

## ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای بارش و دما با استفاده از مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP (مطالعه موردی: رودخانه هررود لرستان)

بابک شاهی‌نژاد<sup>۱\*</sup>، علی کاکاوند<sup>۲</sup>، حجت‌اله یونسی<sup>۳</sup>، حسین یوسفی<sup>۴</sup>

۱. استادیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۲. دانشجوی دکتری مهندسی سازه‌های آبی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۳. دانشیار، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

۴. دانشیار، گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران

(تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۱/۱۱؛ تاریخ بازنگری ۱۴۰۱/۰۲/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۴۰۱/۰۴/۰۹)

### چکیده

در پژوهش حاضر، اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی در حوضه آبریز رودخانه هررود لرستان با استفاده از مدل پیش‌بینی‌کننده CanESM5 تحت سناریوهای RCP (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) براساس گزارش ششم IPCC برای سه دوره زمانی ۲۵ ساله آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) میلادی مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای بارش و دمای متوسط از مدل ریزمقیاس‌گردانی SDSM و یک دوره زمانی ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی در دو ایستگاه هواشناسی کاکارضا و دهنو استفاده شد. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش در هر دو ایستگاه کاکارضا و دهنو، نشان‌دهنده کاهش بارش و افزایش دمای متوسط تحت سناریوهای RCP در دوره‌های زمانی آتی نسبت به دوره پایه بود؛ به گونه‌ای که در بازه زمانی آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) میلادی تحت سناریوی RCP8.5 (سناریوی بدبینانه) در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو، بارش به‌ترتیب ۳۹ و ۳۶ درصد در مقیاس ماهانه و ۳۰/۳۶ و ۳۳/۳۵ درصد در مقیاس سالانه، بیشترین کاهش و دمای متوسط به‌ترتیب ۱۷/۵ و ۱۷/۱ درصد در مقیاس ماهانه و ۹/۳۲ و ۹/۰۶ درصد در مقیاس سالانه بیشترین افزایش را خواهند داشت. در نهایت، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد پدیده تغییر اقلیم اثر زیادی بر پارامترهای بارش و دما در حوضه آبریز رودخانه هررود خواهد داشت.

**کلمات کلیدی:** تغییر اقلیم، رودخانه هررود، گزارش ششم، مدل SDSM.

## مقدمه

تغییر اقلیم عبارت است از: تغییرات رفتار آب‌وهوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که طی یک افق زمانی بلندمدت از اطلاعات مشاهده‌شده یا ثبت‌شده در آن منطقه مورد انتظار است [۱]. پدیده تغییر اقلیم به طور مستقیم بر عوامل مختلف مرتبط با زندگی بشر تأثیرگذار است و اولین گام در بررسی این اثرات، مطالعه اثر تغییر اقلیم بر فراسنج‌های اقلیمی است [۲]. با توجه به اینکه منابع آب در معرض خطرات ناشی از وقوع تغییر اقلیم قرار دارند، بررسی تغییرات این پارامترها در سال‌های آتی می‌تواند راهگشای معضلاتی مثل خشکسالی، سیلاب، تبخیر زیاد و تخریب‌های زیست‌محیطی باشد. امروزه پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی برای اطلاع از میزان تغییرات و در نتیجه در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییر اقلیم مورد توجه اقلیم‌شناسان و پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. در حال حاضر، مدل‌های جهانی گردش عمومی جو (GCMs)<sup>۱</sup> تنها ابزاری هستند که اثر تغییر اقلیم را در سطح جهانی برای عناصر اتمسفری شبیه‌سازی می‌کنند. این مدل‌ها، برای درک بهتر تغییرات پارامترهای هواشناسی در زمان گذشته و آینده، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴-۶]. از این‌رو، این مدل‌ها نمی‌توانند اثر شرایط محلی نظیر توپوگرافی، پوشش گیاهی و غیره را روی پارامترهای هواشناسی مانند بارش و دما در نظر بگیرند؛ بنابراین به ابزاری نیاز است که بتواند از داده‌های مدل گردش عمومی جو در مقیاس محلی استفاده کرد [۷-۹]. به همین دلیل، پژوهشگران روش‌های مختلفی را ابداع کرده‌اند که به مجموعه این روش‌ها، ریزمقیاس‌گردانی<sup>۲</sup> گفته می‌شود [۱۰ و ۱۱]. در همین راستا، روش‌های ریزمقیاس‌گردانی به چهار دسته دینامیکی، سینوپتیکی، آماری و تابع انتقالی طبقه‌بندی شدند. از آنجا که مدل‌های دینامیکی و سینوپتیکی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی نیازمند پردازشگرهای بسیار پیشرفته و ابزارهای پیچیده هستند، امروزه مدل‌های آماری به‌ویژه تابع انتقالی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. این گروه نیز برحسب اینکه بر پایه روابط ریاضی یا آماری استوار باشند، به دو دسته مدل‌های آماری و مدل‌های ریاضی دینامیکی طبقه‌بندی شده‌اند [۱۲].

مدل SDSM<sup>۳</sup> یکی از مدل‌های آماری است که در مطالعات زیادی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج مناسبی ارائه کرده است [۱۳-۱۷]. این مدل بین پیش‌بینی‌های مقیاس محلی و پیش‌بینی‌کننده‌های مقیاس منطقه‌ای، رابطه تجربی برقرار می‌کند [۱۸-۲۰]. کاظمی و همکاران (۲۰۱۴) از مدل SDSM برای خروجی دمای روزانه الگوی جهانی (ECHAM5)<sup>۴</sup> استفاده کردند و نشان دادند داده‌های ریزمقیاس‌شده، بسیار دقیق‌تر از داده‌های الگوی ECHAM5 است. ضریب همبستگی داده‌های ریزمقیاس‌شده با داده‌های مشاهداتی، بین ۸۴ تا ۹۱ درصد بود، در حالی که همین همبستگی برای داده‌های الگوی جهانی، بین ۷۳ تا ۸۳ درصد به دست آمد [۲۱]. روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) پارامترهای بارش و دمای ایستگاه ساری را تحت سناریوهای SSP<sup>۵</sup> برای دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ میلادی پیش‌بینی کرد و نشان دادند به طور متوسط، دمای هوا از ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه سانتی‌گراد و بارش نیز از ۲۴ تا ۳۶ درصد افزایش خواهند یافت [۲۲]. مرتضوی و همکاران (۱۳۹۷) به منظور پیش‌بینی پارامترهای بارش و دما و در ایستگاه‌های سینوپتیک بابلسر و قراخیل در استان مازندران براساس سناریوهای مدل تغییر اقلیم مدل گردش کلی (CanESM2)<sup>۶</sup> از مدل SDSM در سه بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۸ و ۲۰۶۹-۲۱۰۰ میلادی استفاده کردند و نشان دادند در بازه زمانی ۲۰۶۹-۲۱۰۰ میلادی تحت سناریوی RCP8.5<sup>۷</sup> در ایستگاه‌های بابلسر و قراخیل، بارش متوسط سالانه به ترتیب به میزان ۵۱/۰۷ و ۳۴/۷ درصد بیشترین کاهش و دمای متوسط سالانه به ترتیب به میزان ۳/۴۴ و ۳/۸۶ درصد بیشترین افزایش را نسبت به دوره پایه نشان داده است [۲۳]. روش‌های ریزمقیاس‌گردانی آماری SDSM و 4SSVM<sup>۸</sup> و مدل‌های هیدرولوژیکی در حوضه هانجینگ در کشور چین مورد مقایسه قرار گرفتند و نشان داده شد که مدل SDSM در شبیه‌سازی بارش، عملکرد بهتری نسبت به مدل 4SSVM دارد [۲۴]. در پژوهشی از

3. Statistical Down Scaling Model  
4. Atmospheric general circulation model  
5. Shared Socioeconomic Pathway  
6. Canadian Earth System Model  
7. Representative Concentration Pathway  
8. Smooth Support Vector Machine

1. General Circulation Models  
2. Downscaling

می‌لادی و تعیین روند آن در دوره زمانی ۳۰ ساله آتی، از داده‌های ۱۰ ایستگاه منتخب در تحلیل بارش و شش ایستگاه منتخب در تحلیل دما استفاده شد. به این منظور، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و سناریوهای RCP، پس از کالیبراسیون، مدل اقلیمی HadCM3<sup>۴</sup> برای دوره آتی اجرا شد. نتایج نشان داد در سناریوی Rcp4.5 به عنوان گزینه وضعیت متوسط، دما در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه، به میزان ۰/۵ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. همچنین، خروجی مدل در مورد بارش نشان داد متوسط نوسان‌های بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه، به میزان ۸/۸ درصد در مقایسه با دوره زمانی پایه، کاهش خواهد یافت. بارش وضعیت بارش ماهانه ایستگاه‌های مطالعاتی نیز نشان‌دهنده کاهش در فصل زمستان و افزایش در فصل بهار است؛ موضوعی که داده‌های بارش ایستگاه‌های مطالعاتی در وضعیت کنونی نیز آن را تأیید می‌کند [۲۹]. جهانگیر و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل ریزمقیاس‌کننده SDSM و داده‌های مدل CanESM2، پارامترهای دمای کمینه و بیشینه ایستگاه لار را برای سه دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۹۹ میلادی تحت سناریوهای RCP شبیه‌سازی کردند و نشان دادند مدل SDSM به خوبی دمای کمینه و بیشینه را پیش‌بینی کرده و مدل مناسبی برای ریزمقیاس‌نمایی پارامتر اقلیمی دما در ایستگاه لار است؛ همچنین طبق خروجی‌های مدل CanESM2 در هر سه سناریو و هر سه بازه زمانی مورد نظر، دمای کمینه و بیشینه افزایش خواهند یافت [۳]. در پژوهشی دیگر به منظور پیش‌بینی اثرات تغییر اقلیم بر حوضه آبریز سد لار در استان فارس از مدل پیش‌بینی‌کننده CanESM2 براساس سناریوهای RCP (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) برای بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۶۰ میلادی و برای ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای بارش و دمای روزانه از مدل SDSM در یک دوره پایه ۱۱ ساله (۱۹۸۴-۱۹۹۵ میلادی) استفاده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد دمای توسط روزانه بین ۱/۰۱ تا ۱/۱۲ سانتی‌گراد و بارش روزانه نیز بین ۲۱ تا ۲۳ درصد در هر سه سناریوی مورد مطالعه، افزایش خواهند یافت [۳۰].

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS<sup>۱</sup> برای الگوبندی هیدرولوژیکی حوضه رودخانه تونگا- بهادرا در کشور هند و از مدل SDSM برای ریزمقیاس کردن دماهای کمینه و بیشینه و بارش روزانه در حوضه یادشده استفاده شد. نتایج این پژوهش، نشان‌دهنده افزایش بارش و رواناب و کاهش تلفات تبخیر و تعرق واقعی در حوضه آبریز مورد مطالعه بود [۲۵]. سبحانی و همکاران (۱۳۹۴) از مدل‌های LARS-WG<sup>۲</sup> و SDSM جهت شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش ایستگاه‌های تبریز و ارومیه در دوره زمانی ۱۹۶۱-۱۹۹۰ میلادی استفاده کردند و نشان دادند مدل SDSM در هر دو ایستگاه مورد مطالعه برای کمینه و بیشینه دمای روزانه، نتایج بهتری نسبت به مدل LARS-WG داشته و در مورد بارش روزانه، نتایج این دو مدل، تقریباً یکسان است [۲۶]. گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی عملکرد مدل‌های LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش در یک دوره زمانی ۳۰ ساله از سال ۱۹۶۱ تا سال ۱۹۹۰ میلادی در چهار ایستگاه سینوپتیک سقز، تبریز، خوی و ارومیه واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند و نشان دادند هر دو مدل مورد مطالعه دقت بیشتری در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش دارند و در شبیه‌سازی ماهانه دما و بارش، مدل SDSM بهتر عمل می‌کند. این در حالی است که مدل LARS-WG در شبیه‌سازی دوره‌های بارش از عملکرد بهتری برخوردار است و سادگی و سرعت عمل بیشتری نسبت به مدل SDSM دارد [۲۷]. زهتابیان و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه‌ای پارامترهای بارش و دمای روزانه ایستگاه سینوپتیک قزوین با استفاده از دو مدل SDSM و ClimGen<sup>۳</sup> را شبیه‌سازی و نشان دادند هر دو مدل قادر به شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دمای روزانه هستند، اما مدل SDSM توانایی بالایی در شبیه‌سازی دما و مدل ClimGen<sup>۳</sup> نیز توانایی بالایی در شبیه‌سازی پارامتر بارش دارند [۲۸]. عارف و علیجانی (۱۳۹۷) به بررسی وضعیت بارش و دما در حوضه آبخیز دشت یزد - اردکان در دوره آتی ۳۰ ساله ۲۰۱۶-۲۰۴۵ میلادی پرداختند. به منظور بررسی وضعیت بارش و دما در دوره پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵

4. Hadley Centre Coupled Model, version 3

1. Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System  
2. Lang Ashton Research Station Weather Generator  
3. Climate Generator

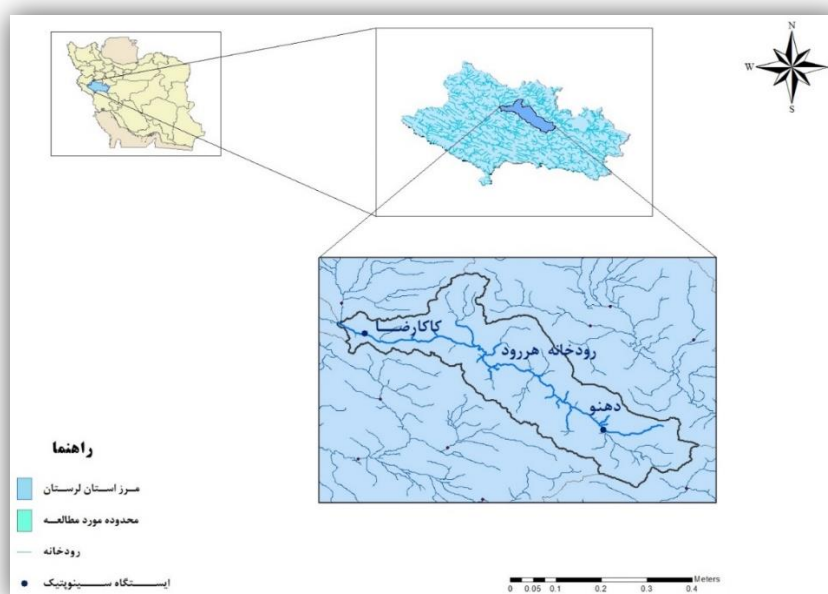
مسیر شرقی- غربی جریان یافته و تقریباً از جنوب و به موازات جاده بروجد - دورود حرکت می‌کند. در نهایت، رودخانه هررود به رودخانه خرم‌آباد می‌پیوندد که تنه اصلی رودخانه کشکان را تشکیل می‌دهند. در طول رودخانه هررود، سه مقطع کنترل وجود دارد که به ترتیب، دهنو، کاسیان و کاکارضا نام دارند. درخور یادآوری است که در محل ایستگاه‌های هواشناسی دهنو و کاکارضا، اطلاعات زیادی ثبت شده است؛ اما از محل سد انحرافی چغلوندی (کاسیان)، آمار و اطلاعات مدونی در دسترس نیست، بنابراین در پژوهش حاضر از داده‌های دو ایستگاه سینوپتیک کاکارضا و دهنو استفاده شد. در شکل ۱ موقعیت حوضه رودخانه هررود نشان داده شده است. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی کاکارضا و دهنو در جدول ۱ آورده شده است. همچنین، بارش و دمای متوسط سالانه ایستگاه‌های یادشده در دوره زمانی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است.

هدف از این پژوهش، ارزیابی اثرات پدیده تغییر اقلیم بر متغیرهای بارش و دمای حوضه آبریز رودخانه هررود واقع در استان لرستان در محل ایستگاه‌های هواشناسی کاکارضا و دهنو است که به این منظور ابتدا با استفاده از مدل SDSM، پیش‌بینی‌کننده‌های مناسب انتخاب می‌شوند. سپس داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل CanESM5 مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ در نهایت وضعیت بارش و دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) میلادی تحت تأثیر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مطالعه شده

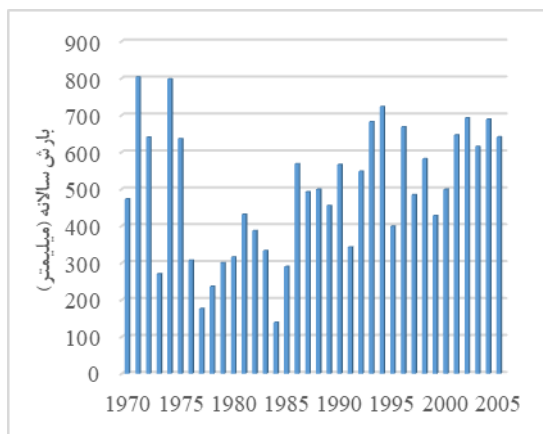
رودخانه هررود در غرب ایران و در استان لرستان واقع شده و از ارتفاعات ۲۸۰۰ تا ۳۰۰۰ متری کوه‌های ازکن، باباخر و تخت کوه سرچشمه می‌گیرد. این رودخانه در



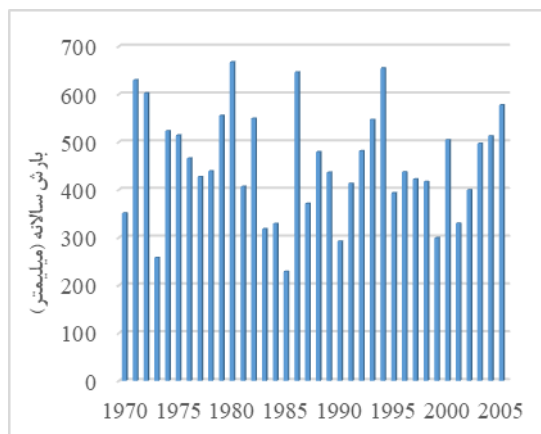
شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده در استان لرستان

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مطالعه شده

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	سال تأسیس	دوره آماری پایه (میلادی)
کاکارضا	۳۱° ۴۸'	۴۳° ۳۳'	۱۵۳۰	۱۳۴۳	۱۹۷۰-۲۰۰۵
دهنو	۴۷° ۴۸'	۳۱° ۳۳'	۱۷۷۰	۱۳۴۸	۱۹۷۰-۲۰۰۵

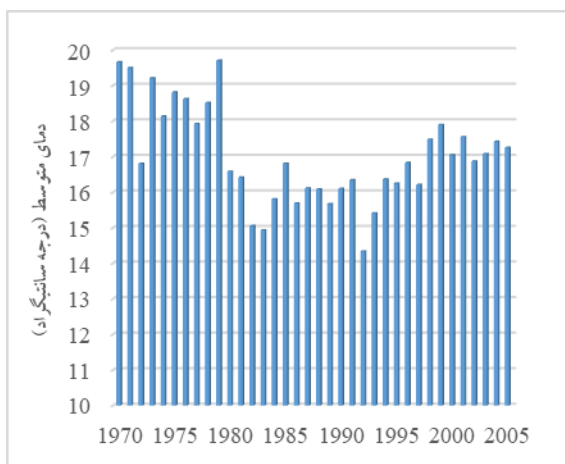


ب

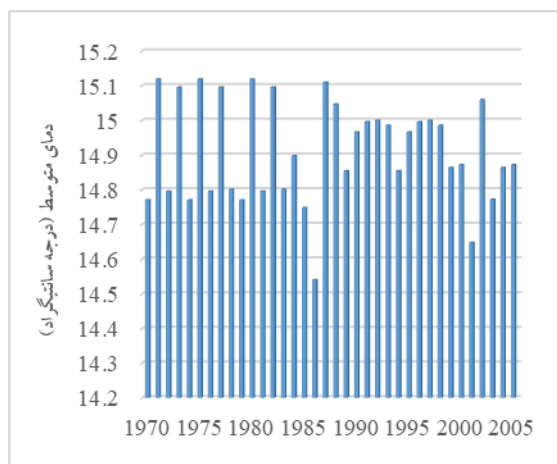


الف

شکل ۲. بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره زمانی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی برحسب میلی‌متر؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۳. دمای متوسط سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره زمانی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی برحسب درجه سانتی‌گراد؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

خواهد شد. قبل از انجام فرایند ریزمقیاس‌نمایی به کمک مدل SDSM، داده‌ها و مدل‌های گردش کلی نرمال شده با توجه به میانگین و انحراف استاندارد آن‌ها در دوره مورد نظر دیده شدند. در این مدل داده‌ها به دو گروه اصلی تقسیم می‌شوند: داده‌های مدل گردش عمومی جو و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی.

در پژوهش حاضر، داده‌های مدل پیش‌بینی‌کننده CanESM2 و متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس (NCEP)<sup>۱</sup> بر اساس سناریوهای طراحی شده در دوره پایه

#### مدل SDSM

در پژوهش حاضر، ابتدا داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هواشناسی کاکارضا و دهنو، جمع‌آوری شدند و کنترل کیفیت روی آن‌ها انجام شد، سپس به منظور شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی بارش و دما در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در دوره پایه و دوره‌های آینده تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری 5.3 SDSM استفاده شد. این مدل روابط آماری بین رفتار متغیرهای مقیاس‌بزرگ (پیش‌بینی‌شونده) و متغیرهای منطقه‌ای (پیش‌بینی‌کننده) را براساس روش رگرسیون خطی چندگانه تعیین می‌کند. این روابط با استفاده از داده‌های ایستگاه شاهد و خروجی مدل گردش عمومی جو در یک دوره زمانی مشابه تولید

1. National Centers for Environmental Prediction

داده شده‌اند. در جدول ۳ نیز مشخصات بهترین داده‌های NCEP که بالاترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشتند، ارائه شده است.

۱۹۷۰ تا ۲۰۰۵ میلادی برای پیش‌بینی وضعیت جو طی دوره‌های آتی از سایت تغییر اقلیم کانادا مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول ۲ داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP نشان

جدول ۲. داده‌های بزرگ‌مقیاس جوی به‌دست آمده از داده‌های بازکاو NCEP و برون‌داد مدل‌های گردش عمومی جو No

Predictors	Code	No	Predictors	Code	No
پیش‌بینی‌کننده‌ها	کد		پیش‌بینی‌کننده‌ها	کد	
500hPa Divergence واگرایی	P5zheu	14	Mean Sea Level Pressure فشار متوسط سطح	Mslpeu	1
850hpa Airflow Strengch قدرت جریان هوا	P8_feu	15	Surface Airflow Strength جریان سطحی	p_feu	2
850 hPa Zonal Velocity سرعت ناحیه ی	p8_ueu	16	Surface Zonal Velocity سرعت‌مداری سطحی	p__ueu	3
850 hPa Meridional Velocity سرعت‌مداری	p8_veu	17	Surface Meridional Velocity سرعت‌مداری سطحی	P_veu	4
850 hPa Velocity سرعت	P8_zeu	18	Surface Vorticity سرعت سطحی	p__zeu	5
850 hPa Geopotential ژئوپتانسیل	p850eu	19	Surface Wind Direction جهت باد سطحی	p_theu	6
850 hPa Wind Direction جهت باد	p8theu	20	Surface Divergence واگرایی سطحی	p_zheu	7
850 hPa Divergence واگرایی	P8zheu	21	500 hPa Airflow Strength قدرت جریان هوا	p5_feu	8
Relative or Specific Humidity at 500 hPa رطوبت نسبی	r500eu	22	500 hPa Zonal Velocity سرعت ناحیه‌ای	P5_zeu	9
Relative or Specific Humidity at 850hPa رطوبت نسبی	r850eu	23	500 hPa Meridional Velocity سرعت‌مداری	P5_veu	10
Near surface specific humidity رطوبت ویژه در نزدیک سطح	Shum	24	500 hPa Vorticity سرعت	p500zeu	11
Near surface relative humidity رطوبت نسبی در نزدیک سطح	Rhumeu	25	500 hPa Geopotential ژئوپتانسیل	P500eu	12
Mean Temperature at 2m دمای متوسط	Tempeu	26	500 hPa Wind Direction جهت باد	P5theu	13

جدول ۳. داده‌های بزرگ‌مقیاس جوی منتخب

داده‌های بزرگ‌مقیاس دما			داده‌های بزرگ‌مقیاس بارش		
Predictors	Code	No	Predictors	Code	No
پیش‌بینی‌کننده‌ها	کد		پیش‌بینی‌کننده‌ها	کد	
Mean Sea Level Pressure فشار متوسط سطح	Mslpeu	1	Mean Sea Level Pressure فشار متوسط سطح	Mslpeu	1
500 hPa Geopotential ژئوپتانسیل	P500eu	12	Surface Meridional Velocity سرعت‌مداری سطحی	P_veu	4
850 hPa Meridional Velocity سرعت‌مداری	p8_veu	17	500 hPa Meridional Velocity سرعت‌مداری	P5_veu	10
Relative or Specific Humidity at 850hPa رطوبت نسبی	r850eu	23	500 hPa Geopotential ژئوپتانسیل	P500eu	12
Mean Temperature at 2m دمای متوسط	Tempeu	26	Mean Temperature at 2m دمای متوسط	Tempeu	26

که این نامگذاری بر پایه نرخ تشعشع خورشید در سال ۲۱۰۰ میلادی است. در پژوهش حاضر از نسخه ۵/۳ مدل SDSM استفاده شد که از سناریوهای ۲/۶، ۴/۵ و ۸/۵ استفاده می‌کند. خصوصیات سناریوهای RCP به صورت خلاصه در جدول ۴ آورده شده است.

سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCP) سناریوهای جدید RCP عامل خطی چگالی‌های مختلف گازهای گلخانه‌ای هستند که در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)<sup>۱</sup> آورده شده‌اند. این سناریوها به ترتیب سناریوهای ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ هستند

جدول ۴. مروری بر سناریوهای RCP

نوع سناریو	سناریو
خوش بینانه	سناریوی RCP2.6؛ افزایش میزان تشعشع خورشیدی تا ۳ وات بر مترمربع (معادل با تولید ۴۹۰ ppm گاز کربن دی‌اکسید تا پیش از سال ۲۱۰۰ میلادی) و سپس کاهش آن به ۲/۶ ppm
متمایل به خوش بینانه	سناریوی RCP4.5؛ افزایش میزان تشعشع خورشیدی تا ۶۵۰ ppm و افزایش اثر گازهای گلخانه‌ای تا ۵/۴ وات بر مترمربع
بدبینانه	سناریوی RCP8.5؛ افزایش میزان تشعشع خورشیدی تا ۸/۵ وات بر مترمربع (معادل با تولید ۱۳۷۰ ppm گاز کربن دی‌اکسید تا سال ۲۱۰۰ میلادی)

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (3)$$

۳- میانگین مربعات خطا (MSE): این پارامتر آماری می‌تواند از صفر در عملکرد عالی تا بی‌نهایت تغییر کند و برای محاسبه این پارامتر از رابطه ۴ استفاده می‌شود:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2 \quad (4)$$

۴- ضریب همبستگی (R): بیانگر میزان همبستگی بین نتایج برآوردشده مدل و داده‌های مشاهداتی است که از رابطه ۵ محاسبه می‌شود. به بیان ساده، ضریب همبستگی، ارتباط خطی بین دو پارامتر را اندازه‌گیری کرده و به عنوان یک ابزار قدرتمند، کاربرد زیادی در تحلیل‌های آماری دارد.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

در روابط یادشده،  $X_i$  داده مشاهداتی،  $\bar{X}$  میانگین داده‌های مشاهداتی،  $Y_i$  داده مدل‌سازی شده و  $n$  تعداد داده‌هاست.

ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل SDSM به منظور ارزیابی نتایج به‌دست آمده از مدل SDSM شاخص‌های آماری ضریب تعیین ( $R^2$ )<sup>۲</sup>، مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)<sup>۳</sup> میانگین مطلق خطا (MAE)<sup>۴</sup> میانگین مربعات خطا (MSE)<sup>۵</sup> و ضریب همبستگی (R)<sup>۶</sup> استفاده شد که در اینجا به معرفی هر یک از این پارامترها پرداخته شده است:

۱- ضریب تعیین ( $R^2$ ): پارامتری بدون بعد که مقدار آن بین صفر و یک است و از رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2 \sum_{i=1}^n Y_i^2}} \quad (1)$$

۲- مجذور میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، میانگین مطلق خطا (MAE): این دو پارامتر نشان‌دهنده میزان خطای مدل هستند که بهترین مقدار آن‌ها صفر است و از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شوند:

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. Coefficient of determination
3. Normal Root Mean Square Error
4. Mean Absolutely Error
5. Mean Square Error
6. Coefficient of Correlation

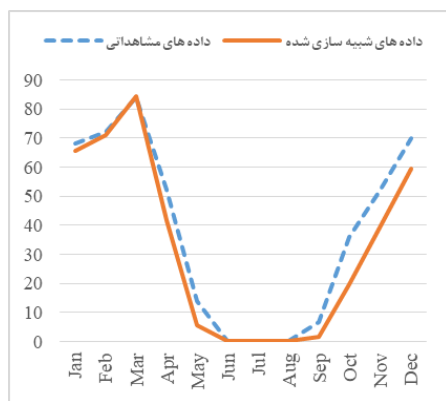
نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل در شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما نتایج اعتبارسنجی مدل SDSM با استفاده از داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده در جدول ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، انطباق مناسبی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM وجود دارد که نمایانگر دقت زیاد این مدل در شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی است.

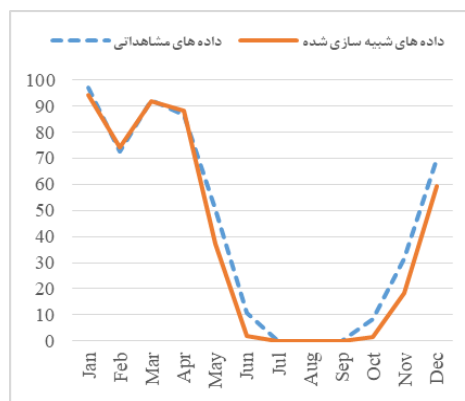
در شکل‌های ۴ و ۵، میانگین داده‌های بارش و دمای متوسط مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داده شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM بسیار ناچیز بوده که این موضوع، دقت و توانایی سطح بالای مدل SDSM در ریزمقیاس نمایی پارامترهای بارش و دما را اثبات می‌کند، بنابراین می‌توان از داده‌های یادشده برای شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دما در بازه‌های زمانی بلندمدت آینده تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم استفاده کرد.

جدول ۵. مقادیر پارامترهای آماری مختلف در تعیین اعتبارسنجی مدل SDSM

ایستگاه	بارش	دمای متوسط
کاکارضا	$R^2 = 0.98$ NRMSE = 0.17 MAE = 5.16 MSE = 51.80 R = 0.99 $R^2 = 0.99$	$R^2 = 0.99$ NRMSE = 0.56 MAE = 0.49 MSE = 0.32 R = 0.99 $R^2 = 0.99$
دهنو	NRMSE = 0.21 MAE = 5.60 MSE = 61.41 R = 0.99	NRMSE = 0.02 MAE = 0.02 MSE = 0.00 R = 0.99

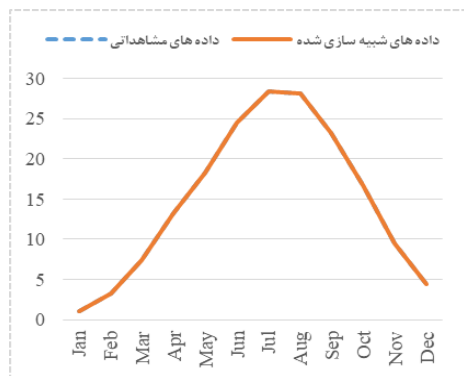


ب

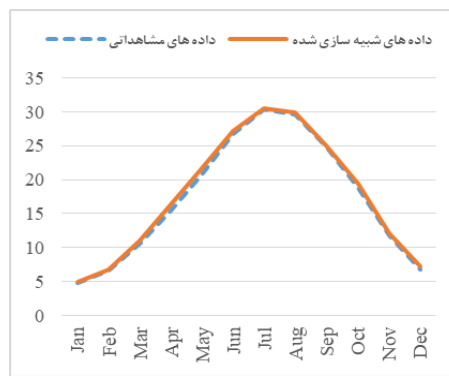


الف

شکل ۴. مقایسه مقادیر بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۵): الف - ایستگاه کاکارضا؛ ب - ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۵. مقایسه مقادیر دمای متوسط ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۵): الف - ایستگاه کاکارضا؛ ب - ایستگاه دهنو



## یافته‌ها

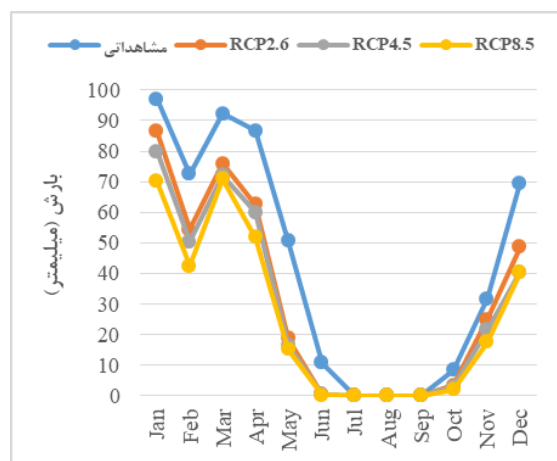
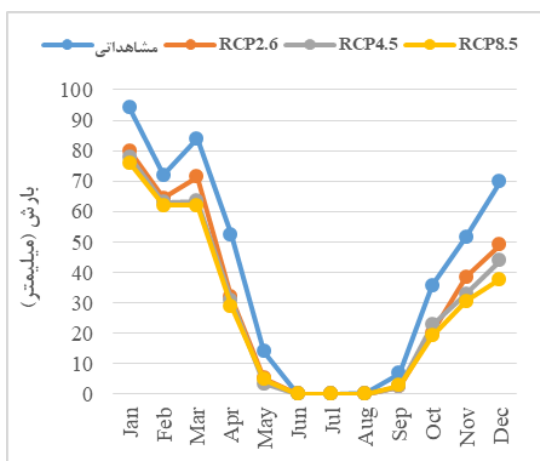
### نتایج پیش‌بینی بارش و دما در سناریوهای آینده

در این پژوهش پس از تضمین بهره‌وری و دقت بالای مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای بارش و دما جهت شبیه‌سازی متغیرهای بارش و دمای متوسط در آینده در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو از سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در سه بازه زمانی ۲۵ ساله شامل: آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) میلادی، استفاده شد که نتایج به‌دست‌آمده در ادامه آورده شده است:

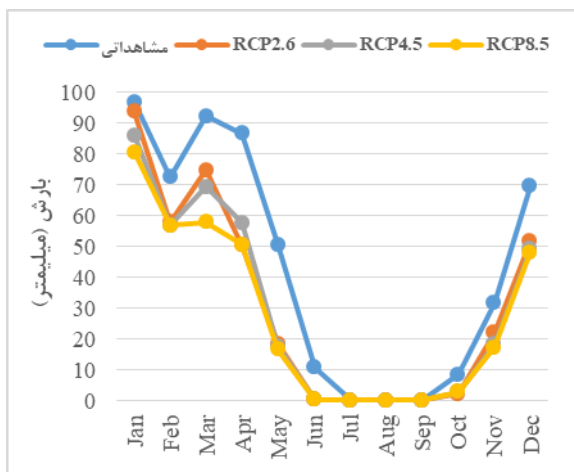
### بارش ماهانه

نتایج شبیه‌سازی بارش ماهانه در بازه‌های زمانی ۲۵ ساله ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در شکل‌های ۶ تا ۸ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده، نشان‌دهنده کاهش بارش ماهانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی) است. به عنوان نمونه در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی (شکل ۶) تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، بارش ماهانه در ایستگاه کاکارضا به ترتیب ۲۷/۷۳، ۳۳/۶۹ و ۴۰/۲۲ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. در ایستگاه دهنو نیز تحت سناریوهای یادشده، بارش ماهانه به ترتیب ۳۳/۶۱، ۳۶/۷۸ و ۳۸/۳۰ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. همچنین، در این دوره زمانی مشاهده

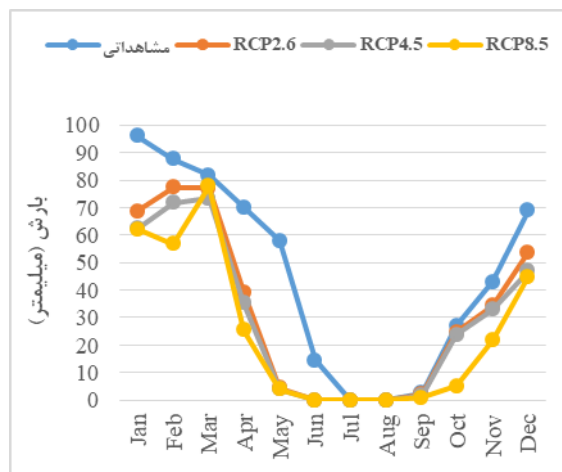
می‌شود که بیشترین میزان بارش در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به ترتیب ۸۶/۴۴ و ۸۰ میلی‌متر در سناریوی RCP2.6 است. میزان نوسان‌های بارش ماهانه مدل‌سازی‌شده در بازه‌های زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه در سناریوهای مختلف و ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بازه‌های زمانی آینده در هر سه سناریوی مورد مطالعه، میزان بارش مدل‌سازی‌شده نسبت به بارش مشاهداتی در بازه زمانی پایه، کاهش یافته است. کمترین میزان این کاهش در سناریوی RCP2.6 و بیشترین میزان آن نیز در سناریوی RCP8.5 رخ داده است که این موضوع به علت ماهیت این سناریوها است؛ در سناریوی RCP2.6، کمترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین، کمترین میزان تشعشعات خورشیدی و در سناریوی RCP8.5، بیشترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین، بیشترین میزان تشعشعات خورشیدی پیش‌بینی شده است. با توجه به افزایش روزافزون تولید گازهای گلخانه‌ای، مشاهده می‌شود که در بازه‌های زمانی آینده، درصد کاهش بارش ماهانه افزایش می‌یابد، به طوری که در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی، تحت سناریوی RCP8.5، میزان کاهش بارش در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به ترتیب ۳۶ و ۳۸ درصد محاسبه شد. همچنین با توجه به شکل‌ها، مشاهده می‌شود که بیشترین میزان کاهش بارش در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس است.



شکل ۶. مقایسه روند تغییرات بارش ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

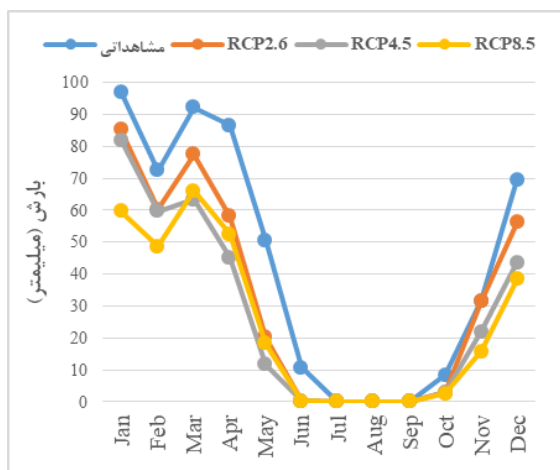


ب

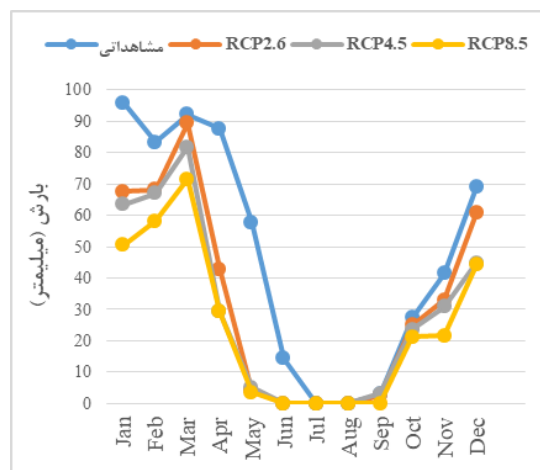


الف

شکل ۷. مقایسه روند تغییرات بارش ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۸. مقایسه روند تغییرات بارش ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

جدول ۶. میزان نوسان‌های بارش ماهانه در بازه‌های زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه (درصد)

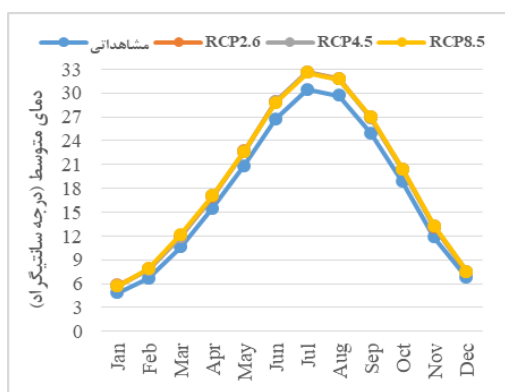
سناریو ایستگاه	۲۰۲۶-۲۰۵۰			۲۰۵۱-۲۰۷۵			۲۰۷۶-۲۱۰۰		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
کاکارضا	۲۹/۳۹	۳۳/۶۰	۳۸/۶۴	۲۹/۹۰	۳۳/۴۷	۳۶/۰۱	۲۶/۵۱	۳۴/۸۷	۳۸/۶۱
دهنو	۳۲/۵۶	۳۶/۶۰	۳۹/۵۳	۲۷/۹۷	۳۴/۸۱	۴۱/۹۲	۲۹/۰۸	۳۲/۷۱	۳۸/۹۰

ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این بخش بیانگر افزایش دمای متوسط ماهانه در دوره زمانی آتی نسبت به دوره پایه است؛ به گونه‌ای که در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی در

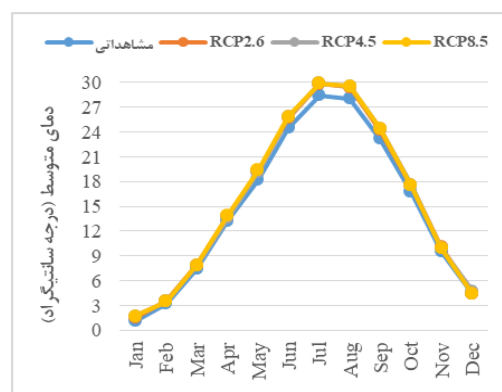
دمای متوسط ماهانه نتایج شبیه‌سازی دمای متوسط در بازه‌های زمانی ۲۵ ساله آتی نسبت به دوره زمانی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی، تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای

علت ماهیت سناریوی یادشده است که کمترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین کمترین میزان تشعشعات خورشیدی در این سناریو مد نظر قرار گرفته است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بیشتر ماه‌های سال، دمای متوسط هوا در همه سناریوهای مورد مطالعه و هر سه بازه مورد نظر، افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان این افزایش در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی، معادل ۱۷/۵ درصد در ایستگاه کاکارضا و ۱۷/۱ درصد در ایستگاه دهنو و در سناریوی RCP8.5 رخ داده است که با نتایج مرتضوی و همکاران (۱۳۹۷)، عارف و علیجانی (۲۰۱۸) و جواهریان و همکاران (۲۰۲۰) مطابقت دارد. میزان نوسان‌های دمای متوسط ماهانه به‌دست‌آمده در بازه‌های زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه در سناریوهای مختلف و ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۷ نشان داده شده است.

ایستگاه کاکارضا، تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، دمای متوسط ماهانه به‌ترتیب ۸، ۹/۵ و ۱۱ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. در ایستگاه دهنو نیز تحت سناریوهای یادشده، دمای متوسط ماهانه به‌ترتیب ۷/۵، ۸ و ۹ درصد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. همچنین در بازه زمانی یادشده، مشاهده می‌شود که بیشترین میزان دمای متوسط در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به‌ترتیب ۳۲/۶۴ سانتی‌گراد و ۲۹/۵۴ سانتی‌گراد در ماه جولای و در سناریوی RCP8.5 رخ می‌دهد که این موضوع به علت ماهیت سناریوی یادشده است که بیشترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و همچنین، بیشترین میزان تشعشعات خورشیدی در این سناریو مد نظر قرار گرفته است. همچنین کمترین میزان دمای متوسط در بازه زمانی یادشده در ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو به‌ترتیب ۵/۶۰ سانتی‌گراد و ۱/۵۳ سانتی‌گراد در ماه ژانویه و در سناریوی RCP2.6 رخ می‌دهد که این موضوع به

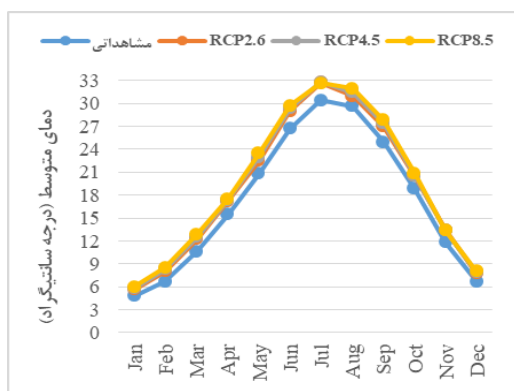


ب

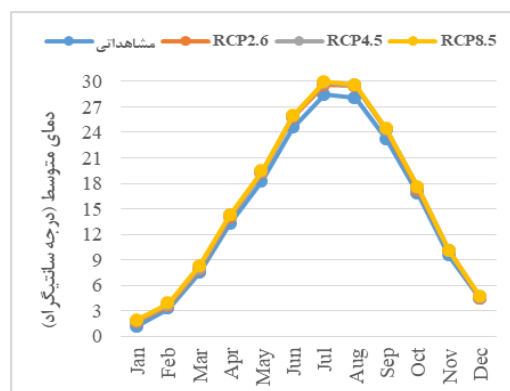


الف

شکل ۹. مقایسه روند تغییرات دمای متوسط ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

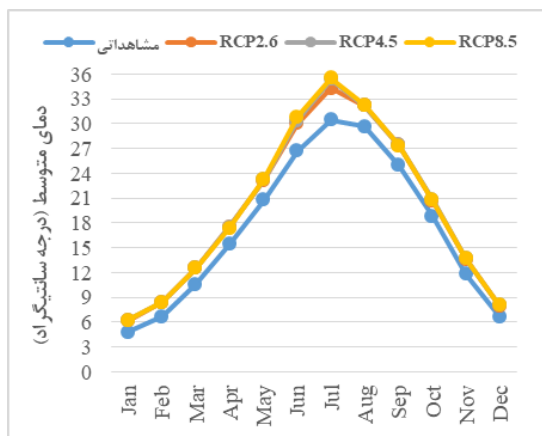


ب

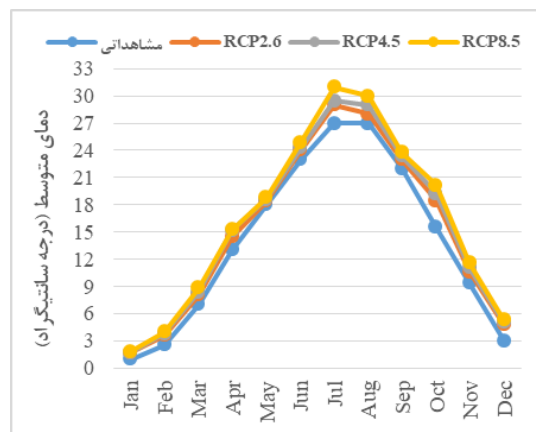


الف

شکل ۱۰. مقایسه روند تغییرات دمای متوسط ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۰ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۱۱. مقایسه روند تغییرات دمای متوسط ماهانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی نسبت به داده‌های مشاهداتی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

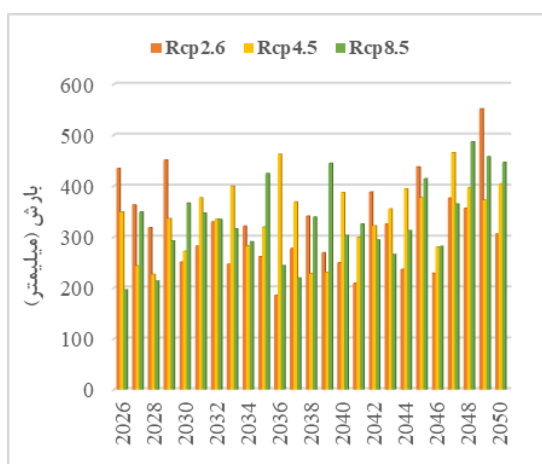
جدول ۷. میزان نوسان‌های دمای متوسط ماهانه در بازه‌های زمانی آینده نسبت به بازه زمانی پایه (درصد)

سناریو ایستگاه	۲۰۲۶-۲۰۵۰			۲۰۵۱-۲۰۷۵			۲۰۷۶-۲۱۰۰		
	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
کاکارضا	۸	۹/۵	۱۱	۱۱/۳	۱۳/۳	۱۵/۲	۱۵/۴	۱۶/۳	۱۷/۵
دهنو	۷	۸/۵	۹	۸/۷	۱۰/۵	۱۲/۱	۱۴	۱۵/۷	۱۷/۱

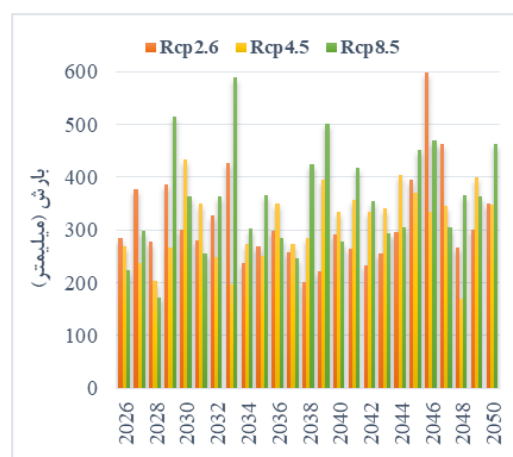
تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است.

### نتایج پیش‌بینی سالانه متغیرهای هواشناسی بارش سالانه

نتایج شبیه‌سازی بارش سالانه در بازه‌های زمانی ۲۵ ساله ۲۰۲۶-۲۰۵۰، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی

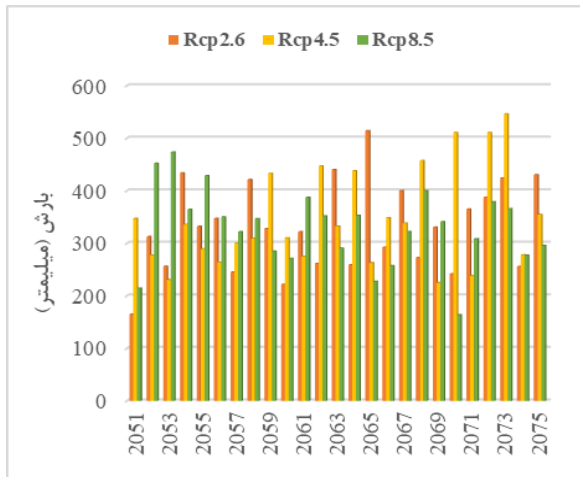


ب

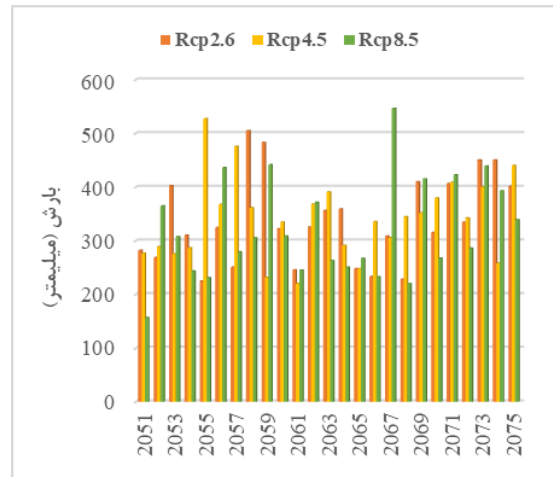


الف

شکل ۱۲. پیش‌بینی بارش سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

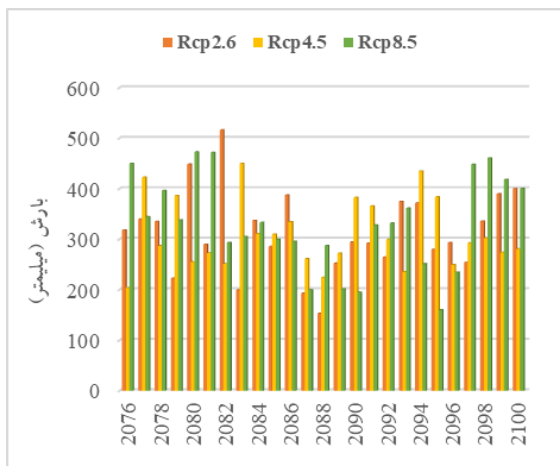


ب

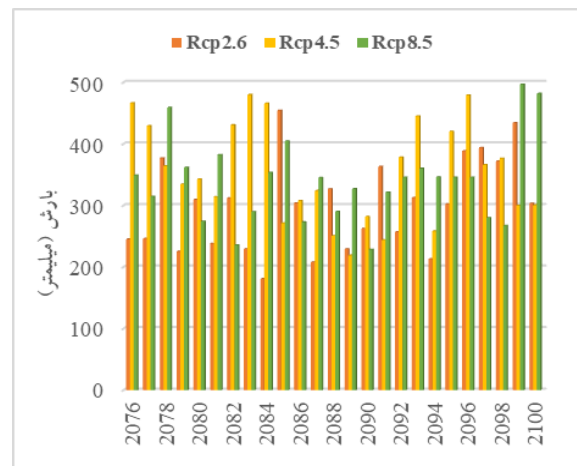


الف

شکل ۱۳. پیش‌بینی بارش سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۱۴. پیش‌بینی بارش سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

کاهش یافته‌اند. در نهایت در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی، بارش سالانه نسبت به دوره زمانی پایه در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۳۲، ۳۵/۶۱ و ۳۶/۳۰ درصد در ایستگاه کاکارضا و ۲۹/۷۲، ۳۱/۳۳ و ۳۳/۳۵ درصد در ایستگاه دهنو کاهش نشان می‌دهند. بیشترین میزان کاهش بارش در سناریوی RCP8.5 و کمترین میزان آن نیز در سناریوی RCP2.6 پیش‌بینی شده است که با توجه به ماهیت این دو سناریو، منطقی به نظر می‌رسد.

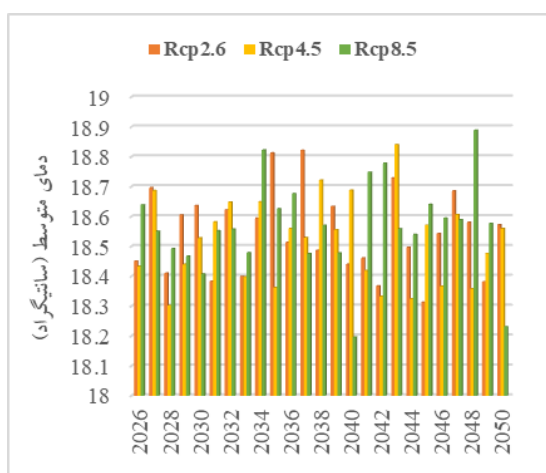
#### دمای متوسط سالانه

نتایج پیش‌بینی دمای متوسط سالانه در بازه‌های زمانی ۲۵ ساله ۲۰۲۶-۲۰۵۱، ۲۰۵۱-۲۰۷۵ و ۲۰۷۶-۲۱۰۰

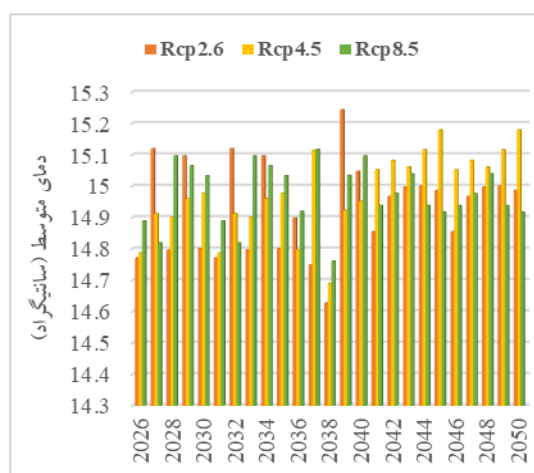
با مقایسه این شکل‌ها با شکل ۲، ملاحظه می‌شود که میزان بارش سالانه ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در هر سه بازه زمانی آتی تحت سناریوهای RCP در مقایسه با دوره زمانی پایه ۱۹۷۰-۲۰۰۵ کاهش خواهد یافت. به گونه‌ای که در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی، بارش سالانه نسبت به دوره زمانی پایه در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲۹/۸۳، ۳۲/۵۸ و ۳۵/۲۵ درصد در ایستگاه کاکارضا و ۱۸/۸۸، ۲۱/۱۵ و ۲۲/۲۹ درصد در ایستگاه دهنو کاهش یافته‌اند. در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ میلادی، بارش سالانه نسبت به دوره زمانی پایه در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۳۱/۲۹، ۳۳ و ۳۴/۳۴ درصد در ایستگاه کاکارضا و ۲۴/۶۷، ۲۵/۲۴ و ۲۸/۴۲ درصد در ایستگاه دهنو

ایستگاه کاکارضا و ۵/۱۵، ۵/۴۰ و ۵/۴۷ درصد در ایستگاه دهنو در مقایسه با دوره زمانی پایه افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش دمای متوسط سالانه در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ و در سناریوی RCP8.5 و کمترین میزان آن در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ و در سناریوی RCP2.6 پیش‌بینی شد. نتایج نوسان‌های دمای متوسط سالانه در بازه‌های زمانی آتی در جدول ۸ ارائه شده است.

میلادی تحت تأثیر سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 برای ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ ارائه شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، ملاحظه می‌شود که دمای متوسط سالانه در همه بازه‌های زمانی آتی نسبت به دوره زمانی پایه، افزایش یافته است. به عنوان نمونه، در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی، دمای متوسط سالانه تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۵/۳۵، ۵/۵۰ و ۵/۶۰ درصد در

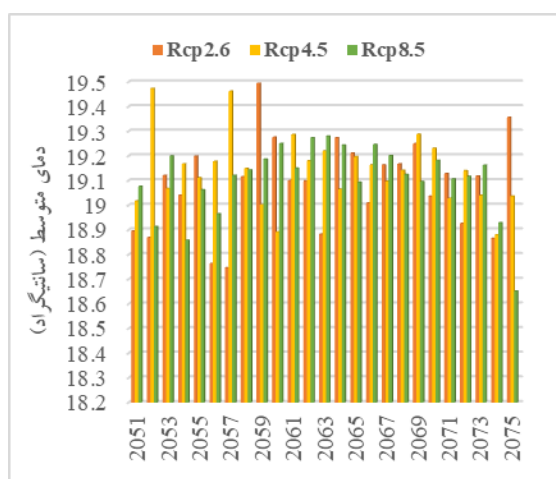


ب

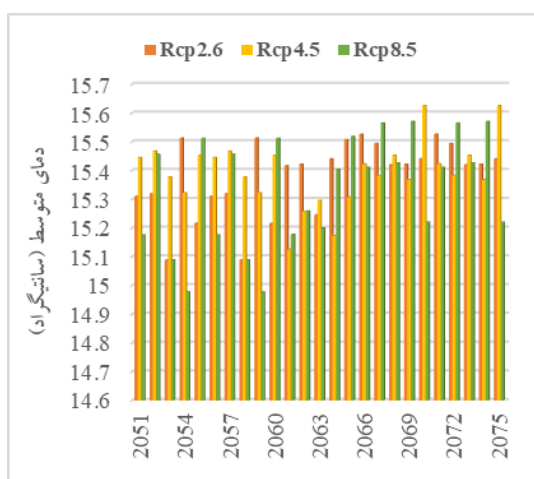


الف

شکل ۱۵. پیش‌بینی دمای متوسط سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

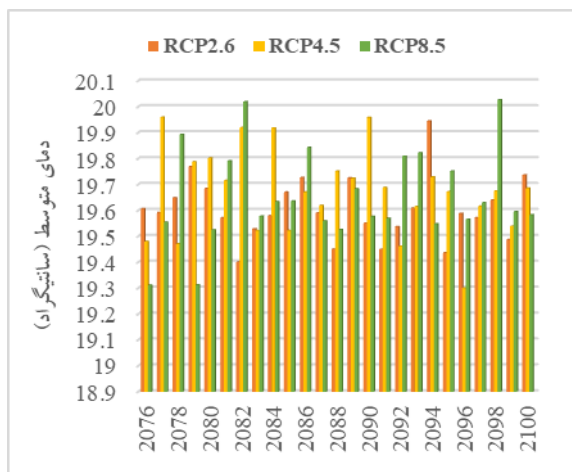


ب

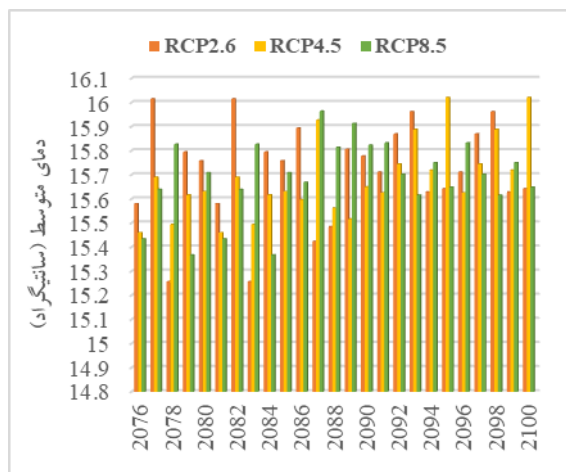


الف

شکل ۱۶. پیش‌بینی دمای متوسط سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۵۱-۲۰۷۵ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو



ب



الف

شکل ۱۷. پیش‌بینی دمای متوسط سالانه تحت تأثیر سناریوهای RCP در بازه زمانی ۲۰۷۶-۲۱۰۰ میلادی؛ الف- ایستگاه کاکارضا؛ ب- ایستگاه دهنو

جدول ۸. میزان کاهش دمای متوسط سالانه ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در بازه‌های زمانی آتی تحت سناریوهای RCP (درصد)

ایستگاه کاکارضا								
۲۰۲۶-۲۰۵۰			۲۰۵۱-۲۰۷۵			۲۰۷۶-۲۱۰۰		
RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	Rcp2.6	Rcp4.5	Rcp8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
۵/۳۵	۵/۵۰	۵/۶۰	۷/۳۱	۷/۴۶	۷/۵۹	۸/۹۹	۹/۲۷	۹/۳۲
ایستگاه دهنو								
۲۰۲۶-۲۰۵۰			۲۰۵۱-۲۰۷۵			۲۰۷۶-۲۱۰۰		
Rcp2.6	Rcp4.5	Rcp8.5	Rcp2.6	Rcp4.5	Rcp8.5	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
۵/۱۵	۵/۴۰	۵/۴۷	۶/۹۰	۷/۰۹	۷/۲۶	۸/۴۱	۸/۷۷	۹/۰۶

### نتیجه‌گیری

گرفت. با توجه به مقادیر پارامترهای آماری محاسبه‌شده، انطباق مناسب و قابل قبولی بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و مقادیر مشاهداتی در دوره پایه وجود دارد. بنابراین، می‌توان از مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای هواشناسی و تولید سناریوهای تغییر اقلیم در دوره‌های زمانی آتی، استفاده کرد. رضایی و همکاران (۲۰۱۴)، مرتضوی و همکاران (۱۳۹۷) و جواهریان و همکاران (۲۰۲۰) نیز بر کارایی و دقت زیاد مدل SDSM در تولید داده‌های روزانه هواشناسی تأکید کردند. مقایسه نتایج حاصل از بارش پیش‌بینی‌شده در دوره‌های آتی با مقادیر مشاهداتی در دوره پایه، نشان‌دهنده کاهش میزان بارش ماهانه در دوره‌های زمانی آتی است. بیشترین میزان کاهش بارش متعلق به سناریوی RCP8.5 است و کمترین میزان آن نیز متعلق به سناریوی RCP2.6 است که براساس ماهیت سه سناریو در نظر گرفته شده است. در

در این پژوهش، اثرات تغییر اقلیم در آینده بر پارامترهای هواشناسی در حوضه آبریز رودخانه هررود با استفاده از مدل پیش‌بینی‌کننده CanESM5 و سناریوهای RCP (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) براساس گزارش ششم IPCC برای بارش و دمای ایستگاه‌های کاکارضا و دهنو در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) مورد مطالعه قرار گرفت و با دوره زمانی پایه (۱۹۷۰-۲۰۰۵) میلادی مقایسه شد. به منظور ریزمقیاس‌نمایی پارامترهای بارش و دمای متوسط، کمینه و بیشینه از داده‌های دوره زمانی ۳۵ ساله ۱۹۷۰-۲۰۰۵ میلادی در دو ایستگاه هواشناسی کاکارضا و دهنو استفاده شد. نتایج ارزیابی داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل SDSM و داده‌های مشاهداتی با استفاده از پارامترهای مختلف آماری مورد بررسی قرار

## منابع

- [1]. Hafezparast M, Pourkheirolah Z. The effect of RCP scenarios on hydrological parameters, case study: Doiraj Dam catchment. *Watershed Engineering and Management*. 2017;10(2): 231-248. [Persian]
- [2]. Hooshmand D, Khordadi MJ. Uncertainty assessment of AOGCMS and emission scenarios in climatic parameters estimation (case study in Mashhad synoptic station). *J of Geography and Environmental Hazards*. 2014;3(3): 77-92. [Persian]
- [3]. Jahangir M, Sadati Nejad SJ, Haghghi P. Predicting of Temperature Parameters under the CanEMS2 Model (Case Study: Lar Synoptic Station). *J of Extension and Development of Watershed Management*. 2018; 6(22): 45-58. [Persian]
- [4]. Dunning CM, Allan RP, Black E. Identification of deficiencies in seasonal rainfall simulated by CMIP5 climate models. *Environmental Research Letters*. 2017; 12(11):1-11.
- [5]. Rowell DP. An observational constraint on CMIP5 projections of the East African Long Rains and Southern Indian Ocean warming. *Geophysical Research Letters*. 2019; 46(11):6050–6058.
- [6]. Wainwright CM, Marsham JH, Keane RJ, Rowell DP, Finney DL, Black E, et al. Eastern African Paradox rainfall decline due to shorter not less intense Long Rains. *Climate and atmospheric science*. 2019; 2 (34):1-9.
- [7]. Heydari STK, Hosseini SA, Heydari ATK. Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*. 2020; 6:329–339.
- [8]. Jiang J, Zhou T, Chen X, Zhang L. Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*. 2020; 15(5):1–8.
- [9]. You Q, Cai Z, Wu F, Jiang Z, Pepin N, Shen SP. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*. 2021; 57(1):17–35.
- [10]. Akbari. M, Salimi S, Hosseini SA, Hosseini M. Spatio-temporal changes of atmospheric rivers in the Middle East and North Africa region. *International Journal Climatology*. 2019;39(10):3976–3986.
- [11]. Almazroui M, Saeed F, Saeed S, Ismail M, Ehsan MA, Islam MN, et al. Projected changes in climate extremes using CMIP6 simulations over SREX regions. *Earth Systems and Environment*. 2021; 5:481–497.
- سناریوی RCP2.6 کمترین میزان تشعشعات خورشیدی و کمترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای و در سناریوی RCP8.5 بیشترین میزان تشعشعات خورشیدی و بیشترین میزان تولید گازهای گلخانه‌ای پیش‌بینی شده است. بارش متوسط ماهانه در دو ایستگاه مطالعاتی، در اغلب ماه‌های سال تحت تأثیر همه سناریوهای RCP، در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه، کاهش یافته است. سناریوی RCP8.5 نسبت به دو سناریوی دیگر، بیشترین روند کاهش را در آینده پیش‌بینی کرده است. دمای متوسط ماهانه در هر دو ایستگاه مطالعاتی، تحت تأثیر همه سناریوهای RCP، در دوره‌های زمانی آینده، روند افزایشی نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش دمای متوسط ماهانه در سناریوی RCP8.5 و کمترین میزان آن نیز در سناریوی RCP2.6 وجود دارد که با توجه به ماهیت این سناریوها، قابل پیش‌بینی است و با نتایج پژوهش‌های مرتضوی و همکاران (۱۳۹۷)، رضایی و همکاران (۲۰۱۴)، گودرزی و همکاران (۲۰۱۶) و جواهریان و همکاران (۲۰۲۰)، همخوانی دارد.
- مقدار بارش سالانه نیز همچون بارش ماهانه، در دوره‌های زمانی آینده نسبت به دوره پایه کاهش یافته است. مقدار دمای متوسط سالانه در دوره‌های زمانی آتی نسبت به دوره زمانی پایه، افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش دمای متوسط سالانه در سناریوی RCP8.5 و کمترین میزان آن نیز در سناریوی RCP2.6 پیش‌بینی شد.
- نتایج حاصل از این پژوهش و محاسبه تغییرات متغیرهای هواشناسی بارش و دمای متوسط در دوره زمانی مورد مطالعه در حوضه رودخانه هررود، نشان داد بیشترین میزان تغییرات در پارامتر بارش و دمای متوسط به ترتیب در سناریوهای RCP8.5 و RCP2.6 رخ خواهد داد. همچنین، نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد پدیده تغییر اقلیم در حوضه مورد نظر، اثر زیادی روی پارامتر بارش و دمای متوسط در دو ایستگاه هواشناسی کاکارضا و دهنو خواهد داشت. در مجموع، در این مطالعه، ارزیابی روند تغییرات بارش و دمای متوسط حوضه آبریز رودخانه هررود، نمایانگر افزایش دمای متوسط و کاهش بارش در همه سناریوهای مورد بررسی در دوره‌های آتی در مقایسه با دوره زمانی پایه است.



- [12]. Wilby RL, Dawson CW. SDSM4- A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. User Manual. 2007;1-94
- [13]. Wilby RL, Dawson CW, Barrow EM. SDSM- A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts. *Journal of Environmental Modeling and Software*.2002; 17(2): 145-157.
- [14]. Zhu H, Jiang Z, L J, Li W, Sun C, Li L. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China?. *Advances in Atmospheric Sciences*. 2020; 37:1119–1132.
- [15]. Luo N, Guo Y, Gao Z, Chen K, Chou J. Assessment of CMIP6 and CMIP5 model performance for extreme temperature in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*.2020; 13(6):589–597.
- [16]. Yue Y, Yan D, Yue Q, Ji G, Wang. Z. Future changes in precipitation and temperature over the Yangtze River Basin in China based on CMIP6 GCMs, *Atmospheric Research*.2021; 264:251-264.
- [17]. Qin J, Su B, Tao H, Wang Y, Huang j, Jiang T. Projection of temperature and precipitation under SSPs-RCPs Scenarios over northwest China. *Frontiers of Earth Science*. 2021; 15:23–37.
- [18]. Donat GM, Lowry LA, Alexander VL, O’Gorman AP, Maher N. More extreme precipitation in the world’s dry and wet regions. *Nature and Climate change*. 2016; 6: 508–513.
- [19]. Amirabadizadeh M, Ghazali AH, Huang YF, Wayayok A. Downscaling daily precipitation and temperatures over the Langat River Basin in Malaysia: A comparison of two statistical downscaling approaches. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*.2016; 8: 120–136.
- [20]. Gebrechorkos SH, Hülsmann S, Bernhofer C. Statistically downscaled climate dataset for East Africa. *Scientific data*. 2019; 6(31): 1-8.
- [21]. Kazemi DH. Rasul G, Li J. Cheema SB. Comparative Study for ECHAM5 and SDSM in Downscaling Temperature for a Geo-Climatically Diversified Region, Pakistan. *Applied Mathematics*. 2014; 5(1): 137-143.
- [22]. Roshani A, Hamadi M. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature & precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Journal of Water and Irrigation Management*. 2022; 11(4): 669-986. [Persian]
- [23]. Mortazavifard. S.M, Mobin. M.H, Mokhtari. M. H, Ekrami. M. 2019. Evaluation of the impact of climate change on precipitation and temperature variables based on the RCP scenarios: A case study of the east of Mazandaran Province, Iran. *Journal of meteorology and atmospheric science*.2019;1(4): 351-364.
- [24]. Chen H, YuXu C, Guo S. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*.2012; 434(435):36–45.
- [25]. Ramadas M, Shaik R, Mujumdar PP. Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga– Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM. *Hydrological Processes*.2012;27(11): 1572-1589.
- [26]. Sobhani B, Eslahi M, Babaeian I. Efficiency of Statistical Downscaling Models of SDSM and LARS-WG in the Simulation of Meteorological Parameters in Lake Urmia Basin. *Physical Geography Research Quarterly*. 2016; 47(4): 499-516. [Persian]
- [27]. Goudarzi M, Salahi B, Hosseini SA. Performance Assessment of LARS-WG and SDSM Downscaling Models in Simulation of Climate Changes in Urmia Lake Basin. *Iranian journal of watershed management science*.2015;9(31): 11-23. [Persian]
- [28]. Zehtabian GR, Salajegheh A, Malekian A, Boroomand N, Azareh A. Evaluation and comparison of performance of SDSM and CLIMGEN models in simulation of climatic variables in Qazvin plain. *Desert Journal* 2016;21(2): 155-164.
- [29]. Aref MR, Alijani. B. Investigation of temperature and precipitation variations of Yazd-Ardakan basin with SDSM under the conditions of future climate change. *Journal of Arid Biome*.2018;8(1): 89-101 [Persian].
- [30]. Javaherian M, Ebrahimi H, Aminnejad B. Prediction of changes in climatic parameters using CanESM2 model based on RCP scenarios (case study): Lar dam basin. *Ain Shams Engineering Journal*.2020; 12(1):445-454.