

حداکثر بارش محتمل در دوره پایه و آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران

ابراهیم فتاحی^۱، حدیث صادقی^{۲*}

۱- استاد، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

۲- کارشناس پژوهشی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران.

چکیده

تغییر اقلیم با تشدید نوسانات چرخه هیدرولوژیکی، ایمنی سازه‌های آبی را با چالش‌های جدی مواجه می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های حداکثر بارش ۲۴ ساعته ۹۷ ایستگاه سینوپتیک، مقادیر حداکثر بارش محتمل (PMP) ایران در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 برآورد شد. پس از ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 با نمودار تیلور، داده‌های بارش روزانه با مدل LARS-WG ریزمقیاس‌سازی و مقادیر PMP با روش اصلاح‌شده هرشفیلد-دسا محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مقدار PMP در دوره پایه ناهمگنی مکانی قابل‌توجهی داشته و از کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در مناطق خشک مرکزی تا بیش از ۶۳۰ میلی‌متر در سواحل جنوبی دریای خزر متغیر است. بیشترین مقادیر PMP در نواحی مرطوب شمال، شمال‌غرب و دامنه‌های غربی زاگرس مشاهده شد. بررسی میزان PMP در دوره آینده نشان داد که در اغلب مناطق کشور، PMP نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و سناریوی SSP4.5 بیشترین افزایش را نشان می‌دهد؛ به‌طوری‌که در برخی ایستگاه‌های شمالی حاشیه خزر افزایش PMP به بیش از ۱۹۰ میلی‌متر رسید. همچنین تحت سناریوی SSP2.6، مقدار PMP در برخی ایستگاه‌های ساحلی جنوب و جنوب‌شرق کشور بین ۷۰ تا ۲۳۳ میلی‌متر افزایش یافت. در مقابل، تحت سناریوی SSP8.5، در بخش‌هایی از شمال، شمال‌غرب و غرب کشور کاهش ۲۰ تا ۱۷۰ میلی‌متری PMP نسبت به SSP4.5 مشاهده شد. نتایج نشان داد که پاسخ PMP به تغییر اقلیم در ایران وابسته به نوع اقلیم و شرایط توپوگرافی بوده و مناطق مرطوب و نیمه‌مرطوب حساسیت بیشتری به گرمایش جهانی دارند. همچنین اگرچه مقادیر PMP در مناطق خشک کمتر است، اما به دلیل نفوذپذیری پایین خاک، پوشش گیاهی ضعیف و محدودیت شبکه زهکشی، خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی همچنان قابل‌توجه است. از این رو بازنگری در طراحی سازه‌های هیدرولوژیکی، مدیریت رواناب و برنامه‌ریزی منابع آب با رویکرد سازگار با شرایط اقلیمی آینده ضروری است.

کلید واژه‌ها: حداکثر بارش محتمل (PMP)، حداکثر سیل محتمل (PMF)، دسا، ایران، هرشفیلد.

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی موجب افزایش چشمگیر رخدادهای حدی جوی در جهان شده است (Wan Ariffinet al, 2025). بارش، به‌عنوان اصلی‌ترین منبع آب شیرین، نقش حیاتی در تأمین منابع آب دارد؛ با این حال، بارش‌های نامتقارن یا شدید می‌تواند مخاطرات قابل توجهی برای مدیریت منابع آب و بهره‌برداری از زیرساخت‌های حیاتی مانند سدها ایجاد کند (Agnihotri et al, 2025). مطالعات علمی نشان می‌دهند که گرمایش جهانی الگوهای بارش را تغییر می‌دهد (Su et al., 2018; Ahmad et al., 2018; Agnihotri et al., 2025). افزایش دمای جو، مطابق رابطه کلاوزیوس-کلاپیرون، ظرفیت نگهداری رطوبت را تا ۷٪ افزایش می‌دهد که می‌تواند موجب افزایش شدت بارش‌ها، دو برابر شدن میزان بارش ساعتی و تغییر چرخه هیدرولوژی شود (Giorgi et al, 2019; Li et al, 2019; Hiraga et al, 2025). اثرات تغییر اقلیم بر بارش در مناطق مختلف جهان متفاوت است؛ به‌گونه‌ای که ممکن است در عرض‌های جغرافیایی بالا افزایش و در نواحی نیمه گرمسیری کاهش بارش رخ دهد (Agnihotri et al., 2025). بنابراین، مطالعات منطقه‌ای برای درک اثرات محلی تغییر اقلیم اهمیت ویژه‌ای دارند. کشور ایران از لحاظ موقعیت جغرافیایی بر روی کمربند خشکی‌های جهان قرار گرفته و جز مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌آید (Ziaee et al., 2021). در همین راستا پژوهش Fattahi et al. (2025). نشان داد که در سه دهه اخیر (۱۹۹۰-۲۰۲۰) بارش‌های حدی در نواحی غربی، شمال‌غربی و سواحل دریای خزر روند افزایشی و در نواحی شرقی، جنوب شرقی و مرکزی روند کاهشی داشته است. وقوع بارش‌های شدید در یک بازه زمانی کوتاه مدت، می‌تواند منجر به سیلاب‌های ویرانگر شود که انتظار می‌رود به دلیل تغییرپذیری اقلیمی در آینده افزایش یابد (Agnihotri et al, 2022; Visser1 et al, 2025). از این رو، مدیریت خطر سیلاب مستلزم در نظر گرفتن تأثیرات تغییر اقلیم بر زیرساخت‌های مهم مانند سدها و نیروگاه‌های هسته‌ای است، زیرا این سازه‌ها عمر طولانی دارند و در طول زمان تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرند (Hiraga et al, 2025). یکی از مولفه‌های کلیدی در مدیریت منابع آب و ارزیابی ریسک سرریز شدن سدها، حداکثر بارش محتمل (PMP) است

(Hiraga et al, 2025; Agnihotri et al, 2025). حداکثر بارش محتمل به‌عنوان بیشینه ارتفاع بارش تعریف می‌شود که در یک بازه زمانی مشخص و در یک منطقه جغرافیایی امکان وقوع دارد (Sarkar & Maity, 2020). حداکثر بارش محتمل مبنای اصلی برای برآورد حداکثر سیلاب محتمل بوده و معمولاً در طراحی سازه‌های هیدرولیکی بزرگ مانند سدها و سامانه‌های کنترل سیلاب استفاده می‌شود (Martin et al, 2024). روش‌های محاسبه PMP عمدتاً به دو دسته آماری و فیزیکی تقسیم می‌شوند، که روش آماری معرفی‌شده توسط هرشفیلد در سال ۱۹۶۱، بر اساس میانگین و انحراف معیار بیشینه بارش‌های سالانه و ضریب فراوانی محاسبه می‌شود و برای مناطقی با داده‌های بلندمدت بارش مناسب است (Sarkar and Maity, 2020; Agnihotri et al, 2025). روش هرشفیلد، ساده و کارآمد است و برای مناطقی که داده‌های بلندمدت بارش موجود است، اما داده‌های هواشناسی تکمیلی (دمای نقطه شبنم، سرعت باد، رطوبت نسبی و غیره) در دسترس نیست، مناسب می‌باشد، درحالی‌که روش فیزیکی نیازمند داده‌های کامل‌تر و تکنیک‌هایی مانند بیشینه‌سازی رطوبت و انتقال طوفان است (Martin et al, 2024; Sarkar and Maity, 2020). هر دو روش در سطح جهانی کاربرد دارند و مطالعات نشان می‌دهند که در مناطقی با داده‌های بلندمدت بارش، نتایج PMP حاصل از روش هرشفیلد با نتایج روش‌های فیزیکی تطابق بالایی دارند (Hiraga et al, 2025; Sarkar and Maity, 2020). با این حال، محدودیت‌هایی مانند کمبود داده و پیچیدگی توپوگرافی به ویژه در مناطق پرشیب، استفاده از مدل‌های عددی دینامیکی برای تخمین PMP را ضروری ساخته است (Hiraga et al, 2025). اگرچه PMP معمولاً به‌عنوان یک مقدار ایستا در نظر گرفته می‌شود، اما افزایش ظرفیت رطوبتی جو و شدت بارش‌های حدی ناشی از گرمایش جهانی، ماهیت ایستایی آن را مورد تردید قرار داده است (Visser et al, 2022; Sarkar and Maity, 2020). مطالعات متعددی نشان می‌دهند که اثر تغییر اقلیم بر PMP در جهان ناهمگون است؛ به‌عنوان مثال، Rastogi et al. (2017) در حوضه رودخانه آلاباما-کوسا-تالاپوسا افزایش ۲۰٪ در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۵) و ۴۴٪ در آینده دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه را گزارش کردند. نتایج پژوهش Chen et al. (2017) نشان داد که PMP در شمال غربی اقیانوس آرام تا سال ۲۰۹۹ تحت سناریوی

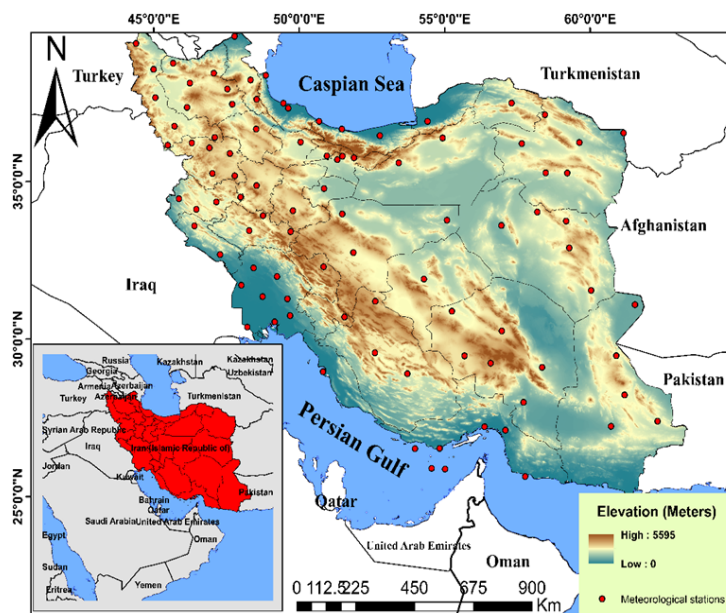
مکانی-زمانی PMP در سراسر ایران تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم را بررسی کند، انجام نشده است. بنابراین، هدف این پژوهش، ارزیابی تغییرات PMP در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) برای مدیریت ریسک سیلاب، ایمنی سدها و برنامه‌ریزی سازگار با تغییر اقلیم است.

داده و روش

منطقه مورد مطالعه

۱- ایران کشوری با ویژگی‌های جغرافیایی متنوع است که عمدتاً شامل اراضی کوهستانی و مرتفع می‌باشد. این کشور در بخش جنوب‌غربی قاره آسیا و بین ۲۵ تا ۴۵ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی قرار دارد. ناهمواری‌ها نقش قابل توجهی در شکل‌گیری نواحی مختلف اقلیمی ایران ایفا می‌کنند. میانگین بارندگی سالانه کشور حدود ۲۴۵ میلی‌متر است؛ در مناطق خشک و بیابانی میزان بارش به کمتر از ۵۰ میلی‌متر می‌رسد و گاه در برخی سال‌ها بارشی رخ نمی‌دهد، اما در نواحی مرطوبی مانند بندرانزلی میزان بارش سالانه بیش از ۱۵۰۰ میلی‌متر است. میانگین دمای سالانه ایران در حدود ۱۸ درجه سلسیوس است و به‌طور کلی از جنوب به شمال و از شرق به غرب از گرمای هوا کاسته می‌شود (شکل ۱).

RCP8.5 به‌طور متوسط ۳۰-۵۰٪ افزایش می‌یابد. همچنین Visser et al. (2022) نشان دادند که حداکثر بارش محتمل در استرالیا تحت SSP2.6 تا سال ۲۱۰۰ حدود ۱۳٪ افزایش می‌یابد. Beauchamp et al (2013) نیز در پژوهشی در کانادا نشان دادند که PMP برای مقادیر ۴۸ و ۷۲ ساعته تا افق سال‌های ۲۰۷۱-۲۱۰۰، بین ۰.۵٪ تا ۶٪ افزایش خواهد یافت. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، اثرات تغییر اقلیم بر حداکثر بارش محتمل (PMP) پیچیده و ناهمگون است، به‌گونه‌ای که برخی مناطق شاهد افزایش و برخی دیگر کاهش مقادیر PMP هستند. به عنوان مثال Afrooz et al (2015) در پژوهشی که در حوضه آبریز چنار-رهدار واقع در جنوب ایران انجام دادند، نشان دادند که حداکثر بارش محتمل در دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره پایه ۱۹۷۱-۲۰۰۰ به‌طور متوسط ۲۷/۳ درصد افزایش می‌یابد. همچنین براساس نتایج پژوهش Ramak et al (2017) حداکثر بارش محتمل در حوضه رودخانه کارون تحت سناریوی A1B تا ۵ درصد کاهش می‌یابد و تحت سناریوهای A2 و B1 به ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد افزایش می‌یابد. این در حالی است که نتایج پژوهش Afzali-Gorouh et al (2022) حاکی از آن بود که حداکثر بارش محتمل در حوضه قره سو واقع در جنوب شرقی دریای خزر در دوره آینده نزدیک (۲۰۱۹-۲۰۴۸) و آینده دور (۲۰۴۹-۲۰۷۸) حدود ۱۴-۳۸ درصد کاهش می‌یابد. با وجود مطالعات متعدد در ایران، تا کنون پژوهشی جامع که تغییرات



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک مورد بررسی

داده

در این پژوهش برای شبیه‌سازی حداکثر بارش محتمل در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت سه سناریوی SSP4.5, SSP2.6 و SSP8.5، از داده‌های روزانه بارش ۹۷ ایستگاه سینوپتیک کشور که دارای آمار بلند مدت ۳۰ ساله (۱۹۹۰-۲۰۲۰) بودند، استفاده شد. دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ به عنوان دوره مرجع اقلیمی انتخاب شد، زیرا دوره‌های ۳۰ ساله مطابق استاندارد سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، مبنای استاندارد تحلیل‌های اقلیمی و ارزیابی تغییرات بلندمدت هیدروکلیماتوزیک محسوب می‌شوند. همچنین دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۶۰ به عنوان نماینده تغییرات اقلیمی میان قرن انتخاب شد؛ زیرا این بازه زمانی در مطالعات تغییر اقلیم، دوره‌ای مناسب برای ارزیابی تغییر الگوهای بارش و پاسخ سامانه‌های هیدرولوژیکی به گرمایش جهانی محسوب می‌شوند. علاوه بر این پیش‌بینی‌های اقلیمی در دوره میان قرن نسبت به انتهای قرن دارای عدم قطعیت کمتری بوده و قابلیت اطمینان بیشتری برای تحلیل تغییرات بارش‌های حادی و PMP دارند.

ایستگاه‌های مورد استفاده در جدول ۱ و موقعیت آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، پراکنش فضایی ایستگاه‌ها پوشش مناسبی از شرایط اقلیمی متنوع ایران، شامل اقلیم‌های مرطوب خزری، نیمه‌مرطوب کوهستانی، نیمه‌خشک و خشک مرکزی و جنوبی را فراهم می‌کند. بیشترین تراکم ایستگاه‌ها در نواحی شمالی و غربی کشور مشاهده می‌شود، در حالی که در برخی مناطق خشک مرکزی و جنوب شرقی، به دلیل محدودیت ایستگاه‌های دارای آمار بلندمدت، تراکم ایستگاه‌ها کمتر است. با این حال، توزیع فضایی ایستگاه‌ها برای تحلیل مکانی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار است.

به منظور شبیه‌سازی داده‌های روزانه بارش در دوره آینده، داده‌های خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) از پروژه CMIP6 تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 استخراج شد. این مدل‌ها فرآیندهای اصلی دینامیک جو، انتقال بخار آب، تبادل انرژی و برهم‌کنش جو-اقیانوس را در مقیاس جهانی شبیه‌سازی می‌کنند. بنابراین، اثر منابع

اصلی رطوبتی منطقه شامل دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان به صورت غیرمستقیم در خروجی مدل‌ها لحاظ شده است.

مشخصات مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در پژوهش در جدول ۲، ارائه شده است. در گام نخست، دقت و عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازسازی بارش دوره پایه برای هریک از ایستگاه‌های مورد مطالعه ارزیابی و صحت‌سنجی شد تا مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی اقلیم آینده هر ایستگاه انتخاب شود. برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی در بازسازی بارش دوره پایه، از روش آماری و گرافیکی نمودار تیلور استفاده شد. این روش با ترکیب سه شاخص آماری اساسی، شامل ضریب همبستگی پیرسون (R)، انحراف معیار (SD) و ریشه میانگین مربعات خطای متمرکز (CRMSE)، امکان ارزیابی و مقایسه میان داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده را فراهم می‌کند. محاسبات با استفاده از پکیج‌های openair، dplyr و tidyr در محیط نرم‌افزار R انجام شد. در هر ایستگاه، مقادیر شاخص‌های مذکور برای تمامی مدل‌های اقلیمی محاسبه و مدل‌ها بر اساس فاصله از نقطه مشاهده‌ای در فضای نمودار تیلور رتبه‌بندی شدند. بنابراین مدلی که کمترین فاصله را با داده‌های مشاهداتی داشت، به عنوان مدل منتخب برای شبیه‌سازی بارش در هر ایستگاه تعیین گردید. علاوه بر این، نمودار تیلور برای بررسی میزان انطباق مدل‌های گردش عمومی جو با داده‌های مشاهداتی ترسیم شد. نتایج ارزیابی و مدل‌های منتخب برای هر ایستگاه در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱- ایستگاه‌های مورد استفاده در پژوهش

ایستگاه	اقلیم	ایستگاه	اقلیم	ایستگاه	اقلیم
آبادان	بسیار گرم خشک	تهران (شمیران)	معتدل نیمه خشک	شیراز	گرم نیمه خشک
آباده	سرد خشک	تهران مهرآباد	معتدل نیمه خشک	صفی‌آباد (دزفول)	بسیار گرم نیمه خشک
آبعلی	سرد نیمه‌خشک	جاسک	بسیار گرم خشک	طبس	بسیار گرم بسیار خشک
اراک	سرد نیمه‌خشک	جزیره کیش	بسیار گرم خشک	فردوس	معتدل خشک
اردبیل	بسیار سرد نیمه‌خشک	جزیره ابوموسی	بسیار گرم خشک	فسا	گرم نیمه خشک
ارومیه	سرد نیمه‌خشک	جزیره سیری	بسیار گرم خشک	قائن	معتدل خشک
آستارا	معتدل مرطوب	جلفا	بسیار سرد خشک	قراخیل	معتدل مرطوب
اسلام‌آباد غرب	معتدل نیمه‌مرطوب	خاش	گرم خشک	قروه	سرد نیمه خشک
اصفهان	معتدل خشک	خرم‌آباد	معتدل نیمه مرطوب	قزوین	سرد نیمه خشک
الیگودرز	سرد نیمه‌خشک	خرم‌دره	سرد نیمه خشک	قم - شکوهیه	گرم خشک
امیدیه	بسیار گرم خشک	خلخال	بسیار سرد نیمه خشک	قوچان	سرد نیمه خشک
انار	بسیار گرم خشک	خور و بیابانک	گرم بسیار خشک	کاشان	گرم خشک
اهر	سرد نیمه‌خشک	خوی	سرد خشک	کرج	معتدل نیمه خشک
اهواز	بسیار گرم خشک	دهلران	بسیار گرم نیمه خشک	کاشمر	معتدل خشک
ایلام	معتدل نیمه‌مرطوب	رامسر	معتدل مرطوب	کرمان	معتدل خشک
ایران‌شهر	بسیار گرم خشک	رامهرمز	بسیار گرم نیمه خشک	کرمانشاه	معتدل نیمه خشک
باقت	معتدل خشک	رشت	معتدل مرطوب	کنگاور	سرد نیمه مرطوب
بجنورد	سرد نیمه‌خشک	زابل	گرم بسیار خشک	کهنوج	بسیار گرم خشک
بروجرد	سرد نیمه‌مرطوب	زاهدان	گرم بسیار خشک	گرگان	گرم نیمه مرطوب
بستان	بسیار گرم خشک	زرنه	بسیار سرد نیمه خشک	ماکو	سرد نیمه خشک
بم	بسیار گرم بسیار خشک	زنجان	سرد نیمه خشک	مراغه (سهند)	سرد نیمه خشک
بندر انزلی	معتدل مرطوب	سبزوار	معتدل خشک	مسجد سلیمان	بسیار گرم نیمه مرطوب
بندر عباس	بسیار گرم خشک	سراب	بسیار سرد نیمه خشک	مشهد	معتدل خشک
بندر لنگه	بسیار گرم خشک	سراوان	بسیار گرم خشک	مهاباد	سرد نیمه خشک
بندر ماهشهر	بسیار گرم خشک	سرپل ذهاب	گرم نیمه مرطوب	میانه	سرد نیمه خشک
بوشهر (فرودگاه)	بسیار گرم نیمه خشک	سرخس	گرم خشک	میناب	بسیار گرم خشک
بیرجند	معتدل خشک	سردشت	سرد مرطوب	نهبندان	گرم خشک
بیجار	سرد نیمه خشک	سقز	سرد نیمه مرطوب	نوشهر	معتدل مرطوب
پارس‌آباد	معتدل نیمه خشک	سمنان	معتدل بسیار خشک	همدان	سرد نیمه خشک
پیرانشهر	سرد نیمه مرطوب	سنندج	سرد نیمه مرطوب	یاسوج	معتدل مرطوب
تبریز	سرد نیمه خشک	سیرجان	معتدل خشک	یزد	گرم بسیار خشک
تربت حیدریه	سرد خشک	شاهرود	معتدل خشک		
تکاب	سرد نیمه خشک	شهرکرد	سرد نیمه خشک		

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

تفکیک افقی (km)	کشور سازنده	نام مدل	تفکیک افقی (km)	کشور سازنده	نام مدل
۲۵۰	بریتانیا	HadGEM3-GC31-LL	۲۵۰	استرالیا	ACCESS-ESM1-5
۱۰۰	روسیه	INM-CM5-0	۱۰۰	چین	BCC-CSM2-MR
۲۵۰	ژاپن	MIROC6	۵۰۰	کانادا	CanESM5
۱۰۰	آلمان	MPI-ESM1-2-HR	۱۰۰	آمریکا	CESM2
۱۰۰	ژاپن	MRI-ESM2-0	۱۰۰	ایتالیا	CMCC-ESM2
۱۰۰	تایوان	TaiESM1	۵۰	فرانسه	CNRM-CM6-1-HR
۲۵۰	بریتانیا	UKESM1-0-LL	۱۰۰	ایالات متحده	GFDL-ESM4

ریز مقیاس سازی

پس از انتخاب بهترین مدل اقلیمی برای هر ایستگاه، داده‌های روزانه بارش مدل‌های منتخب CMIP6 برای دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت سه سناریوی SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 با استفاده از مدل آماری LARS-WG (مولد تصادفی هواشناسی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی) ریز مقیاس‌سازی شدند. این مدل یکی از پرکاربردترین مولدهای تصادفی هواشناسی برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی بوده و توانایی مناسبی در بازتولید ویژگی‌های آماری متغیرهای اقلیمی، به‌ویژه بارش و دما، دارد (Semenov and Barrow, 1997). مدل LARS-WG با استفاده از توزیع‌های نیمه‌تجربی، ویژگی‌های آماری سری‌های اقلیمی شامل میانگین، واریانس، توالی روزهای تر و خشک و رخداد مقادیر حدی را شبیه‌سازی می‌کند (Semenov and Stratonovitch, 2010). در این پژوهش، ابتدا داده‌های روزانه مشاهده‌ای هر ایستگاه در دوره پایه وارد مدل LARS-WG شد و مدل با استخراج توزیع‌های نیمه تجربی برای بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر و طول دوره‌های خشک و تر، اقلیم پایه را واسنجی کرد (Munawar et al, 2022). سپس تغییرات اقلیمی پیش‌بینی‌شده توسط مدل منتخب GCM به روش Δ -Change (روش اعمال تغییرات نسبی یا مطلق خروجی مدل‌های اقلیمی بر داده‌های مشاهده‌ای که در آن تغییرات بارش به‌صورت نسبی و تغییرات دما به‌صورت مطلق در نظر گرفته می‌شود) بر پارامترهای کالیبره‌شده اعمال شدند. این فرآیند موجب حفظ ویژگی‌های آماری اقلیم پایه و کاهش اثر خطاهای سیستماتیک مدل‌های اقلیمی در داده‌های روزانه می‌شود؛ در نتیجه، داده‌های نهایی ریزمقیاس‌شده

نمایانگر شرایط اقلیم آینده با حفظ نوسانات روزانه اقلیم پایه هستند (Semenov and Stratonovitch, 2010). در فرآیند ریز مقیاس‌سازی نیز مدل LARS-WG با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌ها، ویژگی‌های آماری محلی بارش و دما را کالیبره کرده و تغییرات پیش‌بینی‌شده مدل‌های اقلیمی را بر ساختار اقلیم محلی اعمال می‌کند. به این ترتیب، اثر شرایط منطقه‌ای و ویژگی‌های هیدروکلیماتولوژیک مرتبط با منابع رطوبتی در داده‌های نهایی ریزمقیاس‌شده تا حدود زیادی حفظ می‌شود. مطالعات متعددی عملکرد مناسب مدل LARS-WG را در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی و مطالعات تغییر اقلیم تأیید کرده‌اند (Semenov and Stratonovitch, 2010; Hassan et al., 2014). در ایران نیز نتایج پژوهش‌های مختلف نشان داده است که این مدل توانایی مطلوبی در بازسازی و شبیه‌سازی سری‌های بارش و دما دارد (Ababaei et al., 2010; Karimi et al., 2015; Mohammadzadeh et al., 2019). با وجود کارایی مناسب مدل LARS-WG در ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی، یکی از محدودیت‌های آن دسترسی به تعداد محدودی از مدل‌های CMIP6 در پایگاه داده داخلی نرم‌افزار است. از این رو، امکان استفاده از تمام مدل‌های اقلیمی CMIP6 وجود ندارد و این محدودیت می‌تواند بخشی از عدم قطعیت پیش‌بینی‌های اقلیمی را تحت تأثیر قرار دهد. با این حال، مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش بر اساس ارزیابی عملکرد و توانایی مناسب آن‌ها در شبیه‌سازی شرایط اقلیمی منطقه انتخاب شدند؛ بنابراین نتایج حاصل از قابلیت اطمینان مناسبی برخوردار هستند.

محاسبه حداکثر بارش محتمل

روش هرشفیلد یکی از متداول‌ترین روش‌های آماری برای برآورد حداکثر بارش محتمل (PMP) در مطالعات هیدرولوژی و هواشناسی است و کاربرد گسترده‌ای در طراحی سازه‌های آبی و مطالعات مدیریت آب دارد. رابطه کلی این روش به صورت زیر است:

$$K_{PMP} = \bar{X}_n - K_m \times SD_n$$

که در آن، K_{PMP} مقدار بارش بیشینه محتمل (PMP) برای یک ایستگاه مشخص در یک دوره زمانی معین است. $\bar{X}_n$ و SD_n به ترتیب میانگین بارش‌های بیشینه سالانه و انحراف معیار سری زمانی بیشینه‌های سالانه بارش برای همان دوره زمانی هستند. ضریب K_m یک ضریب فراوانی است که براساس دوره زمانی و میانگین بارش‌های بیشینه سالانه محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، K_m بیانگر تعداد انحراف معیارهایی است که باید به میانگین سری بیشینه‌های سالانه افزوده شود تا مقدار PMP به دست آید (Afzali-Gorouh et al, 2018). با وجود کاربرد گسترده روش کلاسیک هرشفیلد، مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این روش در برخی مناطق به ویژه در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ممکن است منجر به برآورد بیش از حد و غیرواقع‌بینانه PMP شود. در همین راستا، (Fattahi & Habibi (2022 با استفاده از سری داده‌های سالانه حداکثر بارش ۲۴ ساعته ۱۱۶ ایستگاه سینوپتیک در ایران میزان PMP را با دو روش هرشفیلد اول و هرشفیلد-دسا محاسبه نمودند و نشان دادند که روش کلاسیک هرشفیلد مقادیر بسیار بزرگتری نسبت به بارش‌های مشاهده شده ارائه می‌دهد، در حالی که روش اصلاح شده دسا برآوردهایی واقع‌بینانه‌تر و سازگارتر با شرایط اقلیمی ایران فراهم می‌کند. علاوه بر این نتایج پژوهش‌های (2008) Ghahraman برای حوضه‌های شرق استان هرمزگان، (2002) Paimazd Ansari (2019) در شمال شرق ایران نیز کارایی مناسب روش اصلاح شده هرشفیلد-دسا (روش آماری برآورد PMP مبتنی بر تحلیل سری‌های حدی بارش) را در برآورد PMP تأیید کرده‌اند. بر این اساس، در پژوهش حاضر از روش اصلاح شده هرشفیلد-دسا برای برآورد PMP در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت سناریوهای SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 استفاده شد. روش

دسا به عنوان نسخه اصلاح شده روش هرشفیلد، با حذف داده‌های بسیار حدی و دورافتاده از سری‌های آماری، اثر داده‌های پرت را کاهش داده و برآوردهای واقع‌بینانه‌تری از PMP ارائه می‌کند (Desa et al., 2001). این روش به دلیل نیاز نداشتن به داده‌های پیچیده سینوپتیک، قابلیت استفاده در مقیاس‌های وسیع مکانی و عملکرد مناسب در مناطق دارای محدودیت داده، یکی از روش‌های مناسب برای مطالعات منطقه‌ای محسوب می‌شود. با این حال، روش هرشفیلد-دسا مبتنی بر تحلیل آماری داده‌های تاریخی بوده و فرض می‌کند که ویژگی‌های آماری رخداد‌های حدی بارش تا حدودی پایدار باقی می‌مانند؛ بنابراین، تغییرات احتمالی در رفتار سامانه‌های جوی و شرایط غیرایستا ناشی از تغییر اقلیم می‌تواند بر میزان عدم قطعیت برآوردهای PMP تأثیر داشته باشد. همچنین، نتایج این روش به طول دوره آماری، کیفیت داده‌ها و نحوه تعیین ضریب فراوانی حساس است. در این پژوهش، مقادیر حداکثر بارش ۲۴ ساعته ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه و آینده تحت سناریوهای مختلف SSP به صورت نزولی مرتب شدند و مقادیر PMP تصحیح شده برای هر ایستگاه با استفاده از روش هرشفیلد-دسا محاسبه گردید. پس از محاسبه مقادیر PMP در دوره‌های پایه و آینده، نقشه‌های پهنه‌بندی به روش Ordinary Kriging در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شدند. کریجینگ یکی از متداول‌ترین روش‌های زمین‌آمار برای درون‌یابی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی است که با در نظر گرفتن ساختار همبستگی مکانی داده‌ها و تابع نیم تغییرنما، امکان برآورد مقادیر متغیر در نقاط فاقد داده را فراهم می‌کند (Kriging, 1951; Matheron, 1963). در روش Ordinary Kriging فرض می‌شود میانگین متغیر مورد مطالعه در مقیاس محلی ثابت بوده و وابستگی فضایی داده‌ها تابعی از فاصله بین ایستگاه‌ها است. در این پژوهش، فرآیند درون‌یابی با استفاده از تنظیمات پیش فرض روش Ordinary Kriging در ArcGIS انجام شد و شعاع جستجو بر مبنای نزدیک‌ترین ایستگاه‌های مجاور در نظر گرفته شد تا پیوستگی فضایی مناسب در فرآیند برآورد حفظ شود. با توجه به پراکنش مناسب ۹۷ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور، این روش

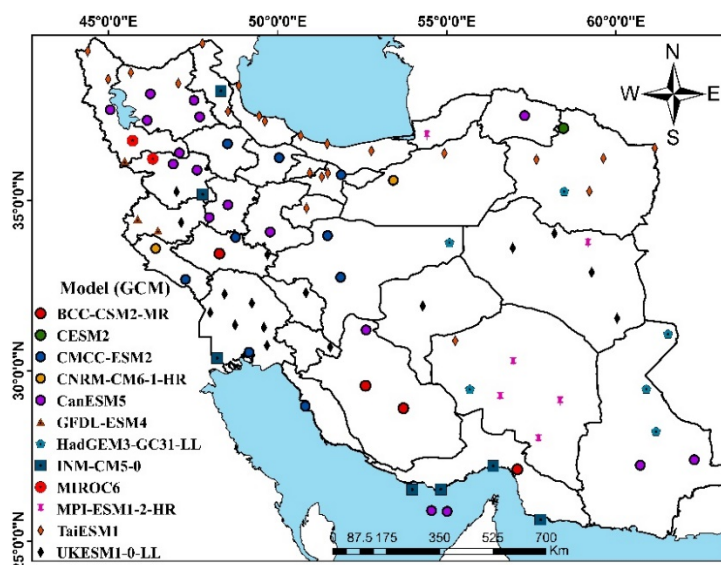
توانایی مناسبی در بازنمایی تغییرات مکانی PMP و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی اقلیمی داشت.

نتایج

مدل‌های منتخب

در شکل ۲، مدل‌های اقلیمی منتخب در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است. براساس نتایج، مدل TaiESM1 به طور متوسط در ۲۳/۱۵ درصد از ایستگاه‌های کشور بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش دوره پایه داشته و عمدتاً در مناطق شمال، شمال غرب و مرکز کشور و ایستگاه‌های مرتفع غالب است. پس از آن، مدل‌های CanESM5 و UKESM1-0-LL به ترتیب در ۱۷/۸۹ و ۱۶/۸۴ درصد از ایستگاه‌های کشور عملکرد مناسبی داشته و در رتبه‌های دوم و سوم قرار گرفته‌اند. مدل اقلیمی CanESM5 عمدتاً در مناطق غربی،

جنوب غربی و نواحی کوهستانی عملکرد مناسب‌تری نشان داد. سایر مدل‌های اقلیمی مانند MPI-ESM1-2-HR، BCC-CSM2-MR، HadGEM3-GC31-LL و GFDL-ESM4 تنها در حدود ۳ تا ۶ درصد از ایستگاه‌ها بهترین تطابق را با داده‌های مشاهده‌ای داشتند. همچنین مدل‌های CESM2، MIROC6 و CNRM-CM6-1-HR در کمتر از ۲ درصد از ایستگاه‌ها به عنوان مدل منتخب شناخته شدند که بیانگر سازگاری کمتر آن‌ها با شرایط اقلیمی ایران است. به طور کلی، نتایج نشان داد که مدل‌های TaiESM1، CanESM5 و UKESM1-0-LL در مقایسه با سایر مدل‌ها، انطباق بیشتری با الگوهای اقلیمی ایران داشته و در طیف متنوعی از شرایط جغرافیایی، از مناطق ساحلی و مرطوب تا نواحی کوهستانی، عملکرد قابل قبول‌تری ارائه کرده‌اند.



شکل ۲- مدل‌های اقلیمی منتخب در ایستگاه‌های مورد مطالعه

حداکثر بارش محتمل (PMP) در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰)

پراکنش مکانی حداکثر بارش محتمل در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع مکانی PMP در ایران دارای ناهمگنی قابل توجهی بوده و تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی، ارتفاع، شرایط توپوگرافی و فاصله از منابع رطوبتی دارد. با توجه به شکل ۳، بیشترین مقادیر PMP (حدود ۳۰۰ تا ۶۳۰ میلی‌متر)

در نواحی معتدل مرطوب کرانه‌های جنوب غربی دریای خزر مشاهده می‌شود. در این منطقه، دریای خزر مهم‌ترین منبع تأمین رطوبت سامانه‌های جوی ورودی از سبیری، اسکاندیناوی و مدیترانه است. علاوه بر این، جهت‌گیری غربی- شرقی رشته‌کوه البرز، به‌ویژه در بخش‌های غربی، موجب تقویت صعود اوروگرافیک و تشدید بارش‌های حدی می‌شود. به طور کلی، اختلاف مقادیر PMP بین ایستگاه‌های ساحلی خزر تحت تأثیر تفاوت ارتفاع، فاصله از دریا و شدت تأثیر پذیری از صعود اوروگرافیک قرار دارد؛ به‌طوری‌که

ایستگاه‌های واقع در دامنه‌های غربی البرز و نواحی نزدیک‌تر به دریای خزر مقادیر PMP بالاتری نسبت به سایر ایستگاه‌های خزری نشان می‌دهند. در بخش غربی کشور، ایستگاه ایلام با PMP حدود ۴۳۸ میلی‌متر مشابه برخی ایستگاه‌های ساحلی خزر، مقادیر بالایی از حداکثر بارش محتمل را نشان می‌دهد. اگرچه متوسط بارش سالانه این ایستگاه (حدود ۵۶۰ میلی‌متر) کمتر از برخی ایستگاه‌های خزری است، اما انحراف معیار بالای بارش‌های ۲۴ ساعته (حدود ۴۸/۶ میلی‌متر) موجب افزایش مقدار PMP نسبت به ایستگاه‌های مجاور مانند کرمانشاه و سندج شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که علاوه بر میانگین بارش، شدت نوسانات و رخداد بارش‌های حدی نیز نقش مهمی در افزایش PMP دارند. پس از این مناطق، مقادیر PMP در بخش‌هایی از زاگرس غربی و جنوبی، نواحی گرم و نیمه خشک ساحلی جنوب بین ۲۱۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است. در این مناطق، ترکیب صعود اوروگرافیک جریان‌های مرطوب مدیترانه‌ای با رطوبت تأمین‌شده از خلیج فارس و دریای عمان، موجب تشدید بارش‌های سنگین می‌شود. این اثر در ایستگاه‌هایی مانند مسجدسلیمان، سرپل‌ذهاب، سردشت و یاسوج به‌وضوح مشاهده می‌شود. برای مثال، ایستگاه مسجدسلیمان به دلیل قرارگیری در مسیر مستقیم جریان‌های مرطوب جنوب‌غربی و هم‌زمان مجاورت با ناهمواری‌های زاگرس، PMP بالاتری نسبت به بسیاری از ایستگاه‌های مجاور جنوب‌غرب کشور دارد (به طور متوسط ۲۵۳ میلی‌متر). در سایر نواحی کشور، شامل مناطق نیمه‌خشک و نیمه‌مرطوب زاگرس میانی و شمال‌غرب ایران، مقادیر PMP عمدتاً بین ۱۶۰ تا ۲۱۰ میلی‌متر است. در این مناطق، اگرچه نفوذ سامانه‌های مدیترانه‌ای همچنان نقش مهمی در رخداد بارش‌های حدی دارد، اما فاصله بیشتر از منابع رطوبتی و کاهش شدت صعود اوروگرافیک موجب کاهش نسبی PMP شده است. همچنین انحراف معیار پایین‌تر بارش‌های ۲۴ ساعته (حدود ۵ تا ۲۵ میلی‌متر) نشان‌دهنده یکنواختی بیشتر رژیم بارشی در این مناطق است. در مناطق خشک و نیمه خشک کشور شامل جنوب و جنوب‌غرب، نواحی مرکزی، نیمه خشک شمال‌شرقی و بخش‌هایی از شمال‌غرب سرد و نیمه خشک (مانند تبریز، خوی، جلفا و ماکو)، مقدار PMP

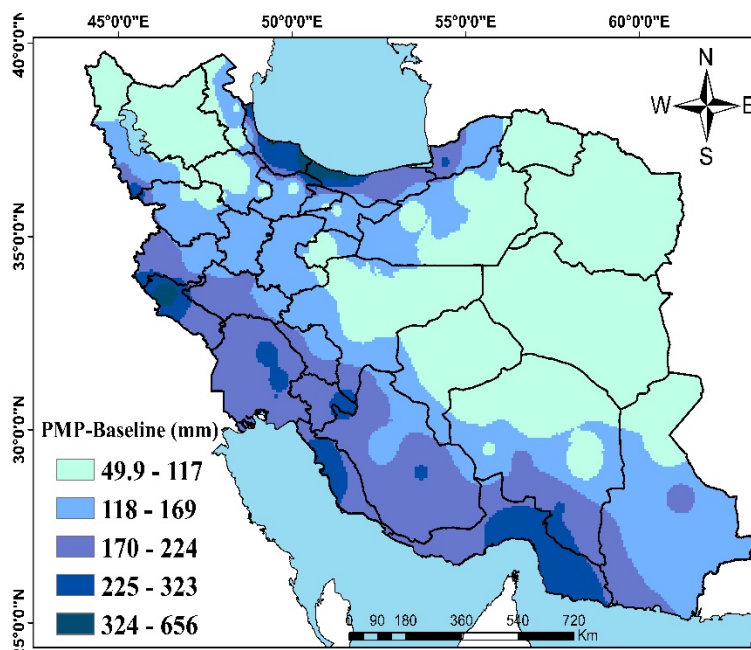
عمدتاً بین ۱۲۰ تا ۱۶۰ میلی‌متر است. میانگین بارش سالانه در این مناطق بین ۲۱۶ تا ۳۱۸ میلی‌متر بوده و بارش‌ها عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های باران‌زای مدیترانه‌ای (در نواحی سرد شمال‌غرب) یا فرایندهای همرفتی (در نواحی بسیار گرم و خشک جنوبی) رخ می‌دهد. این مناطق، به دلیل فاصله بیشتر از منابع رطوبتی، پایداری بیشتر جو و محدودیت تغذیه رطوبتی، دارای مقادیر پایین‌تر PMP هستند. علاوه بر این، انحراف معیار حداکثر بارش ۲۴ ساعته در این مناطق پایین‌تر و بین ۵ تا ۲۵ میلی‌متر است که نشان‌دهنده یکنواختی نسبی رژیم بارشی است. کمترین مقادیر PMP (۴۹ تا ۱۱۷ میلی‌متر) در بخش‌هایی از مناطق داخلی، شمال‌شرق و برخی نواحی شمال‌غرب کشور مشاهده شد. انحراف معیار حداکثر بارش ۲۴ ساعته در این مناطق نیز بسیار پایین (۴ تا ۱۲ میلی‌متر) است که نشان‌دهنده رژیم بارشی نسبتاً یکنواخت در این نواحی می‌باشد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ناهمگنی فضایی PMP در ایران به‌شدت تحت تأثیر شرایط محلی، ویژگی‌های توپوگرافی، فاصله از منابع رطوبتی و شدت نوسانات بارش‌های حدی قرار دارد و حتی بین ایستگاه‌های مجاور نیز تفاوت در ارتفاع، موقعیت توپوگرافی و الگوی دریافت رطوبت می‌تواند موجب اختلاف قابل توجه در مقادیر PMP شود.

تحلیل ارتباط PMP با ارتفاع

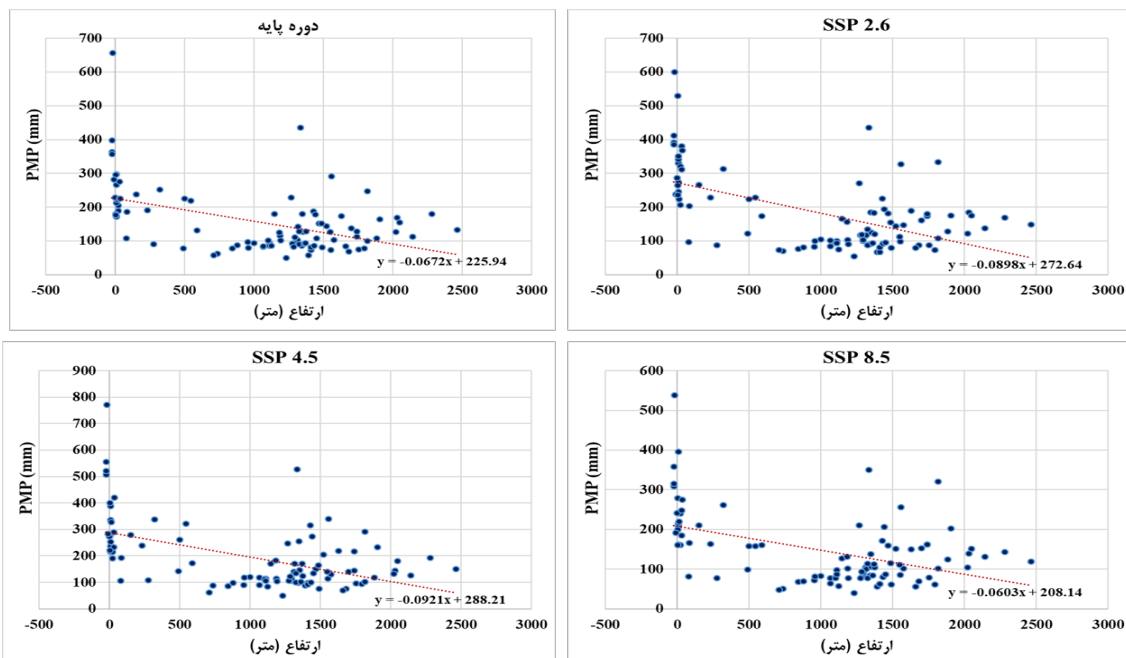
به منظور بررسی کمی اثر عوامل فیزیوگرافی بر الگوی مکانی حداکثر بارش محتمل (PMP)، رابطه بین ارتفاع ایستگاه‌ها و مقادیر PMP در دوره پایه و سناریوهای آینده با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون و نمودارهای پراکنش (Scatter Plot) بررسی شد. نتایج نشان داد که بین ارتفاع ایستگاه‌ها و مقادیر PMP رابطه معکوسی وجود دارد؛ به‌طوری‌که ضرایب همبستگی در دوره پایه، SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 به ترتیب برابر با ۰/۴۹، ۰/۵۶، ۰/۵۱ و ۰/۴۷ بود. همچنین شیب منفی خطوط رگرسیون در تمام نمودارهای پراکنش نشان داد که با افزایش ارتفاع، مقادیر PMP در بسیاری از مناطق کشور کاهش می‌یابد (شکل ۴). در همین راستا بررسی الگوی فضایی مقادیر PMP نیز نشان داد که بیشترین مقادیر PMP عمدتاً مربوط به نواحی کم‌ارتفاع و مجاور منابع اصلی

و نمودارهای پراکنش نشان می‌دهد که الگوی مکانی PMP در ایران حاصل برهم‌کنش پیچیده عوامل توپوگرافی، ارتفاع، فاصله از منابع رطوبتی و شرایط هیدروکلیماتولوژیک منطقه‌ای است.

رطوبتی، به‌ویژه سواحل جنوبی دریای خزر و بخش‌هایی از جنوب و جنوب‌غرب کشور مشاهد می‌شود؛ در مقابل، بسیاری از نواحی مرتفع داخلی و کوهستانی دارای مقادیر پایین‌تری از PMP بودند. در مجموع، نتایج تحلیل همبستگی



شکل ۳- پراکنش مکانی حداکثر بارش محتمل در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰)



شکل ۴- رابطه بین ارتفاع و حداکثر بارش محتمل (PMP) در دوره پایه و آینده تحت سناریوهای SSP4.5، SSP2.6 و SSP8.5

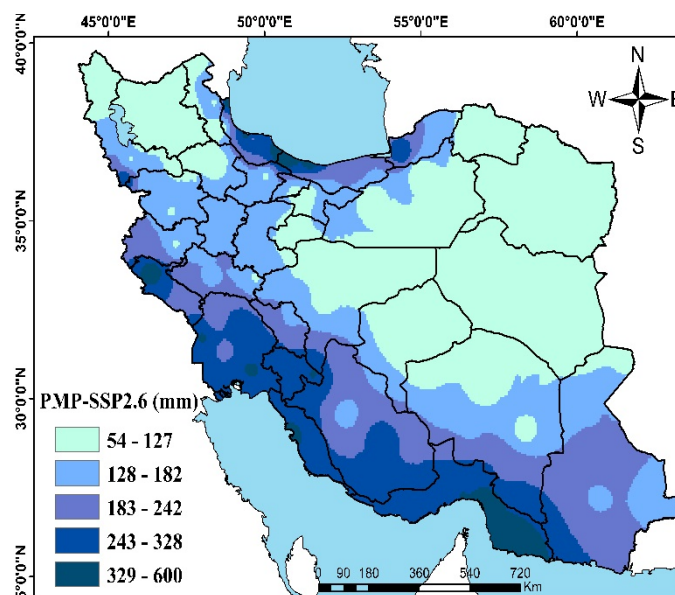
حداکثر بارش محتمل در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰)

براساس سناریوی SSP2.6

بررسی توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل (PMP) در دوره آینده براساس سناریوی SSP2.6 نشان می‌دهد که الگوی توزیع مکانی PMP مشابه دوره پایه است، اگرچه در برخی مناطق شدت و مقدار آن تغییرات قابل توجهی دارد. براساس شکل ۵، همانند دوره پایه، بیشترین مقادیر PMP در کرانه‌های جنوب غربی دریای خزر مشاهده می‌شود؛ به طوری که مقدار PMP در این نواحی بین ۳۳۰ تا ۴۰۰ میلی متر برآورد شده است. همچنین بخش‌هایی از غرب کشور، به ویژه ایستگاه ایلام، مقادیر PMP بالاتری نسبت به نواحی مجاور دارند. پس از این مناطق، نواحی ساحلی جنوب تا جنوب شرق و بخش‌هایی از دامنه‌های جنوب غربی رشته کوه زاگرس دارای مقادیر PMP نسبتاً بالا (۲۰۰-۳۰۰ میلی متر) هستند. در مقابل، در سایر بخش‌های کشور شامل مناطق سرد و خشک غرب و شمال غرب، نواحی بسیار گرم و خشک جنوب و جنوب شرق و همچنین مناطق مرکزی و بیابانی، مقدار PMP کمتر از ۲۰۰ میلی متر است. نتایج سناریوی SSP2.6 نشان داد که بیشترین افزایش PMP نسبت به دوره پایه در سواحل جنوبی و جنوب شرقی (سواحل دریای عمان و خلیج فارس) رخ می‌دهد. در این مناطق، مقدار PMP ایستگاه‌های ساحلی مانند جاسک، بندرلنگه، میناب، کیش، ابوموسی و بندرعباس به ترتیب ۲۳۳، ۱۱۵، ۱۰۴، ۸۶، ۷۲ و ۳۴ میلی متر نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و میزان PMP به طور متوسط بین ۲۴۴ تا ۳۸۰ میلی متر می‌باشد.

علاوه بر این، افزایش قابل توجه PMP در بخش‌هایی از مناطق گرم نیمه خشک تا معتدل مرطوب جنوب غرب و زاگرس جنوبی مشاهده شد. به عنوان مثال، مقدار PMP در ایستگاه‌های اهواز، بستان، امیدیه و مسجد سلیمان به ترتیب ۱۷/۹، ۱۲۸/۲، ۱۴۲/۶ و ۶۲/۱ میلی متر نسبت به دوره پایه افزایش یافته و به طور متوسط بین ۲۰۷ تا ۳۶۷ میلی متر می‌-

رسد. در مقابل، در ارتفاعات زاگرس میانی تغییرات قابل توجهی نسبت به دوره پایه مشاهده نمی‌شود؛ افزایش PMP در این نواحی معمولاً ناچیز و بین ۱/۲ میلی متر (ایلام) تا ۳۱ میلی متر (کنگاور) است و در برخی از ایستگاه‌های مناطق غربی و ارتفاعات زاگرس میانی مانند الیگودرز، سنندج، خرم آباد، کرمانشاه حداکثر بارش محتمل به میزان ۵، ۸، ۱۴ و ۲۴/۴ نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در مناطق سرد و نیمه مرطوب شمال غرب کشور نیز تغییرات PMP نسبت به دوره پایه عمدتاً محدود است. در این مناطق، به جز ایستگاه سردشت که افزایش قابل توجهی برابر با ۳۵ میلی متر دارد، تغییرات سایر ایستگاه‌ها عمدتاً بین ۰ تا ۲۰ میلی متر است. در نواحی شمالی و سواحل جنوبی دریای خزر الگوی تغییرات PMP یکنواخت نیست؛ به طوری که در ایستگاه‌های نوشهر، رشت و رامسر بین ۱۲/۸ تا ۵۶ میلی متر کاهش مشاهده می‌شود، در حالی که ایستگاه‌های آستارا، انزلی و گرگان به ترتیب ۴۸/۱، ۳۳/۳ و ۵۷ میلی متر افزایش نسبت به دوره پایه دارند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که پاسخ بارش‌های حدی در مناطق خزری تحت تأثیر برهمکنش پیچیده توپوگرافی، رطوبت دریای خزر و تغییرات الگوهای گردش جو قرار دارد. بررسی تغییرات PMP در مناطق مرکزی و شرقی کشور نشان می‌دهد که در برخی ایستگاه‌های معتدل خشک تا گرم خشک مانند کاشان، سمنان و شاهرود کاهش اندک به ترتیب به میزان ۱۴، ۹ و ۳ میلی متر نسبت به دوره پایه رخ می‌دهد. در این نواحی مقدار PMP در دوره آینده به طور متوسط میان ۷۵ تا ۸۷ میلی متر قرار دارد. در مقابل، در ایستگاه‌های اراک، اصفهان و بروجن افزایش محسوس به ترتیب به میزان ۲۳، ۲۴ و ۲۰ میلی متر نسبت به دوره پایه رخ می‌دهد و مقادیر PMP بین ۹۸ تا ۱۶۰ میلی متر برآورد شده است. این الگوی افزایشی در بخش‌هایی از شرق و جنوب شرق کشور نیز مشاهده می‌شود؛ به گونه‌ای که ایستگاه‌های زاهدان (۸۸/۴۶ میلی متر)، زابل و ایرانشهر (۴۳ میلی متر) بیشترین افزایش PMP نسبت به دوره پایه را دارند.



شکل ۵- توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل در دوره آینده براساس سناریوی SSP2.6

پایه بین ۲ تا ۴۹ میلی‌متر افزایش یافته است. تنها در ایستگاه‌های سراب و پارس‌آباد کاهش جزئی PMP به ترتیب برابر با ۲ و ۱۴ میلی‌متر مشاهده شد. همچنین، مقایسه نتایج با سناریوی SSP2.6 نشان می‌دهد که در اغلب ایستگاه‌های این نواحی، مقادیر PMP تحت SSP4.5 بیشتر است. در این مناطق، حداکثر بارش محتمل از ۶۳ میلی‌متر در بخش شمال شرقی (طبس) تا ۳۴۰ میلی‌متر در بخش شمال غربی متغیر است. در مناطق مرکزی و شمال‌شرق با اقلیم معتدل خشک تا نیمه‌خشک، مانند تهران، مشهد، کاشمر و شاهرود، مقدار PMP نسبت به دوره پایه حدود ۶ تا ۳۸ میلی‌متر و ۱۲ تا ۲۸ میلی‌متر نسبت به سناریوی SSP2.6 افزایش دارد. با این حال، مقادیر PMP در این مناطق همچنان کمتر از نواحی مرطوب شمالی و غربی کشور است. نتایج نشان داد که در ارتفاعات زاگرس غربی و نواحی نیمه‌مرطوب غرب و شمال‌غرب، گستره مکانی مقادیر بالای PMP نسبت به دوره پایه و همچنین نسبت به سناریوی SSP2.6 افزایش یافته است. در این مناطق، که اقلیم‌های معتدل نیمه‌مرطوب و سرد نیمه‌مرطوب غالب هستند، به جز ایستگاه‌های سنندج، خرم‌آباد و کنگاور که کاهش جزئی ۷/۰ تا ۸ میلی‌متری نسبت به دوره پایه دارند، در سایر ایستگاه‌ها PMP بین ۴ تا ۱۰۳ میلی‌متر افزایش یافته است. در این نواحی، بیشترین PMP مربوط به ایستگاه‌های ایلام و سرپل‌ذهاب به ترتیب به میزان ۵۲۸ و

حداکثر بارش محتمل در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰)

براساس سناریوی SSP4.5

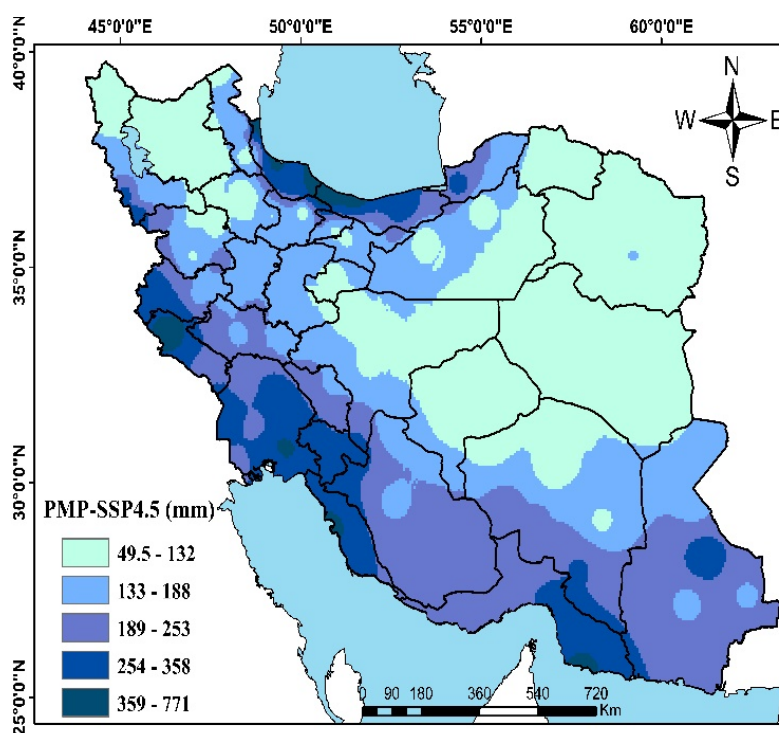
توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل (PMP) براساس سناریوی SSP4.5 نشان می‌دهد که الگوی کلی آن مشابه دوره پایه و سناریوی SSP2.6 است، اما شدت و گستره تغییرات آن در برخی نواحی افزایش یافته است (شکل ۶). با توجه شکل ۶، بیشترین مقادیر PMP در مناطق شمالی، غربی، شمال غربی و دامنه‌های غربی و جنوبی زاگرس مشاهده می‌شود. بیشترین مقدار PMP همچنان مربوط به کرانه‌های جنوب‌غربی دریای خزر است. در ایستگاه‌های آستارا، بندر انزلی، نوشهر و رامسر، مقادیر PMP به ترتیب ۵۵۴، ۵۰۶، ۵۲۱ و ۷۷۰ میلی‌متر برآورد شد که نسبت به دوره پایه حدود ۱۱۴ تا ۱۹۱ میلی‌متر افزایش دارد. شدت این افزایش نسبت به سناریوی SSP2.6 بیشتر است.

در حالی که در سناریوی SSP2.6 برخی ایستگاه‌های خزری مانند رشت، نوشهر و رامسر کاهش ۸/۱۲ تا ۵۶ میلی‌متری را نسبت به دوره پایه داشتند، تحت SSP4.5 تقریباً تمام نواحی مرطوب شمالی افزایش PMP دارند. این نتایج بیانگر افزایش پتانسیل رخداد بارش‌های حادی در سواحل خزری تحت این سناریو است. در اقلیم‌های سرد و نیمه‌خشک شمال‌غرب و شمال‌شرق کشور، شامل ایستگاه‌هایی مانند بیجار، خوی، مهاباد، تبریز، سرخس و طبس، مقدار PMP نسبت به دوره

این نتایج نشان می‌دهد که پاسخ بارش‌های حدی به سناریوهای تغییر اقلیم در مناطق مختلف ایران یکسان نیست و به شرایط رطوبتی، موقعیت جغرافیایی و الگوهای گردش جوی وابسته است. براساس نتایج سناریوی SSP4.5، مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی همچنان کمترین مقادیر PMP را در کشور دارند؛ به‌طوری‌که حداقل مقدار آن در ایستگاه یزد حدود ۴۹ میلی‌متر برآورد شد. در این مناطق، تغییرات PMP نسبت به دوره پایه محدود بوده و عمدتاً بین ۴ تا ۴۰ میلی‌متر افزایش دارد.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که مقدار PMP در اغلب مناطق ایران تحت سناریوی SSP4.5 نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین مقایسه اقلیم‌های مختلف نشان داد که میزان PMP در اقلیم‌های معتدل مرطوب و نیمه مرطوب گرم تحت SSP4.5 بیشتر از SSP2.6 است؛ در حالی‌که در اقلیم‌های گرم و خشک و نیمه گرم خشک مقادیر PMP در سناریوی SSP2.6 بیشتر برآورد شد. این موضوع بیانگر پاسخ متفاوت اقلیم‌های ایران به سناریوهای مختلف تغییر اقلیم و نقش تعیین‌کننده شرایط رطوبتی و الگوهای گردش جوی در تغییرات بارش‌های حدی است.

۳۲۲ میلی‌متر است که به مراتب بیشتر از مقادیر برآوردی در سناریوی SSP2.6 (به ترتیب ۴۳۶ و ۲۲۸ میلی‌متر) است. در مناطق گرم و نیمه خشک تا خشک جنوب، جنوب غربی و جنوب شرقی مقدار PMP عمدتاً بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر برآورد شد. در بخش‌هایی از جنوب غرب، شامل آبادان، بستان، بوشهر، مسجدسلیمان و رامهرمز، افزایش PMP بین ۴۰ تا ۱۲۲ میلی‌متر نسبت به دوره پایه مشاهده شد. همچنین در ایستگاه‌های ساحلی جنوبی مانند ابوموسی، جاسک، کیش، سیری و میناب، افزایش PMP بین ۷ تا ۱۰۵ میلی‌متر برآورد شد. در مقابل، در برخی نواحی ساحلی جنوبی مانند بندرعباس و بندرلنگه، مقدار PMP به ترتیب ۴۴ و ۱۴ میلی‌متر نسبت به دوره پایه کاهش یافت. همچنین در نهندان کاهش بسیار جزئی حدود ۱ میلی‌متر نسبت به دوره پایه مشاهده شد. مقایسه دو سناریوی SSP4.5 و SSP2.6 نشان می‌دهد که بیشترین افزایش PMP نسبت به دوره پایه تحت SSP4.5 در ایستگاه‌های مرطوب و نیمه مرطوب شمال، شمال غرب و غرب کشور رخ می‌دهد؛ در مقابل، در مناطق گرم و خشک جنوبی و جنوب شرقی، مقادیر PMP تحت SSP2.6 در بسیاری از ایستگاه‌ها بیشتر از SSP4.5 است.



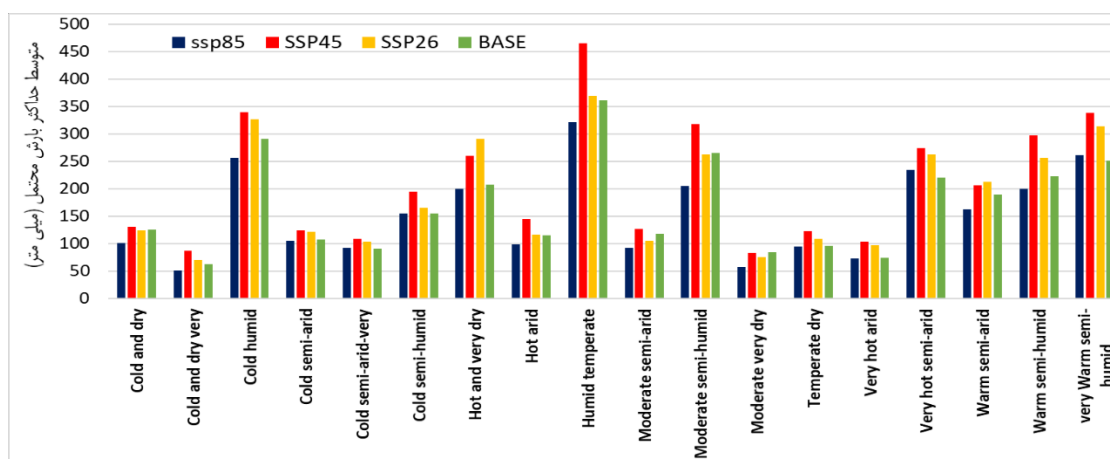
شکل ۶- توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل تحت SSP4.5 در دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۶۰

نفوذپذیری پایین خاک، پوشش گیاهی ضعیف، توسعه محدود شبکه زهکشی و تمرکز سریع رواناب، می‌تواند حتی در رخداد بارش‌های کوتاه‌مدت نیز موجب وقوع سیلاب‌های ناگهانی شود. در مقابل، در مناطق مرطوب شمالی، وجود پوشش گیاهی متراکم‌تر، رطوبت بیشتر خاک و توسعه مناسب‌تر شبکه زهکشی، تا حدود زیادی موجب کاهش شدت پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ها می‌شود. مقایسه سناریوهای مختلف نشان داد که در اکثر اقلیم‌ها، سناریوی SSP4.5 بیشترین افزایش PMP را نسبت به سایر سناریوها دارد. این اختلاف به‌ویژه در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب بیشتر است. برای مثال، میانگین PMP در اقلیم معتدل مرطوب تحت سناریوی SSP4.5 برابر ۴۶۵/۵ میلی‌متر است؛ در حالی که این مقدار در سناریوهای SSP2.6 و SSP8.5 به‌ترتیب ۳۶۸ و ۳۲۱ میلی‌متر برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد که پتانسیل رخداد بارش‌های حدی و خطر سیلاب در سناریوی SSP4.5، به‌ویژه در اقلیم‌های مرطوب، بیشتر است. در مقابل، شدت و گستره تغییرات PMP در سناریوی SSP2.6 محدودتر بوده و مقادیر آن عمدتاً نزدیک به دوره پایه باقی می‌ماند که بیانگر اثر تعدیل‌کننده سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است

حداکثر بارش محتمل در دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰)

براساس سناریوی SSP8.5

متوسط حداکثر بارش محتمل در اقلیم‌های مختلف تحت سناریوهای مختلف (SSP8.5, SSP4.5, SSP2.6) و دوره پایه در شکل ۷ نشان داده شده است. براساس نتایج سناریوی SSP8.5 اقلیم معتدل مرطوب (Humid temperate) با بیشینه ۵۳۸/۷۶ میلی‌متر و میانگین ۳۲۱/۹ میلی‌متر، بیشترین مقدار PMP را در بین اقلیم‌های مختلف دارد. پس از آن، اقلیم بسیار گرم نیمه‌خشک (Very hot semi-arid) و سرد مرطوب به ترتیب با میانگین ۲۶۱/۷ و ۲۵۶/۳ میلی‌متر قرار دارند. اقلیم‌های بسیار گرم نیمه‌خشک (Very hot semi-arid) با بیشینه مقدار ۳۹۶/۵ میلی‌متر و میانگین ۲۳۴/۲ میلی‌متر و همچنین معتدل نیمه مرطوب (Moderate semi-humid) با بیشینه مقدار ۳۵۰/۷ میلی‌متر و میانگین ۲۰۵/۳ میلی‌متر، مقادیر PMP بالاتری را نسبت به سایر اقلیم‌ها دارند. در حالی که کمترین مقادیر مربوط به اقلیم‌های خشک است. در این مناطق اقلیمی، اقلیم‌های بسیار گرم خشک و معتدل بسیار خشک به‌ترتیب با میانگین ۷۲ و ۵۷ میلی‌متر کمترین PMP را نشان می‌دهند. با وجود پایین بودن مقادیر PMP در این مناطق، شرایط فیزیوگرافی و هیدروکلیماتولوژیکی مانند



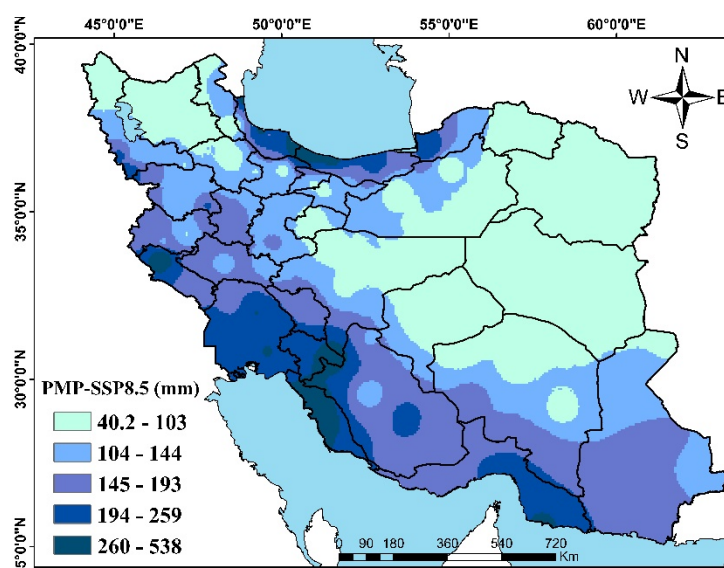
شکل ۷- متوسط حداکثر بارش محتمل در دوره آینده در مناطق اقلیمی مختلف تحت سناریوهای مختلف

تغییرات در برخی مناطق متفاوت است. با توجه به شکل ۸، بیشترین مقادیر PMP همچنان در مناطق مرطوب شمالی، بخش‌هایی از زاگرس غربی و جنوبی و برخی نواحی ساحلی جنوب کشور مشاهده می‌شود. در مناطق مرطوب شمالی،

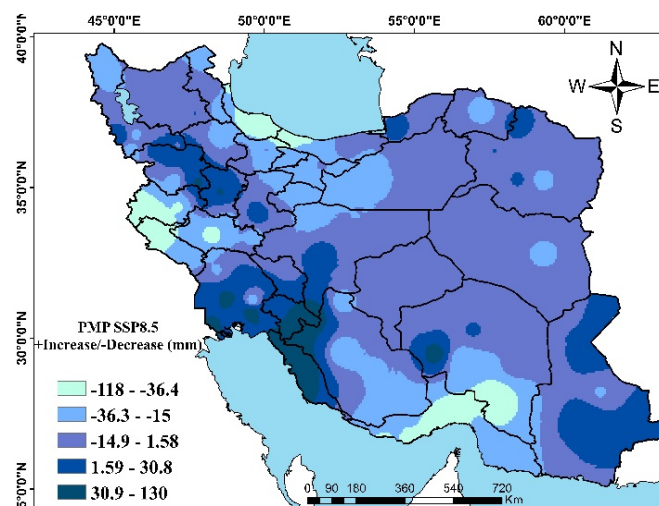
در شکل‌های ۸ و ۹، توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل (PMP) تحت سناریوی SSP8.5 و تغییرات آن نسبت به دوره پایه ارائه شده است. الگوی فضایی PMP تحت SSP8.5 مشابه دوره پایه و سایر سناریوهاست، اما شدت

مناطق سرد و نیمه خشک شمال غربی تحت SSP8.5 کمتر از SSP2.6 و SSP4.5 است؛ در مناطق جنوبی، مقدار PMP عمدتاً بین ۱۹۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر برآورد شد و نسبت به دوره پایه حدود ۹ تا ۹۰ میلی‌متر کاهش دارد. این نتایج نشان می‌دهد که گرمایش شدید در سناریوی SSP8.5 لزوماً موجب افزایش PMP در مناطق جنوبی کشور نمی‌شود و احتمالاً کاهش رطوبت قابل‌تراکم و تغییر الگوهای گردش جوی در کاهش بارش‌های حدی نقش دارد. همانند دوره پایه و سایر سناریوها، مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی تا شمال‌شرقی کشور تحت SSP8.5 کمترین مقدار PMP را دارند. مقدار PMP در این نواحی بین ۴۰ تا ۱۵۰ میلی‌متر است و تغییرات آن نسبت به دوره پایه محدود می‌باشد. این پایداری نسبی مقادیر PMP نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که الگوی فضایی و شدت بارش‌های حدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شمال‌شرقی تحت سناریوی SSP8.5 تغییرات چشمگیری نداشته و همچنان تحت تأثیر محدودیت منابع رطوبتی و شرایط خشک اقلیمی قرار دارد. به‌طور کلی، نتایج سناریوی SSP8.5 نشان داد که اگرچه در بسیاری از مناطق کشور مقادیر PMP نسبت به SSP4.5 و در برخی مناطق نسبت به دوره پایه کاهش یافته است، اما همچنان پتانسیل وقوع بارش‌های حدی و سیلاب‌های ناگهانی قابل توجه است.

به‌ویژه ایستگاه‌های رامسر، آستارا و بندرانزلی، مقدار PMP به ترتیب ۵۳۸/۷۶، ۳۰۹/۰۱ و ۳۱۵/۴۸ میلی‌متر برآورد شده است. با این حال، PMP این ایستگاه‌ها نسبت به دوره پایه کاهش یافته و همچنین مقادیر آن‌ها کمتر از سناریوی SSP4.5 است. برای مثال، مقدار PMP در آستارا و بندرانزلی به ترتیب حدود ۲۴۵ و ۱۹۱ میلی‌متر کمتر از SSP4.5 برآورد شد. در مناطق سرد و نیمه‌خشک شمال‌غرب، مقدار PMP عمدتاً بین ۵۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر است. ایستگاه سردشت بیشترین میزان PMP (۲۵۰ میلی‌متر) را در این منطقه دارد. در بیشتر ایستگاه‌های این منطقه، PMP نسبت به دوره پایه و همچنین نسبت به سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 کاهش نشان می‌دهد. تنها چند ایستگاه مانند اردبیل، بیجار، پیرانشهر و قروه افزایش جزئی PMP نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند (۱ تا ۳۸ میلی‌متر). در سایر ایستگاه‌ها کاهش ۲ تا ۳۴ میلی‌متری نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. در مناطق غربی کشور، شامل الیگودرز، کرمانشاه، خرم‌آباد و سنندج، مقدار PMP بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر برآورد شد. در این مناطق نیز، به جز ایستگاه‌های همدان، کنگاور و سقز که افزایش ۷ تا ۳۴ میلی‌متری دارند، سایر ایستگاه‌ها کاهش ۲۰ تا ۸۰ میلی‌متری نسبت به دوره پایه دارند. ایستگاه ایلام با وجود اینکه بیشترین مقدار را در این منطقه دارد (حدود ۳۰۰ میلی‌متر)، نسبت به دوره پایه کاهش قابل توجهی به میزان ۸۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. به‌طور کلی، مقدار PMP در



شکل ۸- توزیع مکانی حداکثر بارش محتمل تحت SSP8.5 در دوره آینده ۲۰۳۰-۲۰۶۰



شکل ۹- تغییرات حداکثر بارش محتمل ایران در دوره آینده ۲۰۲۳-۲۰۶۰ نسبت به دوره پایه براساس سناریوی SSP8.5

محتمل در ایران مطابقت دارد. تحلیل نتایج حداکثر بارش محتمل در دوره آینده نشان داد که الگوی توزیع مکانی PMP مشابه دوره پایه است، اما شدت و مقادیر بارش در بسیاری از مناطق تحت سناریوهای مختلف تغییر می‌کند. به طور کلی، میزان PMP در غالب مناطق ایران نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش تحت سناریوی SSP4.5 رخ می‌دهد. براساس این سناریو، بیشترین افزایش PMP نسبت به دوره پایه در مناطق معتدل مرطوب شمال و نیمه‌مرطوب غرب و شمال‌غرب کشور رخ می‌دهد. افزایش دما، ظرفیت نگهداری بخار آب در جو و میزان تبخیر از سطوح آبی (مانند خزر و خلیج فارس) را بالا می‌برد و این شرایط پتانسیل رخداد حداکثر بارش محتمل را در این مناطق افزایش می‌دهد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و جنوبی نیز افزایش PMP مشاهده شد، اما نسبت به اقلیم‌های مرطوب شدت کمتری دارد. این تغییرات می‌تواند ناشی از افزایش انرژی همرفتی و تقویت سامانه‌های موسمی جنوب و سیکلون‌های حاره‌ای در دریای عمان باشد. در همین راستا نتایج پژوهش میرزایی و همکاران (۱۳۹۹) نیز نشان داد که شدت بارش‌های حادی و دبی سیلاب در تمام سناریوها به ویژه RCP4.5 افزایش می‌یابد. پژوهش‌های Hong et al. (2021) و Zarrin & Dadashi-Roudbari (2021) نیز نشان دادند که بارش‌های شدید ایران تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد که شدت آن در غرب و جنوب‌غرب ایران برجسته‌تر خواهد شد. در سناریوی خوش‌بینانه SSP2.6، بیشترین افزایش PMP

تغییرات اقلیمی موجب افزایش شدت بارش‌ها و نوسانات در رژیم‌های هیدرولوژیکی می‌شود و ایمنی سازه‌های آبی را تهدید می‌کند. در این پژوهش، با استفاده از روش هرشفیلد-دسا، حداکثر بارش محتمل (PMP) در دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۳۰-۲۰۶۰) تحت سه سناریوی SSP2.6، SSP4.5 و SSP8.5 بررسی شد. نتایج نشان داد که توزیع مکانی PMP در ایران بسیار ناهمگن است و تحت تأثیر ارتفاع، توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی قرار دارد. بررسی دوره پایه نشان داد که بیشترین میزان PMP در مناطق معتدل مرطوب کرانه جنوبی دریای خزر (۳۰۰-۶۳۰ میلی‌متر) مشاهده می‌شود. این شرایط ناشی از تأثیر همزمان منابع رطوبتی دریای خزر، صعود اوروگرافیک در دامنه‌های البرز و نفوذ سامانه‌های مدیترانه‌ای است، که زمینه شکل‌گیری بارش‌های سنگین را فراهم می‌کند. این نتایج با یافته‌های Afzali-Gorouh et al. (2018) و Ahmadi et al. (2015) که میزان PMP را در کرانه جنوبی دریای خزر بررسی نمودند، مطابقت دارد. همچنین بخش‌هایی از زاگرس غربی و جنوبی نیز PMP قابل توجهی دارند که نشان‌دهنده نقش دریای مدیترانه و صعود اوروگرافیک در شکل‌گیری بارش‌های این منطقه است. در مقابل، مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی ایران به دلیل فاصله از منابع رطوبتی و توپوگرافی هموار، کمترین میزان PMP را دارا هستند. این نتایج با یافته‌های دریاباری و همکاران (۱۳۹۱) و Fattahi & Habibi (2014) در زمینه تغییرات مکانی حداکثر بارش

نسبت به دوره پایه عمدتاً در مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی مشاهده شد. این تفاوت در الگوی مکانی افزایش PMP احتمالاً ناشی از پاسخ متفاوت مدل‌های اقلیمی به تغییرات دما، فشار و گردش‌های همدیدی است. براساس سناریوی بدبینانه SSP8.5، گرمایش جهانی شدیدتر است و انتظار می‌رود که افزایش دما و ظرفیت نگهداری رطوبت در جو موجب تشدید بارش‌های حدی شود. با این حال، نتایج مدل‌های اقلیمی تحت این سناریو نشان داد که PMP در برخی مناطق شمالی و شمال‌غرب کاهش قابل توجهی نسبت به دوره پایه دارد. تحت سناریوی SSP8.5، میزان حداکثر بارش محتمل مناطق جنوبی بین ۱۹۰ تا ۲۵۰ میلی‌متر است که به مراتب بیش از مناطق سرد و خشک شمال غربی و غربی ایران می‌باشد. با این حال، حداکثر بارش محتمل در این مناطق نیز نسبت به دوره پایه بین ۹ تا ۹۰ میلی‌متر کاهش می‌یابد. در همین راستا Afrooz et al. (2015) نیز افزایش PMP تا ۲۷.۳٪ در حوضه رودخانه چنار-رهدار در نواحی جنوبی در دوره آینده را گزارش کردند. پژوهش‌های دیگر در مناطق مختلف جهان نیز عمدتاً افزایش PMP در دوره آینده را نشان داده‌اند. به عنوان مثال، Visser et al. (2022) نشان دادند که در استرالیا تا سال ۲۱۰۰، PMP تحت سناریوهای SSP2.6 و SSP8.5 به ترتیب به طور متوسط ۱۳٪ و ۳۳٪ افزایش می‌یابد. Chen et al. (2017) افزایش ۳۰ تا ۵۰ درصدی PMP را در شمال غرب اقیانوس آرام تا سال ۲۰۹۹ تحت سناریوی RCP8.5 یافتند و Xiong et al. (2024) افزایش قابل توجه PMP تا ۲۰٪ در سراسر چین تحت سناریوی SSP2.6 گزارش کرده‌اند.

در مجموع، نتایج نشان می‌دهند که تفاوت قابل توجهی میان میزان حداکثر بارش محتمل تحت سناریوهای SSP8.5، SSP4.5 و SSP2.6 وجود دارد. براساس یافته‌ها، در بسیاری از مناطق ایران، مقادیر PMP تحت سناریوی SSP8.5 کمتر از دو سناریوی دیگر برآورد شد. این نتیجه نشان می‌دهد که رابطه بین گرمایش جهانی و تشدید بارش‌های حدی الزاماً خطی نیست و افزایش بیشتر دما همواره به افزایش یکنواخت PMP منجر نمی‌شود. در سناریوی SSP4.5، میزان گرمایش در حدی است که ضمن افزایش ظرفیت نگهداری بخار آب در جو، همچنان شرایط دینامیکی و رطوبتی مناسب برای شکل‌گیری و تقویت سامانه‌های بارشی

فعال حفظ می‌شود. در چنین شرایطی، افزایش تبخیر از منابع رطوبتی نظیر دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان می‌تواند موجب تقویت شار رطوبتی جو، افزایش ناپایداری همرفتی و تشدید بارش‌های حدی شود. بنابراین در بسیاری از مناطق، به‌ویژه اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب شمال، غرب و شمال‌غرب کشور، مقادیر PMP تحت SSP4.5 نسبت به سایر سناریوها بیشتر برآورد شده است. در مقابل، تحت سناریوی SSP8.5، گرمایش شدیدتر موجب افزایش تبخیر و تعرق، کاهش رطوبت خاک و تغییر در الگوهای گردش عمومی جو می‌شود که می‌تواند باعث تضعیف یا جابه‌جایی سامانه‌های بارشی مؤثر بر ایران گردد. در نتیجه با وجود افزایش ظرفیت نگهداری بخار آب در جو، به دلیل کاهش رطوبت سطحی و تغییر شرایط ترمودینامیکی در برخی مناطق به ویژه سواحل خزر، شمال غرب، غرب و بخش‌هایی از جنوب کشور مقادیر PMP تحت سناریوی SSP8.5 نسبت به SSP4.5 کمتر بود. علاوه بر این، مطالعات نشان داده‌اند که در سناریوهای با انتشار بالا، جابه‌جایی کمربندهای گردش عمومی جو، تغییر موقعیت و شدت جت جنب حاره‌ای و گسترش سلول Hadley می‌تواند مسیر، شدت و فراوانی سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای و سودانی مؤثر بر ایران را تغییر دهد (Tabari et al., 2018; Francis & Fonseca, 2024). این شرایط در برخی مناطق می‌تواند موجب کاهش فراوانی یا تضعیف رخداد‌های بارش بسیار شدید شود؛ هر چند همزمان احتمال وقوع بارش‌های کوتاه‌مدت، همرفتی و مخرب موضعی همچنان وجود خواهد داشت. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پاسخ PMP به تغییر اقلیم حاصل برهم‌کنش پیچیده میان دما، ظرفیت نگهداری بخار آب، الگوهای گردش جوی، وضعیت رطوبت خاک و شرایط هیدروکلیماتولوژیک منطقه‌ای است؛ بنابراین افزایش شدید دما الزاماً به افزایش یکنواخت PMP در تمامی مناطق کشور منجر نخواهد شد. برآورد مقادیر حداکثر بارش محتمل (PMP) به شدت تحت تأثیر روش‌های محاسباتی قرار دارد و صرفاً استفاده از روش‌های آماری بدون در نظر گرفتن سازوکارهای فیزیکی جو و هیدرولوژیکی می‌تواند منجر به پیش‌بینی مقادیر غیرواقعی شود. تراکم پایین ایستگاه‌های مشاهداتی در مناطق کوهستانی نیز می‌تواند خطای مکانی نقشه‌های PMP را افزایش دهد. علاوه بر این، بسیاری از

در دوره آینده الزاما مشابه دوره پایه نخواهد بود و بخشی از تغییرات مشاهده شده در مقادیر PMP را می‌توان در ارتباط با تغییر کلاس اقلیمی و تحول شرایط هیدروکلیماتولوژیک حاکم بر ایستگاه‌ها تفسیر کرد. به‌طوری‌که برخی مناطق نیمه مرطوب ممکن است به سمت اقلیم‌های خشک‌تر گرایش پیدا کنند، در حالی‌که در برخی نواحی مرطوب، افزایش رطوبت جوی و تشدید بارش‌های حدی محتمل خواهد بود. بنابراین ارزیابی تغییرات PMP در شرایط تغییر اقلیم، باید همراه با بررسی پویایی الگوهای اقلیمی آینده انجام شود، زیرا تغییر کلاس اقلیمی می‌تواند بر شدت، فراوانی و توزیع مکانی بارش‌های حدی اثرگذار باشد. بر اساس نتایج این پژوهش، توسعه سامانه‌های هشدار سریع سیلاب، بازنگری در استانداردهای طراحی سازه‌های هیدرولیکی، افزایش ظرفیت شبکه‌های جمع‌آوری رواناب شهری و اجرای اقدامات آبخیزداری در مناطق دارای افزایش PMP ضروری است. به گونه‌ای‌که در مناطق خشک و بسیار خشک، طراحی سازه‌های هیدرولوژیک باید بر کنترل سیلاب‌های ناگهانی، مدیریت رواناب سطحی و کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها متمرکز باشد؛ در حالی‌که در مناطق مرطوب و کوهستانی، کنترل فرسایش خاک، مدیریت رسوب و حفاظت از پوشش گیاهی اهمیت بیشتری دارد. برای مثال، در نواحی جنوبی و جنوب شرقی (مانند هرمزگان و سیستان و بلوچستان)، که براساس سناریوهای SSP2.6 و SSP4.5 احتمال رخداد حداکثر بارش محتمل و سیلاب‌های ناگهانی بیشتر است، توسعه سامانه‌های هشدار سریع و طراحی سازه‌های مقاوم در برابر بارش‌های حدی ضروری است. یافته‌های این پژوهش تأکید می‌کند که بازنگری در سیاست‌های مدیریت منابع آب، استانداردهای طراحی سازه‌های هیدرولیکی و برنامه‌ریزی شهری با لحاظ کردن پویایی PMP در شرایط اقلیمی آینده ضروری است. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر هزینه بالای اجرای زیرساخت‌های سازگار با تغییر اقلیم، کمبود داده‌های بلندمدت با دقت بالا، عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی و محدودیت شبکه ایستگاه‌های هواشناسی در برخی مناطق، می‌تواند اجرای کامل راهکارهای مدیریتی را با چالش مواجه کند.

مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دقیق تعامل‌های اقیانوسی-جوی با وضوح بالا، مانند دماهای سطحی دریا (SST) در خزر و خلیج فارس، نیستند که دقت پیش‌بینی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، استفاده از روش‌های ترکیبی فیزیکی-هیدرومتئورولوژیکی برای اعتبارسنجی فرآیندها ضروری است. همچنین بهره‌گیری از مجموعه‌ای از مدل‌های CMIP6 و RCMها برای کمی‌سازی دقیق‌تر عدم قطعیت‌ها در مطالعات آینده توصیه می‌شود.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شدت تغییرات حداکثر بارش محتمل (PMP) در آینده تابعی از نوع اقلیم، ارتفاع، فاصله از منابع رطوبتی و الگوی گردش جوی است. اثر تغییر اقلیم بر بارش‌های حدی در ایران دارای ناهمگنی مکانی است؛ بیشترین میزان اثرات تغییر اقلیم بر PMP، در اقلیم‌های معتدل مرطوب و نیمه‌مرطوب مشاهده شد، در حالی‌که در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی به مراتب کمتر بود. در اقلیم‌های مرطوب و نیمه‌مرطوب شمال، شمال‌غرب و غرب، غالباً مقادیر PMP در دوره آینده افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش خطر وقوع سیلاب‌های شدید است. در مقابل، در نواحی خشک و نیمه‌خشک مرکزی، گرمایش شدید و کاهش رطوبت قابل‌تراکم، منجر به کاهش شدت بارش‌های حداکثر و مقادیر PMP نسبت به سایر نواحی می‌شود. به دلیل شرایط خاک خشک و سنگلاخی، پوشش گیاهی کم تراکم و شبکه‌های زهکشی محدود، حتی بارش‌های متوسط نیز می‌تواند موجب سیلاب شود. در مناطق معتدل و مرطوب شمال و دامنه‌های غربی زاگرس، اگرچه PMP بالا است، خطر نسبی وقوع سیلاب کمتر از مناطق گرم و خشک است. علاوه بر این، نتایج پژوهش نشان داد که تفسیر تغییرات PMP در دوره آینده باید با در نظر گرفتن پویایی الگوهای اقلیمی انجام شود. در این پژوهش، طبقه‌بندی اقلیمی ایستگاه‌ها براساس شرایط اقلیمی دوره پایه انجام شد تا مبنایی یکسان برای ارزیابی و مقایسه تغییرات آینده فراهم شود. با این حال، تحت سناریوهای مختلف SSP، تغییر در رژیم دما و بارش می‌تواند موجب جابه‌جایی تدریجی مرزهای اقلیمی و تحول ویژگی‌های هیدروکلیماتولوژیک در برخی مناطق ایران شود. از این‌رو، شرایط اقلیمی حاکم بر برخی ایستگاه‌ها

منابع

- monsoon region-Selangor, Malaysia, *Atmospheric Research*, 58, pp. 41–54.
11. Dryabari, S.J., Mohammadi, H., & Rezaei, G.H. 2012, Spatial Analysis of Probable Maximum Precipitation in Iran, *Geographical Journal of Territory*, 9(34), pp. 113–124.
 12. Fattahi, E., Kamali, S., Asadi Oskouei, E., & Habibi, M. 2025, Investigating the Spatiotemporal Variation in Extreme Precipitation Indices in Iran from 1990 to 2020, *Water*, 17, 1227. <https://doi.org/10.3390/w17081227>.
 13. Fattahi, E., & Habibi, M. 2022, Estimation of probable maximum precipitation 24-h (PMP 24-h) through statistical methods over Iran, *Water Supply*, 22(8), 6543. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.281>.
 14. Francis, D., & Fonseca, R. 2024, Recent and projected changes in climate patterns in the Middle East and North Africa (MENA) region, *Scientific Reports*, 14, 10279. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60976-w>.
 15. Ghahraman, B. 2008, The estimation of one day duration probable maximum precipitation over Atrak watershed in Iran, *Iranian J Sci Technol*, 32(B2), pp. 175–179.
 16. Giorgi, F., Raffaele, F., & Coppola, E. 2019, The response of precipitation characteristics to global warming from climate projections, *Earth System Dynamics*, 10, pp. 73–89.
 17. Hassan, Z., Shamsudin, S. & Harun, S. 2014, Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature, *Theoretical and Applied Climatology*, 116, pp.243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0951-8>.
 18. Hiraga, Y., Tahara, R., & Meza, J. 2025, A methodology to estimate Probable Maximum Precipitation (PMP) under climate change using a numerical weather model, *Journal of Hydrology*, 652, 132659. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132659>.
 19. Hong, J., Javan, K., Shin, Y., & Park, J.-S. 2021, Future Projections and Uncertainty Assessment of Precipitation Extremes in Iran from the CMIP6 Ensemble, *Atmosphere*, 12, 1052. <https://doi.org/10.3390/atmos12081052>.
 20. Karimi, S., Karimi, S., Yavari, A.R., & Niksokhan, M.H. 2015, Prediction of temperature and precipitation in Damavand catchment in Iran by using LARS-WG in future, *Earth Sciences*, 4(3), pp.95–100. <https://doi.org/10.11648/j.earth.20150403.12>.
 21. Krige, D.G., 1951, A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical*
 1. Ababaei, B., Sohrabi, T., Mirzaei, F., & Karimi, B. 2010, Evaluation of a stochastic weather generator in different climates of Iran, *Computer and Information Science*, 3(3), pp.217–229.
 2. Afrooz, A.H., Akbari, H., Rakhshandehroo, G.R., & Pourtouserkani, A. 2015, Climate Change Impact on Probable Maximum Precipitation in Chenar-Rahdar River Basin, *Watershed Management*, pp. 36–47. DOI:10.1061/9780784479322.004.
 3. Afzali-Gorouh, Z., Bakhtiari, B., & Kourosh Qaderi. 2018, Probable maximum precipitation estimation in a humid climate, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, pp. 3109–3119. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3109-2018>.
 4. Afzali-Gorouh, Z., Faridhosseini, A., Bakhtiari, B., Mosaedi, A., & Salehnia, N. 2022, Monitoring and projection of climate change impact on 24-h probable maximum precipitation in the Southeast of Caspian Sea, *Nat. Hazards*, 114, pp. 77–99. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05380-1>.
 5. Agnihotri, L., Deshpande, N., & Kulkarni, A. 2025, Probable maximum precipitation estimation and its spatio-temporal analysis, *MAUSAM*, 76(2), pp. 629–638. <https://doi.org/10.54302/mausam.v76i2.6279>.
 6. Ahmad, I., Zhang, F., Tayyab, M., Anjum, M., Zaman, M., Liu, J., Farid, H., & Saddique, Q. 2018, Spatiotemporal analysis of precipitation variability in annual, seasonal and extreme values over upper Indus River basin, *Atmospheric Research*, 213, pp. 346–360.
 7. Ahmadi, M., Lashkari, H., & Azimi, P. 2015, The impact of daily Probable Maximum Precipitation (PMP) on the hydrological hazards of the south west region of Caspian Sea, *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 2(2), pp. 69–83.
 8. Beauchamp, J., Leconte, R., Trudel, M., & Brissette, F. 2013, Estimation of the summer-fall PMP and PMF of a northern watershed under a changed climate, *Water Resour. Res.*, 49, pp. 3852–3862. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20336>.
 9. Chen, X., Hossain, F., & Leung, L.R. 2017, Probable maximum precipitation in the U.S. Pacific Northwest in a changing climate, *Water Resources Research*, 53, pp. 9600–9622. <https://doi.org/10.1002/2017WR021094>.
 10. Desa, M.N.M., Noriah, A.B., & Rakhecha, P.R. 2001, Probable maximum precipitation for 24 h duration over Southeast Asia

100904.
<https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100904>.
32. 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. <https://doi.org/10.3354/cr00836>.
 33. Semenov, M.A., & Barrow, E.M. 1997, Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios, *Climatic Change*, 35, pp.397–414.
 34. Su, B., Sun, H., Wang, A., Zhai, J., Huang, J., Wang, Y., Wen, Sh., & Zeng, X. 2018, Impacts of global warming of 1.5 °C and 2.0 °C on precipitation patterns in China by regional climate model (COSMO-CLM), *Atmospheric Research*, 203, pp. 83–94
 35. Tabari, H., & Willems, P. 2018, Seasonally varying footprint of climate change on precipitation in the Middle East, *Scientific Reports*, 8, 4435. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22795-8>
 36. Tajbakhsh, M., & Al-Ansari, N. 2019, Comparative study of multi-station method and Hershfield's approaches for PMP determination (case study: Northeast of Iran), *Sustain. Water Resour. Manag.*, 5, pp. 1133–1141. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0291-z>
 37. 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, e2022WR032247. <https://doi.org/10.1029/2022WR032247>
 38. Wan Ariffin, W.N.H., Mohd Sidek, L., Basri, H., Torres, A.M., Ahmed, A.N., & Ahmad Bukhari, N.I. 2025, Strengthening Dam Safety Under Climate Change: A Risk-Informed Overtopping Assessment, *Water*, 17, 2856. <https://doi.org/10.3390/w17192856>
 39. Xiong, J., Guo, S.H., Bhishek, A., Yin, J., Xu, C., Wang, J., & Guo, J. 2024, Variation and attribution of probable maximum precipitation of China using a high-resolution dataset in a changing climate, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, pp. 1873–1895. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1873-2024>
 40. Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. 2021, Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble, *Theor. Appl. Climatol.*, 144, pp. 643–660
 41. Ziaee, S., Kalbali, E., Najafabadi, M., & Zakerinia, M. 2021, Approaches to adapting to impacts of climate change in northern Iran: The application of a Hydrology-Economics model, *Journal of Cleaner Production*, 280, pp. 25–35.
 - Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52(6), pp.119–139.
 22. Li, Z., Li, X., Wang, Y., & Quiring, S. 2019, Impact of climate change on precipitation patterns in Houston, Texas, USA, *Anthropocene*, 25, pp. 1–14
 23. Martin, A., Fournier, E., & Jalbert, J. 2024, Statistical estimation of probable maximum precipitation, *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-2594>
 24. Matheron, G. 1963, Principles of geostatistics, *Economic Geology*, 58(8), pp.1246–1266.
 25. Mirzaei, S., Vafakhah, M., Pradhan, B., & Jalil Alavi, S.J. 2020, Prediction and Analysis of Flood Zones under Climate Change Conditions based on CanESM2 Model's Scenarios, *Journal of Ecohydrology*, 7(2), pp. 551–562. <https://doi.org/10.22059/ije.2020.299030.1300>.
 26. Mohammadzadeh, N., Amiri, B.J., Endergoli, L.E., & Karimi, S., 2019, Coupling Tank Model and LARS-Weather Generator in assessments of the impacts of climate change on water resources, *Slovak Journal of Civil Engineering*, 27(1), pp.14–24. <https://doi.org/10.2478/sjce-2019-0003>.
 27. Munawar, S., Rahman, G., Moazzam, M.F.U., Miandad, M., Ullah, K., Al-Ansari, N., & Linh, N.T.T. 2022, Future Climate Projections Using SDSM and LARS-WG Downscaling Methods for CMIP5 GCMs over the Transboundary Jhelum River Basin of the Himalayas Region, *Atmosphere*, 13, 898. <https://doi.org/10.3390/atmos13060898>.
 28. Paimazd, S. 2002, Comparison of Synoptic and Statistic Methods in PMP Estimation and Converting it to PMF. Case Study: Eastern Hormuzgan Province, MSc thesis, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran.
 29. Ramak, Z., Porhemmat, J., Sedghi, H., Fattahi, E., & 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), pp. 204–211. <https://doi.org/10.3103/S1068373917030086>.
 30. Rastogi, D., Kao, S.-C., Ashfaq, M., Mei, R., Kabela, E.D., Gangrade, S., Naz, B.S., Preston, B.L., Singh, N., & Anantharaj, V.G. 2017, Effects of climate change on probable maximum precipitation: A sensitivity study over the Alabama-Coosa-Tallapoosa River Basin, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, pp. 4808–4828. <https://doi.org/10.1002/2016JD026001>
 31. Sarkar, S., & Maity, R. 2020, Estimation of Probable Maximum Precipitation in the context of climate change, *MethodsX*, 7,