش احتمال وقوع رخداد‌های حدی چون سیلاب و خشکسالی‌های گسترده در نقاط مختلف کره زمین را در پی دارد (Gao et al., 2020). بسته به منطقه و شرایط آب‌وهوایی، تغییر اقلیم می‌تواند منجر به افزایش (Zhang et al., 2017) و یا کاهش رواناب رودخانه‌ها (Zhai & Tao, 2020) شود. به‌عبارت‌دیگر تغییر اقلیم در مناطق مختلف می‌تواند اثرات متفاوتی داشته باشد. یکی از پارامترهایی که انتظار می‌رود تحت‌تأثیر تغییر اقلیم قرار گیرد؛ حداکثر بارش محتمل (PMP) است (IPCC, 2007). از PMP برای طراحی سازه‌هایی با ریسک بالا مانند سدها و نیروگاه هسته‌ای استفاده می‌شود (WMO, 2009).

مطالعات مختلف نشان از تأثیرات متفاوت تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل (PMP) در مناطق مختلف ایران و جهان دارد. نتایج اصلی گروه و همکاران (۱۳۹۸) و منجزی و همکاران (۱۴۰۰) نشان داد که در اقلیم‌های نیمه مرطوب و حوضه پارسیان PMP در آینده کاهش خواهد یافت. (Thuy et al. (2019) در ویتنام نشان دادند که تحت تأثیر تغییر اقلیم، PMP در ایستگاه‌های مختلف به طور میانگین بین ۸ تا ۲۵ درصد افزایش خواهد یافت. Ben Alaya et al. (2020) عنوان نمودند در آمریکای شمالی به‌ازای هر یک درجه سانتی‌گراد افزایش دما، PMP به طور متوسط ۴ درصد افزایش می‌یابد. (Sarkar & Maity (2020) پیش‌بینی کردند که در هند، PMP در آینده به طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. (Johnson & Smithers (2020) در آفریقای جنوبی تفاوت‌های قابل‌توجهی در برآورد PMP بر اساس میزان بارش در مناطق مختلف را گزارش کردند. این مطالعات به روشنی نشان می‌دهند که تغییر اقلیم، تأثیرات گسترده‌ای بر برآوردهای PMP دارد. (Visser et al. (2022) پیش‌بینی کردند که PMP در استرالیا تا سال ۲۱۰۰ به طور متوسط بین ۱۳ تا ۳۳ درصد افزایش خواهد یافت. (Sammen et al. (2022) در مالزی افزایش PMP در دوره‌های آینده را پیش‌بینی کردند. (Bhatt & Venkata Srinivas (2019) در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که روش‌های جدید که تغییرات اقلیمی را مدنظر قرار می‌دهند، دقت بیشتری نسبت به روش‌های سنتی دارند. (Seo et al. (2023) نیز در کره جنوبی نشان دادند که روش‌های آماری، مانند نمودار هرفیلد تعدیل شده، کارایی بالایی در محاسبه PMP دارند. تفاوت این تأثیرات در مناطق مختلف، اهمیت تحلیل دقیق تأثیرات تغییر اقلیم بر PMP را برجسته می‌کند تا در صورت کاهش یا افزایش مقدار PMP در یک منطقه، طراحی سازه‌های وابسته به PMP با لحاظ کردن این تأثیرات صورت گیرد. این رویکرد به جلوگیری از تحمیل هزینه‌های اضافی در صورت کاهش PMP و همچنین به طراحی سازه‌هایی با ایمنی بالا در صورت افزایش PMP کمک می‌کند.

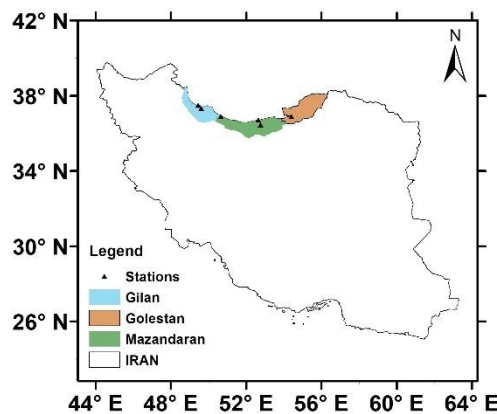
مطالعات مورد بررسی نشان داد که تغییرات اقلیمی می‌تواند اثرات متفاوتی بر PMP داشته باشد. در برخی از مناطق تغییر اقلیم منجر به افزایش و در برخی دیگر منجر به کاهش PMP گردیده است. از طرفی دیگر استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای انتشار مختلف، نتایج متفاوتی را رقم زده‌اند که این امر نیاز به دقت بیشتر در تحلیل‌ها را در بسیاری از مناطق، به‌ویژه مناطق پر بارش افزایش می‌دهد. مطالعات انجام شده در مناطق خاصی متمرکز بوده و مناطقی مانند استان‌های حاشیه دریای خزر کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. همچنین در مطالعات گذشته عدم قطعیت مربوط به مدل‌های اقلیمی و غیر اقلیمی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است که با در نظر گرفتن این عدم قطعیت‌ها، می‌توان با اطمینان بیشتری از نتایج کسب شده استفاده نمود. با توجه به تغییرات سریع اقلیمی و تأثیرات قابل‌توجه آن بر حوضه‌های آبریز، به ویژه در مناطق پر بارش مانند استان‌های حاشیه دریای خزر، نیاز است که مطالعات بیشتری صورت پذیرد. بنابراین تحقیق حاضر با این هدف صورت پذیرفت. منطقه مورد مطالعه در این

تحقیق، استان‌های حاشیه دریای مازندران می‌باشند که به‌عنوان یکی از مناطق پرباران کشور شناخته می‌شوند و از منابع آب سطحی قابل توجهی برخوردار هستند. با توجه به پیش‌بینی‌های آینده مبنی بر احتمال احداث سازه‌های مبتنی بر حداکثر بارش محتمل (PMP) در این مناطق، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر PMP اهمیت زیادی دارد. این تحقیق به تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر PMP در این نواحی می‌پردازد تا متخصصان بتوانند با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، برنامه‌ریزی بهتری برای طراحی سازه‌های آبی آینده انجام دهند.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق استان‌های حاشیه دریای مازندران هستند (شکل ۱). اراضی جنگلی، مراتع و زمین‌های حاصل‌خیز برای باغداری و زراعت از ویژگی‌های طبیعی این منطقه می‌باشد؛ از این رو به قطب کشاورزی کشور تبدیل شده است. ایستگاه‌های مورد بررسی در این تحقیق، ایستگاه‌های سینوپتیک شهرهای انزلی، رشت، رامسر، بابلسر، قائمشهر و گرگان هستند که میانگین بارش سالانه در این ایستگاه‌ها به ترتیب ۱۶۵۱، ۱۲۹۹، ۱۰۳۹، ۸۵۸، ۷۰۴ و ۵۸۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه به همراه ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک

### آماده‌سازی داده‌ها

جهت محاسبه PMP، داده‌های حداکثر بارش سالیانه برای کل طول دوره آماری برای هر شش ایستگاه استخراج گردید. داده‌ها مورد غربالگری اولیه قرار گرفتند، برای این منظور از روش نسبت‌ها برای بازسازی نواقص آماری ایستگاه‌ها استفاده شد. در مرحله بعدی سری زمانی بارش حداکثر سالیانه مورد تست ایستایی قرار گرفت. در بررسی ایستایی داده‌ها، مهم‌ترین مؤلفه، بررسی وجود روند در سری زمانی می‌باشد (Thuy et al., 2019)؛ بنابراین داده‌ها از نظر وجود یا عدم وجود روند، بررسی شدند. برای این منظور از آزمون کندال در محیط نرم‌افزار آماری SPSS استفاده شد. علاوه بر این داده‌ها از نظر وجود پرش و نوسانات دوره‌ای نیز مورد بررسی قرار گرفتند.

### محاسبه PMP

دو روش اصلی برای برآورد حداکثر بارش محتمل (PMP) وجود دارد: روش‌های هواشناسی-هیدرولوژیکی و روش‌های آماری (Lee & Singh, 2020). روش‌های رایج هواشناسی-هیدرولوژیکی شامل روش بیشینه‌سازی رطوبت، جابه‌جایی طوفان، روش عمومی، جداسازی طوفان و روش عمق-مساحت-مدت زمان هستند (Singh et al., 2018). در روش‌های آماری، روش هرشفیلد (Hershfield, 1961b; Hershfield, 1965) به دلیل سادگی و قابلیت استفاده با داده‌های محدود، بسیار رایج است (Lee & Singh, 2020). این روش بر اساس تحلیل فراوانی داده‌های تاریخی میانگین حداکثر بارش سالانه (MAMP) انجام می‌شود.

Hershfield (1961a) مقدار PMP را با استفاده از رابطه (۱) که فاکتور فراوانی ( $K_m$ ) آن را برابر با ۱۵ تعریف کرد، برآورد نمود.

$$X_m = \bar{X}_n + K_m S_n \quad (1)$$

که در آن  $X_m$  تخمین PMP برای ایستگاه است،  $\bar{X}_n$  و  $S_n$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار سری حداکثر بارش سالانه هستند. با این حال، در سال ۱۹۶۵، هرشفیلد پیشنهاد داد که این ضریب باید بر اساس مدت زمان بارش تغییر کند. او اشاره کرد که ضریب ۱۵ برای مناطق با بارش‌های سنگین و دوره‌های کوتاه بسیار زیاد است و نموداری ارائه کرد که نشان می‌دهد این ضریب بر اساس مدت بارندگی و MAMP بین ۵ تا ۲۰ متغیر است. در این روش،  $K_m$  با استفاده از یک نمودار از روی مقدار  $\bar{X}_n$  تعیین می‌شود (Micovic et al., 2015) هر چه مقدار  $\bar{X}_n$  کمتر باشد مقدار  $K_m$  عدد بزرگتری خواهد بود.

بارش‌های حدی با شدت‌های بالا به‌عنوان نمونه بارش با دوره بازگشت ۵۰ ساله، ممکن است در یک بازه زمانی کوتاه مثلاً ۳۰ ساله، رخ دهند چنین بارش‌هایی ممکن است به‌عنوان داده پرت لحاظ شوند. این داده‌ها تأثیر زیادی روی میانگین ( $\bar{X}_n$ ) و انحراف معیار ( $S_n$ ) سری زمانی دارند. مقدار این تأثیر در سری زمانی‌های طولانی‌مدت کمتر از سری‌های زمانی کوتاه‌مدت است. این موضوع توسط هرشفیلد در سال ۱۹۶۱ با استفاده از سری‌های فرضی با طول دوره‌های متفاوت بررسی شد و اصلاح لازم در مورد  $\bar{X}_n$  (MAF) و  $S_n$  (SAF) در قالب دو نمودار ارائه گردید (Hershfield, 1961b).

میانگین و انحراف معیار سری‌های سالانه، با افزایش طول دوره آماری، افزایش می‌یابد. زیرا توزیع فراوانی بارش‌های حداکثر به سمت راست چولگی دارند. بنابراین با افزایش طول دوره آماری احتمال استخراج داده با مقدار بزرگ‌تر برای میانگین ( $\bar{X}_n$ ) و انحراف معیار ( $S_n$ ) افزایش می‌یابد لذا لازم است مقادیر  $\bar{X}_n$  و  $S_n$  برای دوره‌های کوتاه‌تر اصلاح شوند. ضریب اصلاحی مربوط به طول دوره آماری مورد بررسی برای (MLR)  $\bar{X}_n$  و (SLR)  $S_n$  بسته به طول دوره آماری متفاوت است. برای ایستگاه‌های با طول دوره آماری بیشتر از ۵۰ سال مقدار ضریب اصلاحی، یک در نظر گرفته می‌شود و برای ایستگاه‌های با طول دوره آماری کمتر از ۵۰ سال بسته به تعداد سال‌های آماری ضریبی بین ۱ تا ۱/۳ اعمال می‌شود (Hershfield, 1961b).

نحوه داده‌برداری در ایستگاه‌های هواشناسی به‌ندرت منجر به استخراج صحیح بارش با طول مدت مشخص می‌گردد. به‌عنوان مثال حداکثر بارش ۲۴ ساعته حاصل از بارش‌های روزانه به‌احتمال فراوان کمتر از حداکثر بارش ۲۴ ساعته‌ای خواهد بود که از ۱۴۴۰ دقیقه بارش متوالی ایجاد شده باشد؛ بدون این که فاصله زمانی بارش ۲۴ ساعته را یک بازه زمانی ثابت ۸ صبح تا ۸ صبح روز بعد در نظر بگیریم. بنابراین با قرائت مقدار بارش بازه‌های زمانی ثابت، مقداری خطا در ثبت بارش با طول مدت مشخص وجود خواهد داشت. هر چه تعداد بازه زمانی قرائت شده بیشتر باشد مقدار خطا کاهش می‌یابد (Hershfield, 1961a). در این تحقیق برای برآورد PMP ۲۴ ساعته از بارش‌های روزانه استفاده شده است. از آنجایی که در ایستگاه‌های هواشناسی بارش‌های ۲۴ ساعته در یک بازه زمانی ثابت ۲۴ ساعته، ثبت می‌گردند؛ مقدار ضریب اصلاحی برای این منظور عدد ۱/۱۳ تعیین می‌شود (Miller, 1964). با توجه به مطالب ذکر شده و محاسبه ضرایب اصلاحی، مقدار PMP از روابط (۲) تا (۴) محاسبه می‌شود:

$$PMP = (\bar{X}_{nadj} + K_m S_{nadj}) \times 1.13 \quad (2)$$

$$\bar{X}_{nadj} = \bar{X}_n \times MAF \times MLR \quad (3)$$

$$S_{nadj} = S_n \times SAF \times SLR \quad (4)$$

در این روابط  $n$  تعداد سال‌های آماری و  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار اصلاح شده سری زمانی هستند. بقیه پارامترها نیز پیشتر شرح داده شده‌اند.

تولید سناریوهای تغییر اقلیم

در این تحقیق برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، از خروجی ۱۸ مدل AOGCM شامل ACCESS-ESM1-، ACCESS-CM2، CMCC-ESM2، CMCC-CM2-SR5، CESM2-WACCM، CANESM5، CAMS-CSM1، BCC-CSM2-MR-5، MIROC6، KACE-1-0-G، IPSL-CM6A-LR، INM-CM5، JIEM-ESM، GFDL-ESM4، FGOALS-g3، FGOALS-f3-L و MRI-ESM2-0 و TaiESM1 تحت سه سناریوی SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 استفاده شد. باتوجه به موجودیت آمار ایستگاه‌های مورد مطالعه، دوره ۲۰۰۰-۱۹۷۱ به عنوان دوره پایه و همچنین دو دوره ۳۰ ساله ۲۰۵۴-۲۰۲۵ و ۲۰۸۴-۲۰۵۵ به عنوان دوره‌های آتی انتخاب شدند. برای محاسبه سناریوی تغییر اقلیم در هر مدل AOGCM، مقادیر نسبت میانگین بارندگی ۳۰ ساله در دوره‌های آتی به دوره شبیه‌سازی شده پایه (۲۰۰۰-۱۹۷۰) توسط همان مدل، محاسبه شد (رابطه ۵).

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_{i(AOGCM)}}{\bar{P}_{i(Base)}} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $\Delta P_i$  بیانگر نسبت بارش دوره آتی به دوره پایه برای هر ماه  $(1 \leq i \leq 12)$ ،  $\bar{P}_{i(AOGCM)}$  میانگین ۳۰ ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM در دوره آتی برای هر ماه،  $\bar{P}_{i(Base)}$  میانگین ۳۰ ساله بارش شبیه‌سازی شده توسط AOGCM برای هر ماه می‌باشد (Wilby & Harris, 2006). باتوجه به تعداد مدل‌های AOGCM (۱۸ مدل)، برای هر ماه و هر دوره آتی، تحت هر سناریوی انتشار ۱۸ تا  $\Delta P$  محاسبه می‌شود. برای کاربرد این  $\Delta P$ ها در تولید سناریوی بارش از دو روش استفاده شد. در روش اول (روش احتمالاتی)، توابع توزیع مختلف بر  $\Delta P$ های محاسبه شده، برازش داده شد و در نهایت با استفاده از آزمون کلموگراف اسمیرنوف بهترین تابع توزیع برای هر ماه تعیین گردید. سپس با تعیین تابع توزیع تجمعی (CDF)؛ مقادیر  $\Delta P$  در سه سطح احتمال ۰/۵، ۰/۷۵ و ۰/۹۰ استخراج گردید. در روش دوم (روش وزنی) بر اساس رتبه‌بندی مدل‌ها و اختصاص یک وزن به هر مدل، میانگین وزنی  $\Delta P$  برای هر ماه محاسبه گردید. برای رتبه‌بندی مدل‌های AOGCM، دقت این مدل‌ها در پیش‌بینی بارش دوره گذشته توسط سه شاخص آماری ضریب همبستگی (r)، ریشه دوم مربعات خطا (RMSE) و (Gupta et al., 2009) KGE مورد بررسی قرار گرفت. پس از محاسبه شاخص‌های آماری، رتبه هر مدل AOGCM بر اساس این شاخص‌ها محاسبه گردید. سپس با استفاده از روابط (۶) و (۷) به ترتیب رتبه نهایی و وزن هر مدل تعیین شد (Ahmed et al., 2019).

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \text{rank}_i}{nm} \quad (6)$$

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (7)$$

در این روابط، R رتبه مدل در هر ماه،  $\text{rank}_i$  رتبه مدل AOGCM بر اساس شاخص آماری  $i$ ، n تعداد مدل‌های AOGCM، m تعداد شاخص‌های آماری،  $W_i$  وزن مدل در هر ماه و مقدار  $i$  در رابطه (۶) مربوط به شاخص آماری و در رابطه (۷) مربوط به شماره مدل AOGCM است. با محاسبه وزن هر مدل، میانگین وزنی  $\Delta P$  با ضرب کردن مقدار  $\Delta P$  هر مدل در وزن آن محاسبه می‌گردد.

#### ریز مقیاس نمایی

در این تحقیق برای ریزمقیاس نمایی مکانی و زمانی از مولد آب‌وهوای تصادفی LARS-WG استفاده گردید. توانایی و کارایی این مدل در تحقیقاتی که صورت گرفته، به اثبات رسیده است. این مدل می‌تواند سری‌های زمانی روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشید را تولید کند. برای این منظور از داده‌های روزانه مشاهده شده یک ایستگاه مشخص استفاده می‌کند تا یک مجموعه از پارامترها برای توزیع‌های احتمال متغیرهای هواشناسی و همچنین همبستگی بین آنها تولید کند. این مجموعه از پارامترها برای تولید سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی ساختگی با طول دوره دلخواه استفاده می‌شود. LARS-WG از یک توزیع نیمه تجربی برای تخمین توزیع‌های احتمال دوره‌های خشک و تر، بارش، دمای حداقل و حداکثر و تابش

خورشیدی روزانه استفاده می‌کند. SED همچون تابع توزیع احتمال تجمعی<sup>۱</sup> (PDF) تعریف شده است (Semenov & Stratonovitch, 2010) در این تحقیق، با استفاده از داده‌های مشاهداتی دوره پایه ۲۰۰۰-۱۹۷۰ (مربوط به ایستگاه‌های مورد مطالعه) و مقادیر  $\Delta P$ ، سناریوهای اقلیمی روزانه بارش برای دو دوره ۳۰ ساله آتی (۲۰۵۴-۲۰۲۵ و ۲۰۸۴-۲۰۵۵) تولید گردید.

## نتایج و بحث

### محاسبه مقدار PMP در دوره گذشته

نتایج تست ایستایی نمایان گر ایستا بودن داده‌های حداکثر بارش سالانه در هر شش ایستگاه بود. برای محاسبه مقادیر حداکثر بارش محتمل در ایستگاه‌های مورد مطالعه، با استخراج میانگین و انحراف معیار حداکثر بارش سالیانه دوره گذشته، اقدام به اصلاح این دو متغیر گردید و با استفاده از رابطه (۲) مقادیر PMP برای دوره گذشته محاسبه گردید (جدول ۱).

جدول ۱- مقادیر پارامترهای دخیل در محاسبه PMP برای دوره گذشته

ایستگاه	N	$\bar{X}_n$ (mm)	$S_n$ (mm)	MAF	MLR	SAF	SLR	$\bar{X}_{nadj}$ (mm)	$S_{nadj}$ (mm)	$K_m$	PMP (mm)
انزلی	۴۹	۸۵/۵	۱۰/۷	۱/۰۲	۱/۰	۱/۱	۱/۰	۸۷/۲	۱۱/۸	۱۵/۷	۳۰۹
رشت	۵۰	۷۷/۵	۱۴/۸	۱/۰۲	۱/۰	۱/۰۹	۱/۰	۷۹/۱	۱۶/۲	۱۶/۱	۳۸۵
رامسر	۵۰	۷۶/۹	۱۶/۵	۱/۰۲	۱/۰	۱/۱	۱/۰	۷۸/۴	۱۸/۲	۱۶/۲	۴۲۱
بابلسر	۵۰	۶۸/۶	۱۵/۴	۱/۰۲	۱/۰	۱/۰۸	۱/۰	۷۰/۰	۱۶/۷	۱۶/۶	۳۹۲
قائم‌شهر	۴۰	۵۷/۵	۱۵/۲	۱/۰۱	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۲	۵۸/۷	۱۵/۹	۱۷/۱	۳۷۵
گرگان	۵۰	۴۷/۵	۱۴/۹	۱/۰۱	۱/۰	۱/۰۳	۱/۰	۴۸/۰	۱۵/۳	۱۷/۷	۳۶۰

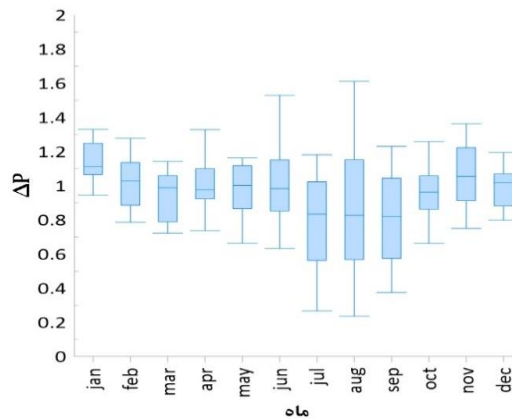
باتوجه به جدول (۱)، طول دوره آماری در تمامی ایستگاه‌ها به جز ایستگاه قائمشهر حدوداً ۵۰ سال است. مقادیر  $K_m$  در بازه ۱۵/۷ تا ۱۷/۷ متغیر است. همچنین، محدوده تغییرات PMP در ایستگاه‌های مورد مطالعه از حدود ۳۰۸ تا ۴۲۱ میلی‌متر می‌باشد. در بین این ایستگاه‌ها، رامسر بیشترین مقدار PMP را داراست و پس از آن به ترتیب ایستگاه‌های بابلسر، رشت، قائمشهر، گرگان و انزلی قرار دارند. یکی از نتایج قابل توجه جدول (۱) این است که با وجود میانگین بالاتر حداکثر بارش سالانه در ایستگاه انزلی نسبت به ایستگاه گرگان، مقدار PMP برای انزلی کمتر از گرگان تعیین شده است. علت این تفاوت را باید در مقدار  $K_m$  و انحراف معیار داده‌های این دو ایستگاه جست‌وجو کرد. از یک طرف، به دلیل پایین‌تر بودن میانگین حداکثر بارش سالانه در گرگان، مقدار  $K_m$  در این ایستگاه عدد بالاتری است و از طرف دیگر، بارش‌های حداکثر سالانه ایستگاه انزلی از نظر مقدار، یکنواختی بیشتری نسبت به گرگان دارند که این امر سبب کاهش انحراف معیار در ایستگاه انزلی نسبت به گرگان شده و در نتیجه، مقدار PMP در گرگان نسبت به انزلی عدد بالاتری به دست آمده است.

### نتایج تولید سناریوهای تغییر اقلیم

#### تعیین مقادیر $\Delta P$

<sup>1</sup>. Cumulative Probability Distribution Function.

برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، در ابتدا با استفاده از رابطه (۵) مقادیر ماهانه  $\Delta P$  ایستگاه‌ها برای دو دوره آتی (۲۰۸۴-۲۰۵۵ و ۲۰۲۵-۲۰۵۴) و سناریوهای انتشار محاسبه گردید که برای نمونه، نتایج مربوط به دوره آتی اول و سناریوی SSP2-4.5 ایستگاه انزلی در شکل (۲) ارائه شده است.



شکل ۲- نمودار جعبه ای مقادیر  $\Delta P$  برای ایستگاه سینوپتیک در دوره آتی اول تحت سناریوی SSP2-4.5

باتوجه به شکل (۲) مشخص است که عدم قطعیت مدل‌های AOGCM در برآورد  $\Delta P$  در ماه‌های گرم سال بیشتر است. به‌عنوان مثال برای ایستگاه سینوپتیک انزلی در دوره آتی اول و تحت سناریوی SSP2-4.5 در ماه آگوست مقدار  $\Delta P$  بین ۰/۳ تا ۱/۷ تغییر می‌کند که نشان می‌دهد اختلاف بین برخی از مدل‌ها در شبیه‌سازی  $\Delta P$  به حدود ۶ برابر (۶۰۰ درصد) می‌رسد (این اختلاف مربوط به داده‌های مندرج در نمودار جعبه‌ای است و داده‌های پرت لحاظ نشده‌اند)؛ اما در دیگر ماه‌ها این عدم قطعیت کاهش می‌یابد به طوری که در ماه ژانویه،  $\Delta P$  بین ۱ تا حدود ۱/۳ متغیر است؛ بنابراین اختلاف ۶۰۰ درصدی بین مدل‌ها در ماه آگوست به حدود ۳۰ درصد در ماه ژانویه کاهش می‌یابد این مطلب در مورد دیگر سناریوها و بقیه ایستگاه‌ها نیز با اندکی تغییر در ارقام، صدق می‌کند. باتوجه به این که هدف از تولید سناریوهای تغییر اقلیم، محاسبه PMP می‌باشد و مقدار PMP به داده‌های حداکثر بارش سالانه وابسته است و مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته در ماه‌های سرد سال رخ می‌دهد؛ لذا این عدم قطعیت بالا در ماه‌های گرم سال، تأثیری بر نتایج PMP نخواهد داشت.

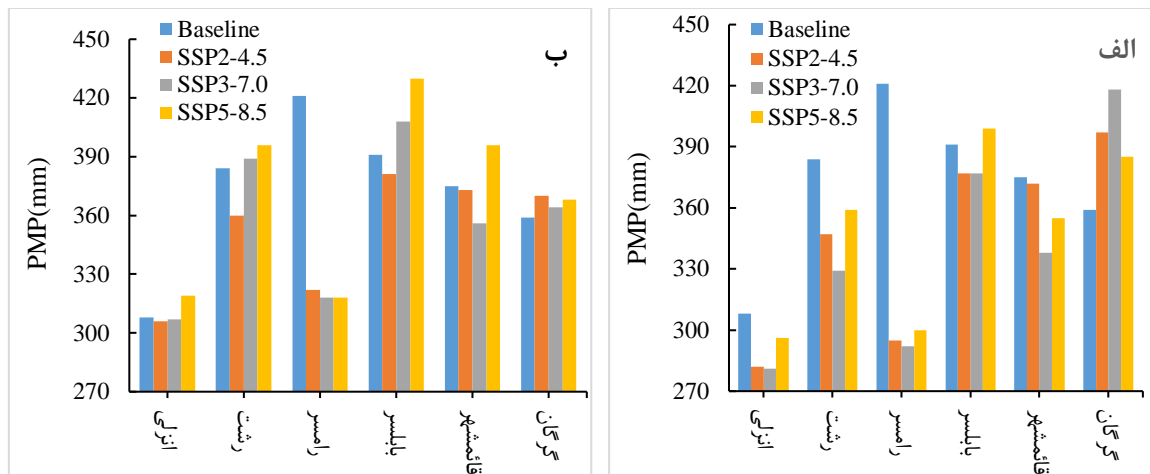
#### تأثیر تغییر اقلیم بر PMP

با وارد کردن  $\Delta P$ ‌های محاسبه شده به دو روش وزنی و احتمالاتی و همچنین داده‌های مشاهداتی بارش روزانه برای دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به مدل LARS-WG، سناریوهای بارش روزانه برای دو دوره آتی (به دو روش وزنی و احتمالاتی) تولید شد و بر اساس این سناریوها اقدام به محاسبه مقادیر PMP گردید.

در روش وزنی با استفاده از سناریوهای روزانه بارش تولید شده، MAMP محاسبه و بر اساس آن مقادیر  $K_m$  استخراج گردید (جدول ۲). با محاسبه  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  اصلاح شده (جدول ۲)، مقادیر PMP محاسبه و در شکل (۳) برای هر شش ایستگاه در دو دوره آتی ارائه گردید.

جدول ۲- مقادیر  $(K_m)$ ،  $(\bar{X}_{nadj})$  و  $(S_{nadj})$  تحت سه سناریوی انتشار در دو دوره آبی (روش وزنی)

دوره	سناریو *	انزلی			رشت			رامسر			بابلسر			قائم شهر			گرگان			
		K	X	S	K	X	S	K	X	S	K	X	S	K	X	S	K	X	S	
گذشته	---	۱/۷	۸/۲	۱/۸	۱/۱	۷/۱	۱/۲	۱۶/۲	۷/۴	۱/۲	۱/۶	۷/۹	۱۶/۷	۱/۲	۵/۷	۱/۹	۱/۷	۴/۰	۱/۳	۵
	۵	۷	۱	۶	۹	۶	۸	۸	۶	۹	۷	۸	۵	۷	۸	۵	۷	۸	۵	
	SSP2-4.5	۱/۶	۹/۷	۱/۲	۱/۲	۷/۱	۱/۲	۱۶/۳	۷/۲	۱/۳	۱/۶	۶/۹	۱/۹	۱/۳	۵/۹	۱/۹	۱/۳	۵/۱	۱/۲	۷
آبی اول	۵	۰	۰	۶	۸	۴	۷	۱	۶	۹	۵	۷	۴	۵	۷	۶	۷	۶	۷	
	SSP3-7.0	۱/۶	۹/۷	۱/۱	۱/۳	۷/۳	۱/۲	۱۶/۴	۷/۹	۱/۲	۱/۷	۶/۹	۱/۹	۱/۴	۵/۲	۱/۲	۱/۲	۵/۸	۱/۳	۶
	۵	۰	۰	۶	۶	۳	۴	۱	۶	۸	۵	۷	۴	۴	۷	۶	۷	۶	۸	
آبی دوم	SSP5-8.5	۱/۴	۹/۹	۱/۹	۱/۱	۸/۹	۱/۸	۱۶/۲	۷/۴	۱/۱۶	۱/۵	۷/۱	۱/۱	۱/۳	۶/۰	۱/۹	۱/۳	۵/۹	۱/۵	۶
	۵	۴	۰	۶	۰	۴	۹	۶	۲	۷	۷	۶	۴	۴	۷	۵	۷	۵	۶	
	SSP2-4.5	۱/۵	۹/۴	۱/۵	۱/۲	۷/۰	۱/۸	۱۶/۴	۷/۰	۱/۹	۱/۷	۶/۸	۱/۶/۲	۱/۵	۵/۸	۱/۰	۱/۴	۵/۸	۱/۸	۵
آبی دوم	۵	۳	۱	۶	۹	۴	۵	۲	۶	۸	۷	۳	۶	۷	۶	۷	۳	۵	۵	
	SSP3-7.0	۱/۳	۹/۴	۱/۴	۱/۱	۸/۱	۱/۴	۱۶/۲	۷/۶	۱/۲/۶	۱/۵	۷/۶	۱/۷/۶	۱/۳	۵/۴	۱/۰	۱/۴	۵/۹	۱/۵	۵
	۵	۷	۱	۶	۱	۶	۸	۶	۲	۶	۷	۶	۷	۶	۵	۷	۳	۵		
آبی دوم	SSP5-8.5	۱/۲	۹/۹	۱/۱	۱/۱	۸/۲	۱/۸	۱۲/۲	۷/۳	۱/۵/۶	۱/۵	۷/۹	۱/۷/۶	۱/۲	۵/۸	۱/۱	۱/۳	۵/۱	۱/۷	۵
	۵	۸	۲	۶	۱	۶	۱۶	۸	۲	۶	۲	۸	۷	۶	۷	۷	۷	۵	۵	



شکل ۳- مقادیر PMP در دوره گذشته و سناریوهای انتشار مختلف (روش وزنی) الف: دوره آبی اول ب: دوره آبی دوم

همان گونه که از شکل (۳) پیداست در دوره آبی اول مقدار PMP در همه ایستگاه‌ها به جزء ایستگاه گرگان کاهش می‌یابد. در این بین مقدار کاهش PMP در ایستگاه رامسر خیلی بیشتر می‌باشد. دلیل این نتایج را باید در عناصر رابطه (۲) جست‌وجو کرد. چرا که مقدار PMP نتیجه اعمال ریاضی بین سه پارامتر  $\bar{X}_{nadj}$ ،  $S_{nadj}$  و  $K_m$  می‌باشد. با توجه به جدول (۲) مقدار  $K_m$  با اینکه در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است ولی در دوره‌های آبی، تفاوت چندانی با دوره گذشته ندارد. لذا تغییرات PMP در دوره‌های آبی بایستی نتیجه دو پارامتر  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  باشد. در دوره آبی اول مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  در ایستگاه انزلی و گرگان تحت هر سه سناریو کمتر از ۸ میلی متر افزایش داشته است با این وجود مقدار PMP در هر سه سناریو کاهش یافته است در مورد بقیه ایستگاه‌ها مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  در دوره‌های آبی تغییر چندانی نداشته است ولی به طور کلی در سناریوی SSP5-8.5 مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  در دوره آبی نسبت به دوره گذشته افزایش داشته است ولی در دو سناریوی دیگر این تغییر کاهش یافته است. با این وجود این افزایش و کاهش در حد چند میلی‌متر بوده است و نمی‌تواند توجیه کننده تغییرات چند ده میلی‌متری PMP باشد. با دقت در جدول (۲) مشخص می‌شود که تغییرات PMP در دوره‌های آبی تحت تأثیر  $S_{nadj}$  می‌باشد چرا که در همه ایستگاه‌ها به جزء

ایستگاه گرگان مقدار  $S_{nadj}$  در دوره آتی کاهش یافته است. به عبارت دیگر پیش بینی می شود سری زمانی حداکثر بارش سالانه در دوره های آتی یکنواخت تر گردد. این مطلب در مورد ایستگاه گرگان متفاوت است و مقدار  $S_{nadj}$  افزایش یافته است. از آنجا که در محاسبه PMP، مقدار  $S_{nadj}$  در ضریب فراوانی که تقریباً بین ۱۵ تا ۱۷ متغیر است ضرب می شود از اثر گذاری فراوانی در محاسبه PMP برخوردار است. همین امر باعث شده است که در دوره آتی اول در ایستگاه گرگان شاهد افزایش PMP و در بقیه ایستگاه ها شاهد کاهش PMP باشیم. کاهش شدید PMP در ایستگاه رامسر نیز به همین موضوع بر می گردد چرا که در این ایستگاه مقدار  $S_{nadj}$  از حدود ۱۸ به حدود ۱۱ میلی متر کاهش یافته است (شکل ۳ الف).

نتایج PMP در دوره آتی دوم نشان می دهد که تحت سناریوی SSP5-8.5 در همه ایستگاه ها به جزء ایستگاه رامسر مقدار PMP اندکی افزایش می یابد. در سناریوی SSP3-7.0 در سه ایستگاه انزلی، رشت و گرگان تغییری در مقدار PMP مشاهده نمی شود؛ ولی در ایستگاه رامسر کاهش شدید PMP و در ایستگاه بابلسر افزایش اندک PMP رخ داده است. مشابه دوره آتی اول می توان گفت که در این دوره نیز مقدار  $K_m$  تغییر چندانی نسبت به دوره گذشته نداشته است و تغییرات PMP بیشتر تحت تأثیر  $S_{nadj}$  و تا حدودی  $\bar{X}_{nadj}$  می باشد. به عنوان مثال در دوره آتی دوم مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دو سناریوی دیگر افزایش یافته است و همین امر باعث گردیده مقدار PMP تحت تأثیر این سناریو نسبت به دو سناریوی انتشار دیگر، اعداد بالاتری را نشان دهد. هر چند که از افزایش  $S_{nadj}$  تحت این سناریو نیز نباید غافل بود. در کل تحت سناریوی SSP5-8.5 هم مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  افزایش یافته است و هم مقدار  $S_{nadj}$ . در دو سناریوی دیگر، تغییرات  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  نسبت به سناریوی SSP5-8.5 کمتر بوده است به جزء ایستگاه رامسر که در نهایت منجر به تغییر اندکی در مقدار PMP در دوره آتی دوم نسبت به دوره گذشته شده است.

مقایسه نتایج در دو دوره آتی نشان می دهد که به طور کلی در دوره آتی دوم مقدار PMP نسبت به دوره آتی اول افزایش می یابد. تفاوت دیگر در این دو دوره مربوط به ایستگاه گرگان می باشد که با توجه به  $S_{nadj}$  مشخص می گردد بارش های حداکثر سالانه در این ایستگاه، در دوره آتی دوم یکنواخت تر خواهد شد.

#### تأثیر تغییر اقلیم بر PMP به روش احتمالاتی

با استخراج سناریوهای بارش در سه سطح احتمال مقادیر  $\bar{X}_{nadj}$ ،  $S_{nadj}$  و  $K_m$  در سه سطح احتمال محاسبه شدند (جداول ۳ تا ۵). با استفاده از مقادیر جداول (۳ تا ۵) و رابطه (۲) مقدار PMP در هر دوره آتی تحت سه سناریوی انتشار و سه سطح احتمال تعیین گردید (شکل ۴).

جدول ۳- مقادیر  $K_m$  تحت سه سناریوی انتشار و سه سطح احتمال در دو دوره آبی در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

نام ایستگاه						سطح احتمال	سناریو	دوره
گرگان	قائم‌شهر	بابلسر	رامسر	رشت	انزلی			
۱۷/۶	۱۷/۱	۱۶/۶	۱۶/۲	۱۶/۱	۱۵/۷	---	---	گذشته
۱۷/۴	۱۷/۳	۱۶/۶	۱۶/۴	۱۶/۳	۱۵/۷	۰/۵۰	SSP2-4.5	آبی اول
۱۶/۸	۱۶/۸	۱۶/۰	۱۵/۶	۱۵/۷	۱۵/۱	۰/۷۵		
۱۵/۸	۱۶/۱	۱۴/۹	۱۴/۹	۱۵/۲	۱۴/۹	۰/۹۰		
۱۷/۴	۱۷/۴	۱۶/۶	۱۶/۴	۱۶/۴	۱۵/۷	۰/۵۰	SSP3-7.0	
۱۶/۸	۱۶/۹	۱۶/۱	۱۵/۷	۱۵/۸	۱۵/۲	۰/۷۵		
۱۵/۹	۱۶/۲	۱۵/۵	۱۵/۰	۱۵/۱	۱۵/۰	۰/۹۰		
۱۷/۳	۱۷/۳	۱۶/۵	۱۵/۰	۱۶/۱	۱۵/۴	۰/۵۰	SSP5-8.5	
۱۶/۷	۱۶/۶	۱۵/۸	۱۵/۴	۱۵/۵	۱۵/۰	۰/۷۵		
۱۶/۰	۱۶/۰	۱۵/۰	۱۴/۹	۱۵/۰	۱۴/۵	۰/۹۰		
۱۷/۴	۱۷/۳	۱۶/۶	۱۶/۲	۱۶/۲	۱۵/۵	۰/۵۰	SSP2-4.5	آبی دوم
۱۷/۰	۱۶/۹	۱۶/۱	۱۵/۵	۱۵/۵	۱۵/۰	۰/۷۵		
۱۶/۴	۱۶/۴	۱۵/۶	۱۴/۹	۱۵/۰	۱۴/۵	۰/۹۰		
۱۷/۴	۱۷/۳	۱۶/۴	۱۶/۱	۱۶/۱	۱۵/۳	۰/۵۰	SSP3-7.0	
۱۶/۸	۱۶/۸	۱۵/۹	۱۵/۶	۱۵/۶	۱۵/۰	۰/۷۵		
۱۶/۶	۱۶/۱	۱۵/۱	۱۴/۹	۱۵/۰	۱۴/۵	۰/۹۰		
۱۷/۳	۱۷/۳	۱۶/۵	۱۶/۲	۱۶/۲	۱۵/۴	۰/۵۰	SSP5-8.5	
۱۶/۶	۱۶/۶	۱۵/۸	۱۵/۳	۱۵/۵	۱۴/۹	۰/۷۵		
۱۵/۹	۱۵/۹	۱۵/۰	۱۴/۵	۱۴/۹	۱۴/۵	۰/۹۰		

مطابق جدول (۳) با افزایش سطح احتمال مقدار  $K_m$  کاهش می‌یابد. دلیل آن هم به نمودار تعیین  $K_m$  برمی‌گردد هرچه میانگین حداثر بارش سالانه یک ایستگاه، بالاتر باشد مقدار  $K_m$  کاهش می‌یابد. بنابراین با افزایش سطح احتمال مقدار  $\Delta P$  این سطح احتمال افزایش و در نتیجه سناریوهای بارش تولیدی از مقدار بارش بالاتری برخوردار هستند. با تغییر سناریو از SSP2-4.5 به SSP5-8.5 به ویژه در دوره آبی اول مقدار  $K_m$  نیز کاهش می‌یابد. در مقایسه با دوره گذشته مقدار  $K_m$  در سطح احتمال ۰/۵ تفاوت چندانی با دوره گذشته ندارد اما با افزایش سطح احتمال مقدار  $K_m$  کاهش می‌یابد.

جدول ۴- مقادیر  $\bar{X}_{nadj}$  تحت سه سناریوی انتشار و سه سطح احتمال در دو دوره آتی (میلیمتر) در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

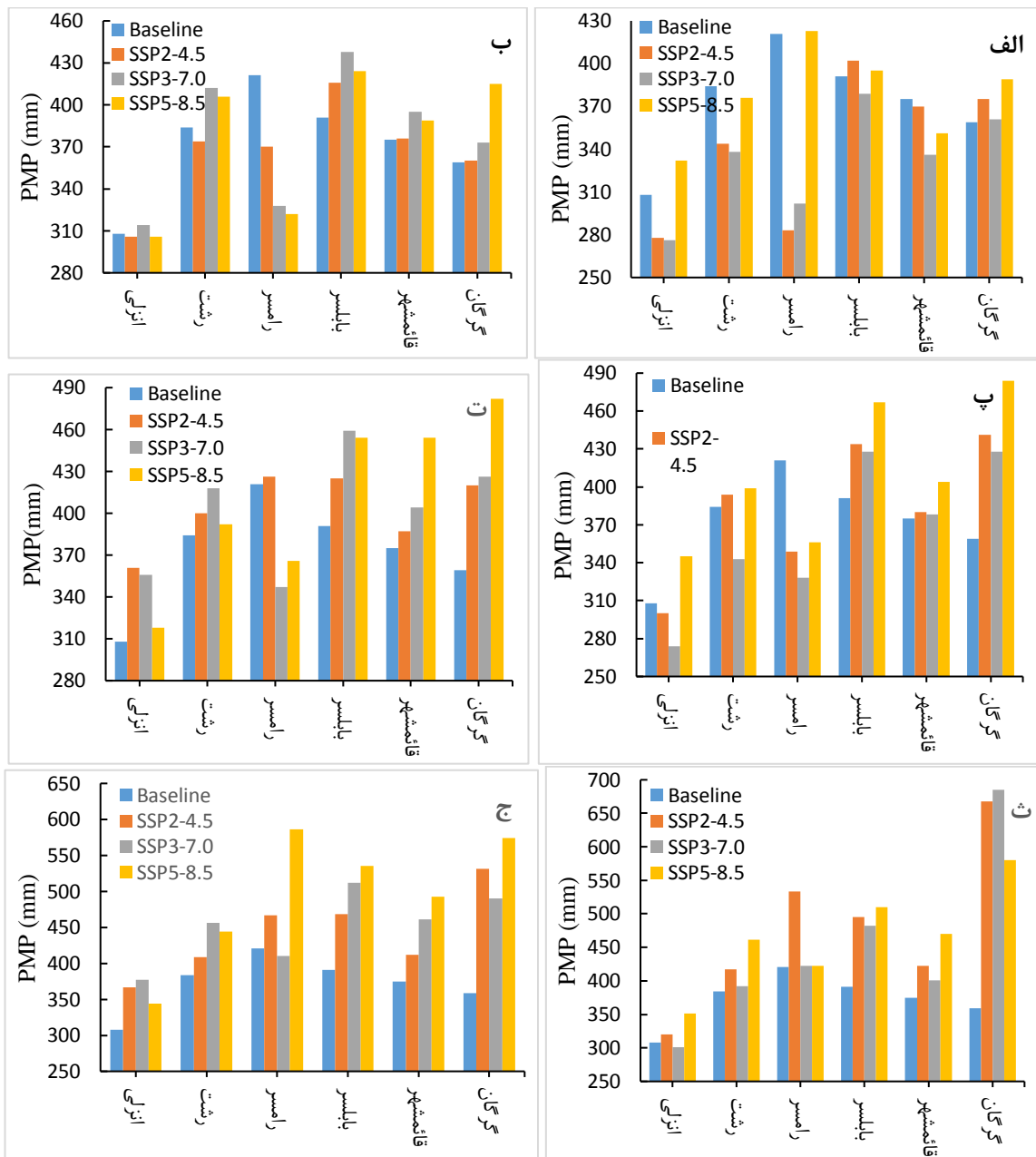
دوره	سناریو	سطح احتمال	نام ایستگاه					
			انزلی	رشت	رامسر	بابلسر	قائم‌شهر	گرگان
گذشته	...	...	۸۷/۱	۷۹/۰	۷۸/۴	۶۹/۹	۵۸/۷	۴۸/۰
آتی اول	SSP2-4.5	۰/۵۰	۸۹/۱	۷۵/۴	۷۴/۳	۶۹/۳	۵۳/۸	۵۳/۶
		۰/۷۵	۱۰۰/۶	۸۸/۷	۹۰/۲	۸۱/۶	۶۴/۷	۶۵/۱
		۰/۹۰	۱۱۱/۵	۹۸/۶	۱۱۱/۳	۱۰۶/۴	۷۹/۵	۸۲/۳
آتی اول	SSP3-7.0	۰/۵۰	۸۷/۸	۷۳/۲	۷۵/۰	۶۸/۵	۵۳/۷	۵۲/۰
		۰/۷۵	۹۸/۳	۸۵/۶	۸۷/۶	۸۰/۳	۶۳/۸	۶۳/۸
		۰/۹۰	۱۰۹/۲	۹۶/۳	۱۰۱/۱	۱۰۴/۹	۷۸/۳	۸۱/۱
آتی اول	SSP5-8.5	۰/۵۰	۹۴/۷	۷۹/۸	۱۰۱/۱	۷۰/۹	۵۵/۹	۵۵/۰
		۰/۷۵	۱۰۶/۲	۹۱/۵	۹۴/۳	۸۶/۶	۶۸/۵	۶۶/۴
		۰/۹۰	۱۱۷/۹	۱۰۵/۴	۱۰۸/۷	۱۰۳/۶	۸۲/۰	۷۹/۰
آتی اول	SSP2-4.5	۰/۵۰	۹۳/۲	۷۷/۹	۷۶/۷	۷۰/۰	۵۴/۴	۵۲/۶
		۰/۷۵	۱۰۶/۷	۹۱/۲	۹۱/۹	۷۹/۱	۶۲/۹	۶۲/۷
		۰/۹۰	۱۱۷/۰	۱۰۳/۴	۱۰۸/۴	۹۰/۰	۷۳/۱	۷۳/۲
آتی دوم	SSP3-7.0	۰/۵۰	۹۵/۸	۷۸/۸	۷۸/۷	۷۲/۹	۵۵/۴	۵۳/۹
		۰/۷۵	۱۰۶/۹	۹۰/۴	۹۱/۰	۸۴/۰	۶۵/۴	۶۵/۶
		۰/۹۰	۱۱۹/۴	۱۰۳/۰	۱۰۷/۱	۹۹/۷	۷۹/۶	۷۸/۸
آتی دوم	SSP5-8.5	۰/۵۰	۹۴/۰	۷۸/۳	۷۷/۴	۷۱/۸	۵۴/۶	۵۵/۵
		۰/۷۵	۱۰۷/۶	۹۰/۸	۹۷/۳	۸۵/۹	۶۷/۹	۶۷/۹
		۰/۹۰	۱۲۵/۳	۱۱۰/۵	۱۱۸/۸	۱۰۴/۲	۸۲/۹	۸۲/۵

نتایج جدول (۴) مشخص می‌کند که با افزایش سطح احتمال، مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  افزایش می‌یابد و در هر دو دوره آتی در سطح احتمال ۰/۵ مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  تقریباً مشابه دوره گذشته می‌باشد و تفاوت چند میلی‌متری بین دوره‌های آتی و دوره گذشته مشاهده می‌شود؛ که تأثیر چندانی در مقدار PMP ندارد. ولی با افزایش سطح احتمال مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  نسبت به دوره گذشته افزایش می‌یابد. تغییرات در دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP3-7.0 تقریباً مشابه می‌باشد؛ اما در سناریوی SSP5-8.5 افزایش  $\bar{X}_{nadj}$  در دو سطح احتمال ۰/۷۵ و ۰/۹۰ نسبت به دوره گذشته بیشتر می‌باشد. به طور کلی نسبت افزایش  $\bar{X}_{nadj}$  در سناریوهای مختلف، برای ایستگاه‌های مختلف، یکسان نمی‌باشد. در بعضی از ایستگاه‌ها بین دو دوره تفاوت آشکاری مشاهده می‌شود. ولی در برخی از ایستگاه‌ها این تفاوت چشم‌گیر نمی‌باشد. دلایل این امر را می‌توان تغییرات متفاوت  $\Delta P$  در ایستگاه‌های مختلف و همچنین نحوه ریزمقیاس‌نمایی مدل LARS-WG دانست. همان‌گونه که ذکر گردید؛ این مدل یک توزیع نیمه‌تجربی بر داده‌ها برآزش می‌دهد که خروجی این توزیع برای ایستگاه‌های مختلف، متفاوت است. بنابراین روش ریزمقیاس‌نمایی یکی از منابع عدم قطعیت در تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر مقدار PMP می‌باشد.

جدول ۵- مقادیر  $S_{nadj}$  تحت سه سناریوی انتشار و سه سطح احتمال در دو دوره آتی (میلی متر) در ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

دوره	سناریو	سطح احتمال	نام ایستگاه					
			انزلی	رشت	رامسر	بابلسر	قائم‌شهر	گرگان
گذشته	...	...	۱۱/۸	۱۶/۱	۱۸/۱	۱۶/۶	۱۵/۹	۱۵/۳
			۱۰/۰	۱۴/۰	۱۰/۸	۱۷/۲	۱۵/۷	۱۶/۰
			۱۰/۹	۱۶/۶	۱۴/۰	۱۸/۹	۱۶/۱	۱۹/۳
آتی اول	SSP2-4.5	۰/۹۰	۱۱/۴	۱۷/۸	۲۴/۰	۳۳/۵	۱۸/۲	۳۲/۱
			۹/۹	۱۳/۷	۱۱/۷	۱۶/۰	۱۴/۰	۱۵/۳
			۹/۴	۱۳/۷	۱۲/۹	۱۸/۸	۱۶/۰	۱۸/۷
آتی دوم	SSP3-7.0	۰/۹۰	۱۰/۴	۱۶/۵	۱۸/۲	۲۰/۷	۱۷/۰	۳۳/۰
			۱۲/۹	۱۵/۷	۱۸/۲	۱۶/۸	۱۴/۷	۱۶/۶
			۱۳/۲	۱۶/۸	۱۴/۳	۲۰/۷	۱۷/۳	۲۱/۶
آتی دوم	SSP5-8.5	۰/۹۰	۱۳/۳	۲۰/۱	۱۷/۶	۲۳/۲	۲۰/۹	۲۷/۰
			۱۱/۵	۱۵/۶	۱۵/۴	۱۷/۹	۱۶/۰	۱۵/۲
			۱۴/۲	۱۶/۹	۱۸/۴	۱۸/۴	۱۶/۵	۱۸/۲
آتی دوم	SSP2-4.5	۰/۹۰	۱۴/۳	۱۷/۲	۲۰/۳	۲۰/۸	۱۷/۷	۲۴/۲
			۱۱/۹	۱۷/۷	۱۳/۱	۱۹/۱	۱۷/۰	۱۵/۸
			۱۳/۹	۱۷/۹	۱۳/۸	۲۰/۳	۱۷/۴	۱۸/۵
آتی دوم	SSP3-7.0	۰/۹۰	۱۴/۷	۲۰/۰	۱۷/۰	۲۳/۴	۲۰/۴	۲۲/۰
			۱۱/۴	۱۷/۳	۱۳/۳	۱۸/۴	۱۶/۷	۱۸/۰
			۱۱/۶	۱۶/۴	۱۴/۸	۲۰/۰	۲۰/۰	۲۱/۵
آتی دوم	SSP5-8.5	۰/۹۰	۱۲/۳	۱۸/۸	۲۷/۴	۲۴/۶	۲۲/۱	۲۶/۷
			۱۱/۴	۱۷/۳	۱۳/۳	۱۸/۴	۱۶/۷	۱۸/۰

با دقت در جدول (۵) مشخص می‌شود که در همه سناریوها با افزایش سطح احتمال، مقدار  $S_{nadj}$  افزایش می‌یابد. در مقایسه با دوره گذشته، تغییرات  $S_{nadj}$  بین سناریوهای انتشار از روند مشخصی تبعیت نمی‌کند و بسته به ایستگاه، روند تغییرات متفاوت است. به طور کلی می‌توان گفت مقدار  $S_{nadj}$  در دوره آتی اول در اکثر ایستگاه‌ها در سناریوی SSP5-8.5 در مقایسه با بقیه سناریوها ارقام بالاتری دارد و نتایج دو سناریوی دیگر شباهت بیشتری به هم دارند. با توجه به ضریب تأثیر بالای انحراف معیار اصلاح شده در محاسبه PMP ( $K_m$  و  $S_{nadj}$  به عنوان ضریب برای یکدیگر عمل می‌کنند)، نامنظمی مقادیر  $S_{nadj}$  در بین سناریوهای انتشار و همچنین در دو دوره آتی منجر به محاسبه PMPهایی می‌گردد که تغییرات آن در بین سناریوهای مختلف از روند مشخصی پیروی نمی‌کند. این موضوع می‌تواند در ایستگاه‌های مختلف، متفاوت باشد.



شکل ۴- مقادیر PMP در دوره گذشته و سناریوهای انتشار مختلف الف: دوره آبی اول و سطح احتمال ۰/۵؛ ب: دوره آبی دوم و سطح احتمال ۰/۵؛ ج: دوره آبی اول و سطح احتمال ۰/۷۵؛ ت: دوره آبی دوم و سطح احتمال ۰/۷۵؛ ث: دوره آبی اول و سطح احتمال ۰/۹؛ ج: دوره آبی دوم و سطح احتمال ۰/۹

نتایج شکل (۴) نشان می‌دهد که در دوره آبی اول و سطح احتمال ۰/۵۰، مقدار PMP در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به دو سناریوی دیگر در همه ایستگاه‌ها به جزء ایستگاه قائمشهر بالاتر می‌باشد و در ایستگاه گرگان، بابلسر، رامسر، رشت و انزلی تفاوت چندانی بین نتایج دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP3-7.0 وجود ندارد. به‌طور کلی می‌توان گفت مقدار PMP در سطح احتمال ۰/۵۰ تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP3-7.0 نسبت به دوره گذشته کاهش می‌یابد؛ ولی مقادیر سناریوی SSP5-8.5 مشابه دوره گذشته می‌باشد. مشابه روش وزنی مقدار کاهش PMP در ایستگاه رامسر نسبت به بقیه ایستگاه‌ها بیشتر است. اما در سناریوی SSP5-8.5 مقدار PMP در این ایستگاه مشابه دوره گذشته می‌باشد؛ زیرا در این سناریو در مقایسه با دو سناریوی دیگر علاوه بر افزایش شدید مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  مقدار  $S_{nadj}$  نیز افزایش چشمگیری داشته است. برای تحلیل نتایج PMP در سطوح احتمال دیگر، بایستی

به تغییرات  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  و  $K_m$  در سطوح مختلف احتمال توجه شود. همان گونه که در شرح جدول (۳) بیان شد، مقدار  $K_m$  با افزایش سطح احتمال، کاهش می‌یابد لذا از لحاظ تأثیرگذاری  $K_m$  بایستی با افزایش سطح احتمال، مقدار PMP کاهش یابد ولی شکل (۴) عکس این مطلب را نشان می‌دهد. دلیل این امر تغییرات  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  در سطوح مختلف احتمال می‌باشد. چرا که با افزایش سطح احتمال مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  به صورت چشم‌گیری افزایش می‌یابد (جدول ۴) و از طرف دیگر افزایش سطح احتمال به طور کلی افزایش  $S_{nadj}$  را در پی دارد (جدول ۵).

مقدار  $K_m$  در دوره آتی دوم بسیار مشابه دوره آتی اول است لذا تفاوت نتایج PMP در این دو دوره، حاصل مقادیر  $K_m$  نمی‌باشد بلکه بیشتر تحت تأثیر تغییرات  $\bar{X}_{nadj}$  و به ویژه تغییرات  $S_{nadj}$  می‌باشد. به طور کلی در دوره آتی دوم در مقایسه با دوره آتی اول مقدار PMP در هر سه سطح احتمال افزایش می‌یابد و با نزدیک شدن به انتهای قرن حاضر احتمال رخ دادن بارش‌های شدیدتر افزایش می‌یابد.

به طور خلاصه می‌توان گفت که مقدار PMP با افزایش سطح احتمال افزایش می‌یابد به طوری که در سطح احتمال ۰/۵۰ اکثر ایستگاه‌ها در مقایسه با دوره گذشته با کاهش PMP مواجه می‌گردند. اما با افزایش سطح احتمال، مقدار PMP افزایش می‌یابد و در سطح احتمال ۰/۷۵ در سناریوی SSP5-8.5 به جزء ایستگاه رامسر بقیه ایستگاه‌ها مقدار PMP را در مقایسه با دوره گذشته بالاتر برآورد می‌کنند و در دو سناریوی دیگر اکثر ایستگاه‌ها با افزایش PMP را نشان می‌دهند و یا تغییر خاصی را در مقدار PMP نمایش نداده‌اند به جزء ایستگاه رامسر که در هر سه سناریو، مقدار PMP را کمتر از دوره گذشته محاسبه کرده است. تنها دو ایستگاه رشت و انزلی تحت سناریوی SSP3-7.0 مقدار PMP را کمتر از دوره گذشته برآورد کرده‌اند. در سطح احتمال ۰/۹۰ همه ایستگاه‌ها در هر سه سناریو مقدار PMP را مساوی یا بیشتر از دو دوره گذشته برآورد کرده‌اند. با استفاده از این نتایج بایستی به اهمیت سازه مورد طراحی توجه نمود در صورتی که سازه از اهمیت بالایی برخوردار باشد بهتر است از نتایج سطح احتمال ۰/۹۰ که ریسک کمتری دارد استفاده نمود، از آنجائی که سازه‌هایی که بر اساس PMP طراحی می‌شوند سازه‌هایی با اهمیت بالا هستند لذا پیشنهاد می‌شود نتایج سطح احتمال ۰/۹۰ (ریسک ۰/۱) مورد توجه بیشتری قرار گیرد. از این رو، تغییرات PMP در دو دوره آتی نسبت به دوره گذشته در سطح احتمال ۰/۹۰ مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۶).

مطابق جدول (۶) می‌توان عنوان نمود که در سناریوهای سطح احتمال ۰/۹۰ روند مشخصی بین نتایج سناریوهای انتشار وجود ندارد و بسته به ایستگاه مورد بررسی، حداکثر افزایش PMP نسبت به دوره گذشته، در یکی از سناریوهای انتشار رخ می‌دهد؛ با این وجود حداکثر PMP در همه ایستگاه‌ها در سناریوهای دوره دوم آتی رخ می‌دهد. به‌عنوان مثال حداکثر افزایش PMP در ایستگاه انزلی در دوره دوم آتی و تحت سناریوی SSP2-4.5 (۱۹/۲ درصد)، در ایستگاه قائمشهر در دوره دوم و سناریوی SSP3-7.0 (۱۱/۹ درصد) و در ایستگاه رامسر در دوره دوم و سناریوی SSP5-8.5 (۴۲/۹ درصد) رخ می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌شود در طراحی سازه‌های مهم از سناریوی انتشار بحرانی (سناریویی که بیشترین افزایش PMP را پیش بینی می‌کند) استفاده شود.

جدول ۶- درصد تغییرات PMP در ایستگاه‌های مختلف در سطح احتمال ۰/۹۰

ایستگاه	دوره آتی اول			دوره آتی دوم		
	4.5-SSP2	SSP3-7.0	SSP5-8.5	4.5-SSP2	SSP3-7.0	SSP5-8.5
انزلی	-۸/۴	-۰/۴	۵/۳	۱۹/۲	۲/۷	-۸/۸
رشت	-۹/۶	-۵/۲	۹/۱	۶/۵	۱۱/۵	-۲/۶
رامسر	-۲۹/۹	-۱/۰	۲/۷	۱۰/۹	-۱۲/۲	۴۲/۹
بابلسر	-۳/۶	۰/۰	۵/۸	۱۹/۷	۹/۴	۴/۵
قائم‌شهر	-۰/۸	-۹/۱	۵/۰	۹/۹	۱۱/۹	۶/۹
گرگان	۱۰/۶	۵/۳	-۷/۹	۴۷/۹	-۷/۷	۱۷/۱

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تولید سناریوهای تغییر اقلیم، از ۱۸ مدل AOGCM تحت سه سناریوی SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 استفاده شد. با محاسبه مقدار PMP با استفاده از سناریوهای روش وزنی مشخص شد که در دوره آتی اول مقدار PMP در همه ایستگاه‌ها به جزء ایستگاه گرگان کاهش می‌یابد. در این بین مقدار کاهش PMP در ایستگاه رامسر خیلی بیشتر می‌باشد همچنین نتایج نشان داد که مقدار  $K_m$  نقش چندانی در تغییرات PMP در دوره‌های آتی نسبت به دوره گذشته ایفا نمی‌کند، لذا تغییرات PMP در دوره‌های آتی تحت تأثیر  $S_{nadj}$  می‌باشد. به عبارت دیگر پیش‌بینی می‌شود؛ سری زمانی حداکثر بارش سالانه در دوره‌های آتی یکنواخت‌تر گردد. این مطلب در مورد ایستگاه گرگان متفاوت است و مقدار  $S_{nadj}$  افزایش یافته است. نتایج روش احتمالاتی مشخص نمود که با افزایش سطح احتمال از ۰/۵۰ به ۰/۹۰ مقدار  $\bar{X}_{nadj}$  و  $S_{nadj}$  افزایش و مقدار  $K_m$  کاهش می‌یابد. برهم کنش این سه پارامتر منجر به شکل‌گیری نتایج متفاوت PMP در سناریوها و سطح احتمال‌های مختلف گردید. روند مشخصی بین نتایج سناریوهای انتشار مشاهده نگردید و بسته به ایستگاه مورد بررسی، نتایج متفاوت می‌باشد. با این وجود به طور کلی می‌توان گفت که در دوره آتی دوم مقدار PMP در اکثر ایستگاه‌ها تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌ویژه در سطح احتمال ۰/۹۰ افزایش می‌یابد که درصد این تغییرات در سناریوهای انتشار مختلف، متفاوت است. در استفاده از نتایج این تحقیق، بایستی به اهمیت سازه مورد طراحی توجه نمود در صورتی که سازه از اهمیت بالایی برخوردار باشد؛ بهتر است از نتایج سطح احتمال ۰/۹۰ و سناریوی انتشاری استفاده نمود که بیشترین افزایش PMP را پیش‌بینی می‌نماید.

### منابع

- افضلی گروه، ز.، فرید حسینی، ع.، و بختیاری، ب. ۱۳۹۸. بررسی اثر تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل ۲۴ ساعته در یک اقلیم نیمه‌مرطوب. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۲)، ۱۷۶-۱۸۸.
- جورابلو، س.، اژدری، خ.، گنجی، ز.، دل‌قندی، م. ۱۳۹۷. تأثیر تغییر اقلیم بر تبخیر و تعرق گیاه مرجع و کمبود بارندگی در منطقه سمنان. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۱(۴)، ۶۱-۷۵.
- حمزه، س.، باقرپور طول‌للات، ز.، دل‌قندی، م.، کاردان مقدم، ح. ۱۳۹۷. ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر تراز آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان گتوند-عقیلی). *اکوهیدرولوژی*، ۵(۱)، ۱۱۱-۱۲۲.
- دل‌قندی، م.، مساح بوانی، ع.ر.، آجرلو، م.ج.، برومند نسب، س.، اندرزبان، ب. ۱۳۹۳. ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر عملکرد و فنولوژی رشد گندم (مطالعه موردی: شهرستان اهواز). *مدیریت آب و آبیاری*، ۴(۲)، ۱۶۱-۱۷۵.

دلغندی، م.، موذن زاده، ر. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات مکانی- زمانی بارش و دمای ایران تحت شرایط تغییر اقلیم با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌های AOGCM و سناریوهای انتشار، *کوهیدرولوژی*، ۳ (۳)، ۳۳۱-۳۲۱.

منجری، س.، گندمکار، ا.، زارعی، ح.، و عباسی، ع. ۱۴۰۰. تخمین میزان حداکثر بارش‌های محتمل تحت شرایط تغییر اقلیم در حوضه آبریز پارسیان. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵ (۴)، ۳۱-۴۸.

## References

- Afzali-Gorouh, Z., Faridhosseini, A., Bakhtiari, B. 2019. Investigation of Climate Change Impact on 24-h Probable Maximum Precipitation in a Sub-humid Climate, *Iran-Water Resources Research*, 15(2), pp. 176-188 (in Persian).
- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., Chung, E. S. 2019. Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), pp. 4803-4824.
- Ben Alaya, M. A., Zwiers, F. W., Zhang, X. 2020. Probable maximum precipitation in a warming climate over North America in CanRCM4 and CRCM5. *Climatic Change*, 158(3), pp. 611-629.
- Bhatt, J., Venkata Srinivas, V. 2023. Comparison of different variants of storm maximization method for Probable Maximum Precipitation estimation in changing climate. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU-453).
- Delghandi, M., Massah-Bovani, A., Ajorlou, M. J., Broomandnasab, S., Andarzian, B. 2014. Risk assessment of climate change impacts on production and phenology of wheat (case study: Ahvaz Region). *Water and Irrigation Management*, 4(2), pp. 161-175 (in Persian).
- Delghandi, M., Moazenzadeh, R. 2016. Investigating spatiotemporal variations of precipitation and temperature over Iran under climate change condition considering AOGCM models and emission scenarios uncertainty. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 3(3), pp. 321-331 (in Persian).
- Gao, C., He, Z., Pan, S., Xuan, W., Xu, Y. P. 2020. Effects of climate change on peak runoff and flood levels in Qu River Basin, East China. *Journal of Hydro-Environment Research*, 28, pp. 34-47.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., Martinez, G. F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), pp. 80-91.
- Hamzeh, S., Bagherpour, Z., Delghandi, M., Kardan Moghaddam, H. 2018. Risk assessment of climate change impacts on groundwater level (Case study: Gotvand Aghili aquifer). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(1), pp. 111-122 (in Persian).
- Hershfield, D. M. 1961a. Rainfall Frequency Atlas of the United States. Technical Paper No. 40, Weather Bureau, United States Department of Commerce, Washington, DC.
- Hershfield, D. M. 1961b. Estimating the probable maximum precipitation. *Journal of Hydraulics Division: Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 87, pp. 99-106.
- Hershfield, D. M. 1965. Method for Estimating Probable Maximum Precipitation, *Journal of the American Water works Association*, 57, pp. 965-972.
- Imani, T., Delghandi, M., Emamgholizadeh, S., Ganji-Noroozi, Z. 2023. Evaluating uncertainty in climate change impacts on peak discharge and flood volume in the Qaran Talar watershed, Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 14(4), pp. 1300-1313.
- IPCC 2007. Summary for Policymakers. P1-18, In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Johnson, K. A., Smithers, J. C. 2020. Updating the estimation of 1-day probable maximum precipitation in South Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 32, 100736.
- Joorabloo, S., Azhdary, K., Ganji, Z., Delghandi, M. 2018. Climate change impact on reference evapotranspiration and precipitation deficit in Semnan region. *Irrigation Sciences and Engineering*, 41(4), pp. 61-75 (in Persian).
- Lee, K., Singh, V. P. 2020. Analysis of uncertainty and non-stationarity in probable maximum precipitation in Brazos River basin. *Journal of Hydrology*, 590, 125526.
- Micovic, Z., Schaefer, M. G., Taylor, G. H. 2015. Uncertainty analysis for probable maximum precipitation estimates. *Journal of Hydrology*, 521, pp. 360-373.
- Miller, J. F. 1964. Two- to Ten-Day Precipitation for Return Periods of 2 to 100 Years in the Contiguous United States. Technical Paper No. 49, Weather Bureau, United States Department of Commerce, Washington, DC.

- 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), pp. 31-48. doi: 10.22055/jise.2019.29703.1848 (in Persian).
- Sammen, S. S., Mohammed, T. A., Ghazali, A. H., Sidek, L. M., Shahid, S., Abba, S. I., Al-Ansari, N. 2022. Assessment of climate change impact on probable maximum floods in a tropical catchment. *Theoretical and Applied Climatology*, 148(1), pp. 15-31.
- Sarkar, S., Maity, R. 2020. Increase in probable maximum precipitation in a changing climate over India. *Journal of Hydrology*, 585, 124806.
- Semenov, M. A., Stratonovitch, P. 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research*, 41, pp. 1-14.
- Seo, M., Kim, S., Kim, H., Kim, H., Shin, J. Y., Heo, J. H. 2023. Evaluation of Statistical PMP Considering RCP Climate Change Scenarios in Republic of Korea. *Water*, 15(9), 1756.
- Singh, A., Singh, V.P. and Byrd, A.R., 2018. Computation of probable maximum precipitation and its uncertainty. *Int. J. Hydrol*, 2(4), pp.504-514.
- Thuy, L., 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, 10059.
- 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.
- Wilby, 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, W02419.
- WMO 2009. Manual for depth-area-duration analysis of storm precipitation. Third Edition Publication 1045. *World Meteorological Organization*, Geneva.
- Zhai, R., Tao, F. 2017. Contributions of climate change and human activities to runoff change in seven typical catchments across China. *Science of The Total Environment*, 605–606, pp. 219–229.
- Zhang, Q., Liu, J., Singh, V. P., Shi, P., Sun, P. 2017. Hydrological responses to climatic changes in the Yellow River basin, China: Climatic elasticity and streamflow prediction. *Journal of Hydrology*, 554, pp. 635–645.