

مقاله علمی-پژوهشی

تحلیل اثر تغییرات آب و هوایی بر دما و بارندگی در شهرکرد با استفاده از پرونداد مدل‌های گزارش ششم با تأکید بر سناریوهای توسعه پایدار

سید محمدرضا حسینی وردنجانی^۱، مجتبی خوش‌روش^{۲*}، روح‌الله فتاحی نافچی^۳، رضا نوروز ولاشدی^۴، یاور پورمحمد^۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۳۰

چکیده

توسعه روز افزون صنایع و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص دی‌اکسید کربن را به دنبال دارد که منجر به گرم شدن زمین می‌گردد. تغییر اقلیم یک نگرانی جهانی است و پیامدهای قابل توجهی بر الگوهای بارش و دما دارد. لذا هدف از این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی ایستگاه شهرکرد با استفاده از مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی CanESM5 مطابق با گزارش ششم CMIP6 است. در این راستا بر اساس داده‌های اقلیمی دما و بارش ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک فرودگاه شهرکرد در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و سناریوهای انتشار طراحی شده شامل سه سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 وضعیت جوی آتی در دو دوره‌ی بیست ساله آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده‌ی دور (۲۰۴۶-۲۰۶۶)، پیش‌بینی شد. به‌منظور کوچک مقیاس نمودن مقادیر پیش‌بینی شده، از روش ریزمقیاس نمایی آماری SDSM5.2 استفاده شد. سپس عملکرد مدل CanESM5 برای شبیه‌سازی توسط سنج‌های آماری مناسب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی CanESM5 نشان داد که برای پیش‌بینی دمای حداقل و حداکثر در مقایسه با بارندگی، خطای کمتر و دقت بالاتری وجود دارد. طبق یافته‌های پژوهش حاضر پیش‌بینی می‌شود ایستگاه مورد مطالعه در مقایسه با دوره پایه برای کلیه سناریوهای انتشار شاهد افزایش بارش آتی تا ۶/۵ درصد در سناریوهای خوش‌بینانه و کاهش بارش تا ۱۶ درصد در سناریوی بدبینانه در طول سال خواهد بود. به‌طور کلی در آینده، میانگین حداکثر دمای زمستان در سناریوی بینابینی و بدبینانه، افزایش چشمگیری نشان می‌دهد که این میزان افزایش در آینده دور در کلیه فصل‌های سال نیز به وضوح دیده می‌شود. همچنین دامنه تغییرات دمای حداکثر در آینده دور نسبت به آینده نزدیک نوسانات بیشتری را تجربه و همچنین کاهش اندکی در میانگین حداقل دمای سالانه در آینده نزدیک و افزایش آن در آینده دور اتفاق خواهد افتاد.

واژه‌های کلیدی: اقلیم، سناریوی SSP، متغیر هواشناسی، منابع آب

مقدمه

توسعه روزافزون صنایع و افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌خصوص دی‌اکسید کربن را به

دنبال دارد که منجر به گرم شدن زمین می‌گردد. از اواخر قرن نوزدهم گرم شدن زمین آغاز و انتظار می‌رود که این شرایط ادامه پیدا کند و بر وضعیت سایر اجزای چرخه اقلیمی اثرگذار و منجر به تغییر اقلیم گردد. تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت شرایط آب و هوایی گفته می‌شود. با وقوع تغییر اقلیم متغیرهای آب و هوایی مانند دما و بارش در مناطق مختلف تغییر می‌کنند (Nikkhoo Amiri et al., 2023). دمای کره زمین نسبت به دوره پیش از انقلاب صنعتی بر طبق ششمین گزارش هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) حدود یک درجه سلسیوس افزایش یافته و این افزایش دما تأثیرات منفی بر تولید محصولات کشاورزی داشته است. میانگین دمای جهانی از آغاز انقلاب صنعتی حدود ۱/۰۸ درجه سلسیوس افزایش یافته است. به‌طور هم‌زمان، تغییرات فراوانی و تغییرات شدید آب‌وهوا در بسیاری از نقاط جهان مشاهده شده است (برارخان‌پور احمدی و همکاران، ۱۴۰۲).

- ۱- دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ۲- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- *- نویسنده مسئول: (m.khoshravesh@sanru.ac.ir)
- ۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.
- ۴- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ۵- محقق دانشگاه ایالتی بویزی، دانشگاه ایالتی بویزی، آمریکا

تغییر اقلیم، علاوه بر تاثیر بر کاهش عملکرد محصولات که نتیجه تأثیرپذیری منفی زیست توده است، موجب تشدید مسئله کمبود آب نیز می‌گردد (سالاریه و همکاران، ۱۴۰۳). یکی از مهم‌ترین بخش‌های متأثر از تغییر اقلیم به دلیل وابستگی به متغیرهای اقلیمی بخش کشاورزی است؛ این امر نیاز به بهبود ظرفیت سازگاری کشاورزان و اتخاذ راهکارهای مناسب و سازگار با تغییرات آب و هوایی بوده و باعث کاهش اثرات منفی عملکرد محصولات کشاورزی می‌گردد (Tafula et al., 2025). برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در بخش‌هایی مانند کشاورزی و منابع آب از مدل‌های گردش عمومی جو استفاده می‌شود. این مدل‌ها وضوح و دقت یکسانی ندارند و کارایی آن‌ها در مناطق مختلف متفاوت است. اعتبار آن‌ها به توانایی بازتولید ویژگی‌های اقلیمی پایه و آینده بستگی دارد. از دهه ۱۹۹۰، برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده را برای درک بهتر تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی‌های دقیق‌تر ارائه کرده است (Annan and Hargreaves, 2011). در حال حاضر سری ششم پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) انتشار یافته است. مجموعه گزارش‌های ششم ارائه شده توسط گروه کاری بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع علمی در زمینه تغییرات اقلیمی، به بررسی سناریوهای تغییر اقلیمی و اثرات آن بر جوامع و محیط‌زیست می‌پردازد. گزارش ششم نسبت به گزارش پنجم کامل‌تر و علاوه بر سناریوهای RCP، سناریوهای اجتماعی و اقتصادی را نیز لحاظ کرده است، همچنین نواقص مدل‌های سری پنجم از جمله تخمین ضعف واداشت تابشی و خطای سینماتیک در گزارش ششم رفع شده است (IPCC, 2021). پنج نکته کلیدی در در ارتباط با گزارش ششم در مورد تغییرات اقلیمی شامل موارد زیر است: ۱) انسان‌ها مسئول رخداد تغییرات اقلیمی هستند و باید برای وقوع این بحران اقلیمی مورد سرزنش قرار گیرند. ۲) دمای کره زمین حداقل تا سال ۲۰۵۰ به روند افزایشی خود ادامه خواهد داد. ۳) رخدادهای حدی اقلیمی (نظیر سیل، خشکسالی، آتش و باد) افزایش خواهند یافت. ۴) زمان زیادی برای محدود کردن گرمایش کره زمین به زیر ۱/۵ درجه سانتی‌گراد وجود ندارد و ۵) در صورت اقدام فوری جوامع، همچنان می‌توان از تبعات شدید تغییر اقلیم جلوگیری کرد (سراتی تبریزی و همکاران، ۱۴۰۲).

در خصوص تغییر اقلیم بر مبنای گزارش پنجم مطالعات مختلفی در سطح جهان و کشور انجام شده است اما این مطالعات در خصوص گزارش ششم محدود است. روشنی و حمیدی (۱۴۰۰) با استفاده از مدل‌های CMIP6 اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش ایستگاه ساری را بررسی کردند. آن‌ها مدل ACCESS-CM2 را به‌عنوان مناسب‌ترین مدل انتخاب کردند و شبیه‌سازی‌ها را با سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSP) انجام دادند. نتایج نشان داد میانگین دما ۱/۱۶ تا ۴/۰۹ درجه افزایش و بارش سالانه ۲۴ تا ۳۶ درصد بیشتر خواهد شد.

چمانه‌فر و همکاران (۱۴۰۱) شاخص‌های حدی بارش و دما را در مشهد با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی کردند. آن‌ها مدل‌های ACCESS-CM2، MIROC6 و MRI-ESM2-0 را به‌کار بردند و با نرم‌افزارهای CMHyd و Rclimindex داده‌ها را مقیاس‌کاهی و شاخص‌ها را استخراج کردند. نتایج نشان داد مدل ACCESS-CM2 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی شاخص‌های حدی تاریخی دارد. میان‌آبادی و همکاران (۱۴۰۲) تغییرات بارش و دما را در کرمان با استفاده از مدل‌های اقلیمی گزارش ششم IPCC و شبیه‌سازی اصلاح آریبی بررسی کردند. بهترین مدل‌ها برای پیش‌بینی دوره ۲۰۵۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 انتخاب شدند. نتایج نشان داد افزایش دما به‌طور معنی‌دار منابع آبی کرمان را از نظر کمی و کیفی تحت تأثیر قرار می‌دهد و نیازمند مدیریت بهتر است. افشاری‌نیا و همکاران (۱۴۰۳) تغییرات اقلیمی دشت کاشان را با مدل‌های CMIP6 بررسی کردند. آن‌ها داده‌های دما و بارش هفت ایستگاه را برای دوره پایه ۱۹۸۴-۲۰۱۴ تحلیل کردند و از میانگین دو مدل IPSL-CM6A-LR و BCC-CSM2-MR برای شبیه‌سازی آینده استفاده نمودند و نتایج کاهش بارش در همه ایستگاه‌ها را پیش‌بینی کرد. حقیقی و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش و دما با استفاده از سناریوهای SSP در استان فارس پرداختند. نتایج نشان داد که مدل LARS-WG دقت مناسبی در ریزمقیاس نمای پارامترهای بارش و دمای حداکثر در این استان دارد. تغییرات دمای بیشینه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۹۰) در هر سه ایستگاه آباده، شیراز و لار و در هر سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 نشان از افزایش دمای بیشینه داشت. در مطالعه‌ای از خروجی پنج مدل گردش عمومی جو برای شبیه‌سازی اقلیم آینده حوزه Iiala در شمال اتیوپی، افزایش دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۱/۷ و ۴/۷ درجه سلسیوس بدون تغییر قابل‌توجه در بارش گزارش شد (Shiferaw et al., 2018). همچنین، ارزیابی مدل‌های CMIP6 برای حوزه رودخانه بارو تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 نشان داد که میانگین دمای سالانه حداکثر و حداقل در دوره ۲۰۳۱-۲۰۶۰ به ترتیب ۱/۴۳ و ۱/۹۶ درجه در SSP2-4.5 و ۱/۸۱ و ۳/۱۱ درجه در SSP5-8.5 افزایش می‌یابد. عملکرد مجموعه سه مدل نماینده در شبیه‌سازی اقلیم بهتر از سایر مدل‌ها بود (Gebisa et al., 2023). در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های CMIP6، روند آب و هوایی حوزه رامیس در مسیرهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی شد. نتایج نشان داد که کاهش بارش در بهار و زمستان طی دوره‌های ۲۰۳۰-۲۰۶۰ و ۲۰۹۰-۲۰۶۱ می‌تواند به کمبود آب و تأثیر بر کشاورزی منجر شود. کاهش بارش سالانه و افزایش دماهای حداقل و حداکثر تحت هر دو سناریو مشاهده شد. همچنین، شاخص ناهنجاری بارش (RAI) کاهش قابل توجهی را

شهرستان شهرکرد که یکی از شهرستان‌های استان چهارمحال و بختیاری به شمار می‌رود، با مساحتی نزدیک به ۱۴۰۰ کیلومتر مربع، معادل حدود ۹ درصد از کل مساحت استان چهارمحال و بختیاری را به خود اختصاص داده است. این شهرستان در موقعیت جغرافیایی بین طول جغرافیایی ۴۹ درجه و ۲۲ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۴۹ دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۲ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۳۱ دقیقه قرار دارد. از نظر وضعیت توپوگرافی، این شهرستان در بخش شرقی رشته‌کوه زاگرس قرار گرفته و در نزدیکی گسل زاگرس واقع است. یکی از مهم‌ترین ارتفاعات شهرستان، کوه جهان‌بین است. بین رشته‌کوه‌های این منطقه دشت‌های وسیعی پراکنده شده‌اند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به دشت شهرکرد و دشت هفشجان اشاره کرد. شهرکرد بر مبنای نمایه آمبرژه دارای آب و هوای خشک سرد و بر مبنای نمایه دومارتن دارای اقلیم نیمه خشک است (Anonymous 2024). محدوده مطالعاتی و مشخصات ایستگاه مورد بررسی در شکل (۱) و جدول (۱) ذکر شده است.

برای ۲۰۷۱-۲۰۴۳ پیش‌بینی کرده که احتمال وقوع خشکسالی را نشان می‌دهد (Tadase, 2024). با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین بخش‌های متاثر از تغییر اقلیم به دلیل وابستگی به متغیرهای اقلیمی بخش کشاورزی می‌باشد، لذا پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در این حوزه اهمیت زیادی دارد و منجر به برنامه‌ریزی مؤثر و تصمیم‌گیری استراتژیک، امکان‌شبیبه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای مختلف آب‌وهوا را فراهم و نهایتاً در انتخاب تصمیم صحیح و آگاهانه به متولیان امر، کشاورزان و بهره‌برداران این حوزه کمک می‌نماید. این پژوهش به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در شهرستان شهرکرد از توابع استان چهارمحال و بختیاری با بهره‌گیری از سه سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5، برای دو دوره‌ی بیست ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۴) و آینده‌ی دور (۲۰۶۵-۲۰۴۶) می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

جدول ۱- ویژگی‌های ایستگاه معرف منطقه مطالعاتی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	اقلیم	ارتفاع از سطح دریا
فرودگاه شهرکرد	۵۰/۸۴	۳۲/۲۹	آمبرژه: خشک سرد دومارتن: نیمه خشک	۲۰۵۰



شکل ۱- محدوده و منطقه مطالعاتی

بسط و توسعه یافت. این آزمون یک تست ناپارامتریک است که برای تعیین اینکه آیا یک دنباله زمانی روند صعودی یا نزولی یکنواخت دارد استفاده می‌گردد. همچنین نیازی به اینکه داده‌ها به‌طور نرمال یا خطی توزیع شده باشند، نیست. ولی مستلزم آن است که هیچ خود همبستگی بین داده‌ها وجود نداشته باشد. فرض صفر آزمون من کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها است (Kendall, 1970).

تحلیل روند (آزمون من - کندال)

در سری‌های زمانی به ویژه سری‌های زمانی داده‌های دارای ماهیت تصادفی نیاز به تحلیل روند می‌باشد. یکی از روش‌های ناپارامتری و کاربردی و روش من-کندال^۱ است که در مطالعات مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. روش من کندال ابتدا توسط Man در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط Kendall در سال ۱۹۷۰

1- Mann-Kendal

گزارش ششم CMIP6

برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از مدل‌های گردش عمومی جو^۱ (GCM) استفاده می‌شود که دقت آن‌ها به توانایی بازتولید ویژگی‌های اقلیمی پایه و آینده وابسته است. برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا از دهه ۱۹۹۰ پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) را برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی عدم قطعیت‌ها ارائه کرده است (Annan and Hargreaves, 2011). این گزارش‌ها به تحلیل مخاطرات و ارائه راهکارهای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی شامل افزایش دما، تغییرات بارش و سطح دریا می‌پردازند. سناریوهای جدید SSP بر اساس عوامل اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی تغییرات آینده را مدل‌سازی می‌کنند. پرونداد مدل‌های سری ششم CMIP6 با لایه‌های بیشتر نسبت به سری پنجم منتشر شده و شامل پنج رویکرد توسعه پایدار، سیاست‌های بینابین، رقابت منطقه‌ای، نابرابری و توسعه سوخت‌های فسیلی است (O'Neill et al., 2017).

مدل CanESM5

در پژوهش حاضر داده‌های مدل پیش‌بینی کننده CanESM5 بر اساس سناریوهای طراحی شده در دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۵ برای پیش‌بینی وضعیت جو طی دوره‌های آبی از سایت تغییر اقلیم کانادا مورد استفاده قرار گرفت. مدل CanESM5 یکی از مدل‌های پیش‌بینی جوی مطرح در جهان است و توسط سازمان هواشناسی کانادا توسعه داده شده است (Jeong et al., 2023). این مدل قابلیت پیش‌بینی تغییرات آب و هوایی در طولانی مدت را نیز داراست. به منظور بازتولید داده‌ها از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM5.2 استفاده شد.

مدل SDSM

مدل SDSM (Statistical Downscaling Model) یک مدل ریزمقیاس کننده آماری است که قابلیت توسعه سریع و کم هزینه داده‌های ریزمقیاس شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالانه را دارا است (جهانگیر و همکاران، ۱۳۹۷). اگر چه SDSM برای مدل‌های گزارش ششم آپدیت نشده‌اند، اما با انجام عملیاتی امکان استفاده از این ریزمقیاس برای مدل‌های گزارش ششم وجود دارد. این مدل‌ها روابط آماری بین رفتار متغیرهای مقیاس بزرگ (پیش‌بینی شونده) و متغیرهای منطقه‌ای (پیش‌بینی کننده) را بر اساس روش رگرسیون چندگانه تعیین می‌کند. این روابط با استفاده از داده‌های ایستگاه شاهد و خروجی مدل گردش عمومی جو در یک دوره زمانی مشابه تولید شد.

مراحل انجام ریزمقیاس-سازی با مدل SDSM5.2 در این

مطالعه شامل مراحل زیر است:

۱. کنترل کیفیت و تبدیل داده‌ها

در این مرحله، داده‌های اقلیمی خام (دما و بارندگی) از منابع مختلف جمع‌آوری می‌شوند. سپس این داده‌ها از نظر کیفیت بررسی و تصحیح می‌شوند. این مرحله شامل شناسایی و حذف داده‌های ناقص یا نادرست و تبدیل واحدهای اندازه‌گیری به واحدهای استاندارد است.

۲. انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده غالب

در این مرحله، متغیرهای پیش‌بینی کننده‌ای که بیشترین تأثیر را بر روی متغیرهای هدف (دما و بارندگی) دارند، شناسایی می‌شوند.

۳. واسنجی مدل

پس از انتخاب متغیرها، مدل واسنجی می‌شود. این به معنای تنظیم پارامترهای مدل برای بهینه‌سازی پیش‌بینی‌های آن بر اساس داده‌های تاریخی است. این مرحله شامل مقایسه نتایج مدل با داده‌های واقعی و تنظیم پارامترها برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها می‌باشد.

۴. تولید داده‌های تاریخی و صحت‌سنجی مدل

در این مرحله، داده‌های تاریخی متغیرهای هدف تولید و مدل برای صحت‌سنجی نتایج خود مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این مرحله شامل مقایسه نتایج مدل با داده‌های واقعی در دوره‌های زمانی مختلف است تا اطمینان حاصل شود که مدل به درستی کار می‌کند. در این مرحله مدل ارزیابی می‌شود.

۵. آنالیز داده‌ها

پس از صحت‌سنجی مدل، داده‌های تولید شده مورد آنالیز قرار می‌گیرند. این آنالیز می‌تواند شامل بررسی روندها، الگوها و تغییرات در داده‌های اقلیمی باشد، همچنین می‌توان از این داده‌ها برای شبیه‌سازی سناریوهای مختلف تغییرات اقلیمی استفاده کرد.

۶. تولید سناریوهای اقلیمی آینده

در نهایت، با استفاده از مدل و داده‌های به‌دست‌آمده، سناریوهای اقلیمی آینده تولید می‌شوند. این سناریوها می‌توانند شامل پیش‌بینی‌های دما و بارندگی در دوره‌های مختلف آینده باشند (امیرآبادی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۸؛ شاهی‌نژاد و همکاران، ۱۴۰۰؛ فولادی نصرآباد و همکاران، ۱۴۰۳).

معیارهای ارزیابی عملکرد

به‌منظور ارزیابی و بررسی عملکرد مدل، شاخص‌های آماری میانگین قدرمطلق خطا (MAD)، جذر میانگین مربع خطا (RMSE)، درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) مطابق با روابط (۱) تا (۴) استفاده شده است (Valipour et al., 2017).

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)}{n} \quad (1)$$

روی دو متغیر دما و بارش به تحلیل آن‌ها پرداخته شد (شکل‌های ۲ تا ۴). با بررسی نمودار حاصل از تغییرات سالانه داده‌های دمای حداکثر، توسط ضریب آزمون ناپارامتری من-کندال از ابتدای دوره ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۱۴ روند معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای میانگین حداکثر دمای ثبت شده مشاهده نمی‌شود. ولی در سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۳ و ۲۰۰۹ تنها تغییرات ناگهانی در میانگین رخ داده است (شکل ۳). با بررسی داده‌های میانگین حداقل دماهای ثبت شده توسط آزمون ناپارامتری من-کندال از ابتدای دوره ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۰۶ روند معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده نمی‌شود. ولی در سال‌های ۲۰۰۷ تا پایان دوره آماری پایه ۲۰۱۴، میانگین حداقل دمای سالانه روندی کاهشی داشته است (شکل ۴). با بررسی داده‌های بارش توسط آزمون ترسیمی ناپارامتری من-کندال از ابتدای دوره ۱۹۹۵ تا سال ۲۰۰۵ روند معنی‌داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای مجموع سالانه بارش‌های اتفاق افتاده مشاهده نمی‌شود. ولی از ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ بارش روند مثبتی را تجربه کرده است و تا پایان دوره پایه در سال ۲۰۱۴ بدون روند بوده است و تنها تغییرات ناگهانی در میانگین رخ داده است (شکل ۲).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (2)$$

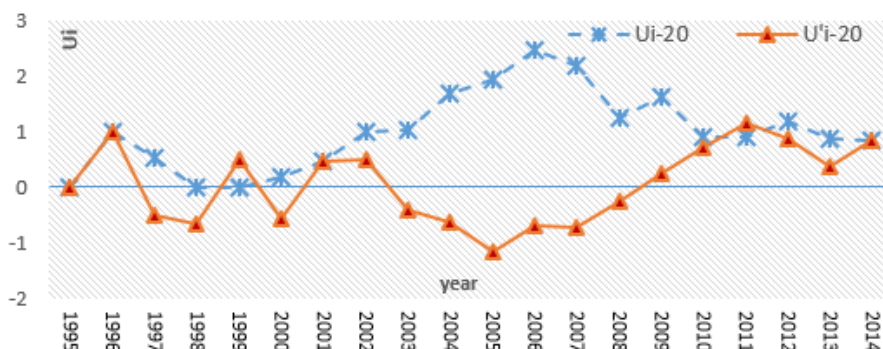
$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^n (A_t - A_{mean})^2} \quad (3)$$

$$Corr(A_t \& F_t) = \frac{Cov(A_t \& F_t)}{\sigma_A \sigma_F} \quad (4)$$

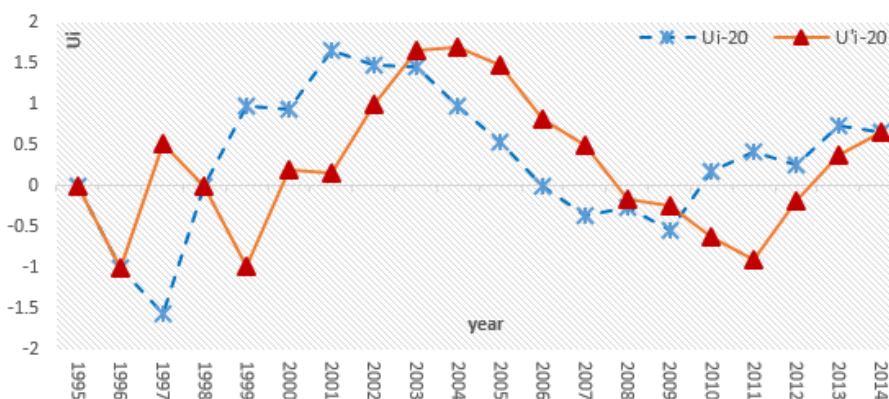
که در این روابط At نشان دهنده مقدار داده مشاهداتی، Ft نشان دهنده مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل برای دوره پایه، اندیس t نشان دهنده روزهای سال و n نشان‌دهنده تعداد داده‌ها است. هر چه مقادیر خطاهای مذکور کوچکتر و ضریب همبستگی و نش-ساتکلیف به عدد یک نزدیک‌تر باشند نشان‌دهنده درستی پیش‌بینی‌های مدل است.

نتایج و بحث

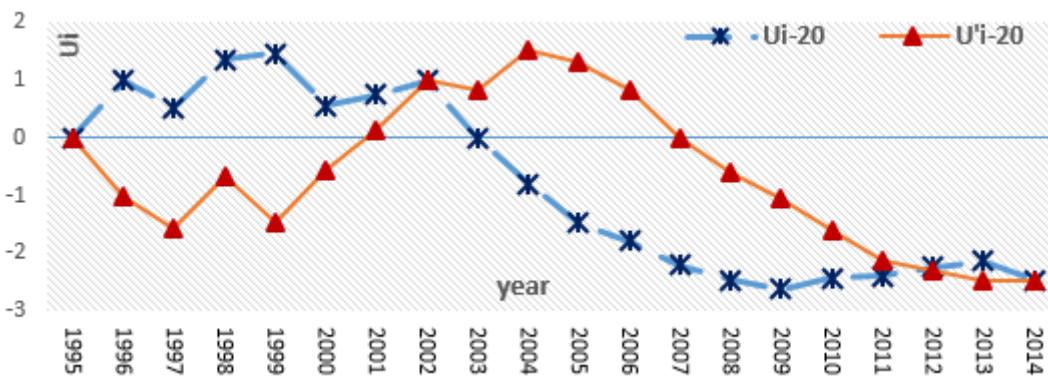
با جمع‌آوری سری داده‌های مشاهداتی روزانه دما و بارش در دوره پایه ۲۰ ساله (از ابتدای ژانویه سال ۱۹۹۵ تا پایان دسامبر سال ۲۰۱۴) و بررسی مشخصات و روند آن‌ها و انجام آزمون‌های آماری بر



شکل ۲- روند تغییرات مجموع بارش سالانه در دوره پایه به روش تحلیل ناپارامتری من-کندال



شکل ۳- روند تغییرات میانگین حداکثر دمای سالانه در دوره پایه به روش تحلیل ناپارامتری من-کندال



شکل ۴- روند تغییرات میانگین حداقل دمای سالانه در دوره پایه به روش تحلیل ناپارامتری من-کندال

پیش‌بینی اقلیمی منطقه در دوره‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۴ و ۲۰۴۶-۲۰۶۵ مناسب است. بر اساس شکل‌های ۵ تا ۸ نزدیکی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل به خوبی توانسته است روند تغییرات میانگین ماهانه را پیش‌بینی نماید.

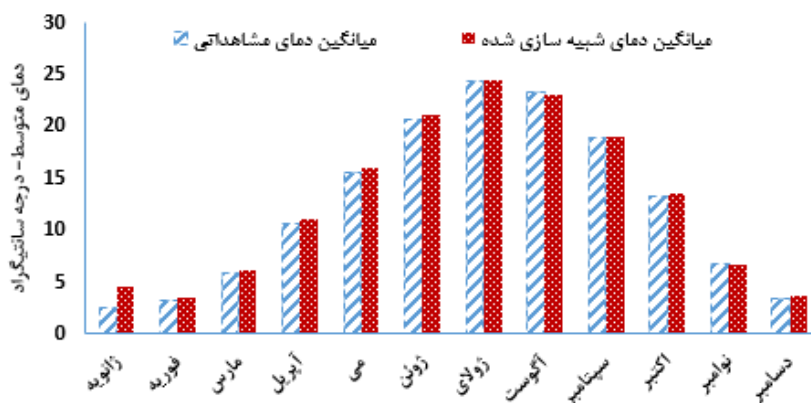
واسنجی مدل و شبیه‌سازی داده‌ها

در دوره پایه با استفاده از مناسب‌ترین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده ورودی مدل که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی داشتند واسنجی انجام شده و مقادیر بارش و دما دوباره برای دوره پایه تولید یا بازسازی می‌شوند. در این مرحله نرمال‌سازی داده‌های بارندگی کمک می‌کند تا داده‌ها را در مقیاس مشابهی قرار داده و تحلیل‌های آماری دقیق‌تری انجام شود. با توجه به اینکه داده‌های بارش نرمال نبوده و بارندگی یک پارامتری شرطی است (به معنی اینکه بارندگی به برخی پارامترهای میانه دیگری مانند طول دوره خشکی و ... نیز وابسته است) و در واقع می‌توان گفت متغیرهای پیش‌بینی‌کننده مدل بطور مستقل و مستقیم قادر به شبیه‌سازی بارش در دوره پایه نخواهند بود.

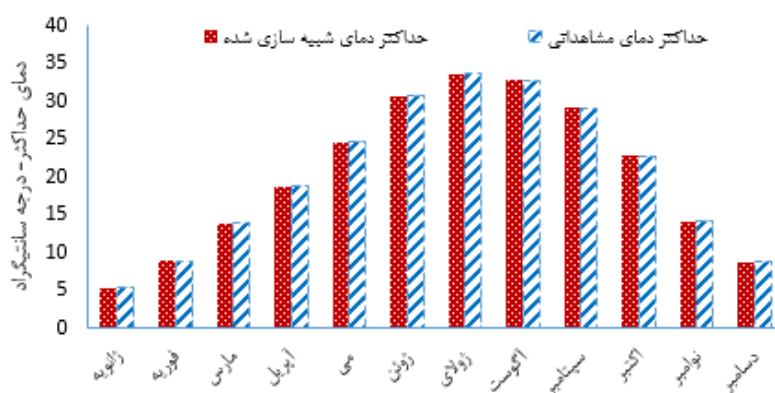
در مراحل بعدی پژوهش، با استفاده از بانک‌های اطلاعاتی گزارش ششم، یک مدل مناسب گردش عمومی جو انتخاب و سری‌های زمانی تولیدشده توسط مدل‌های مختلف دریافت شد. داده‌های اقلیمی مدل CanESM5 و برخی مدل‌های معتبر از گزارش‌های پنجم و ششم برای استان چهارمحال و بختیاری از سایت کانادا دریافت گردید. در مرحله نخست، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دوره پایه با داده‌های تاریخی مدل CanESM5 و ریزمقیاس‌نمایی آماری در محیط SDSM5.2 انجام شد تا ارزیابی مدل و اصلاحات آماری برای بهبود دقت صورت گیرد. داده‌های هدف کنترل کیفی شده و داده‌های گمشده و پرت اصلاح شدند. سپس توزیع غیرنرمال داده‌ها مانند بارش بررسی و با توابع ریاضی مناسب تغییر مقیاس داده‌ها انجام شد. در این پژوهش، برای بارش از تابع ریشه چهارم استفاده گردید. متغیرهای پیش‌بینی‌کننده با بررسی همبستگی انتخاب و برای واسنجی آماده‌سازی شدند. حداقل دو تا سه متغیر با P-value کوچک‌تر و r_{partial} بزرگ‌تر انتخاب و داده‌های مدل واسنجی شدند. داده‌ها در دوره پایه ارزیابی و برای پیش‌بینی تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. نزدیکی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان داد که مدل CanESM5 برای



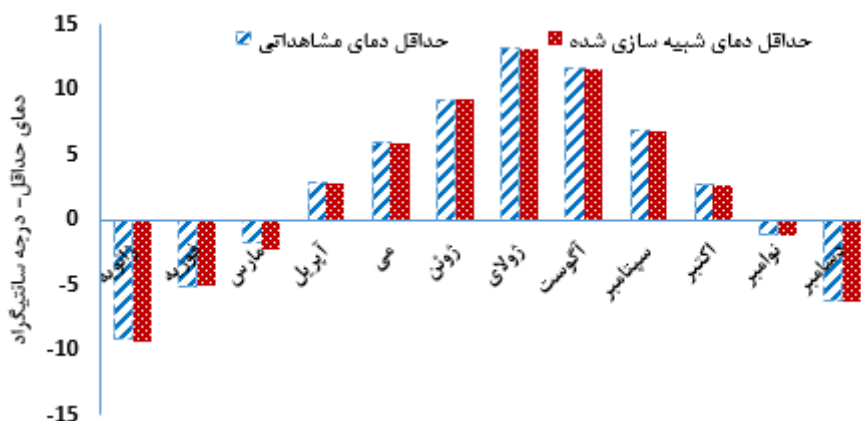
شکل ۵- میانگین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مدل CanESM5 در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۴



شکل ۶- متوسط دمای ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل CanESM5 در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۴



شکل ۷- میانگین حداکثر دمای ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل CanESM5 در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۴



شکل ۸- میانگین حداقل دمای ماهانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مدل CanESM5 در دوره آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۴

یافت. آنالیز آماری شبیه‌سازی مدل برای پارامترهای بارندگی و دما در جدول (۲) بیان شده است.

بنابراین ابتدا با تبدیل داده‌ها توسط توابع موجود که در این پژوهش از ریشه چهارم بارندگی برای استفاده در مدل بهره گرفته شد و سپس چندین بار با ترکیب‌های مختلف از متغیرها و هر بار با واسنجی و تولید داده‌های بارش به بهترین همبستگی می‌توان دست

پیش‌بینی سناریوهای آینده بارش

نتایج چشم‌انداز مقادیر بارش داده‌های مشاهداتی ایستگاه بروجن در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و داده‌های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در شکل‌های ۹ تا ۱۱ نشان داده شده است. با توجه به فراز و فرودهای نمودار برای سناریوی خوش-بینانه می‌توان گفت روند تغییرات ماهانه مجموع بارش به خوبی پیش‌بینی شده است. تغییرات بارندگی در فصل خشک سال در آینده نزدیک نسبت به دوره پایه ابتدا کاهشی و در آینده دور روند افزایشی و در اغلب ماه‌های فصل مرطوب، تغییرات بارندگی بصورت کاهشی خواهد بود. در مقایسه نمودارهای سناریوهای انتشار شاهد افزایش بارش سالانه آبی در سناریوهای خوش بینانه و بینابینی و کاهش بارش در سناریو بدبینانه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۹ تا ۱۱).

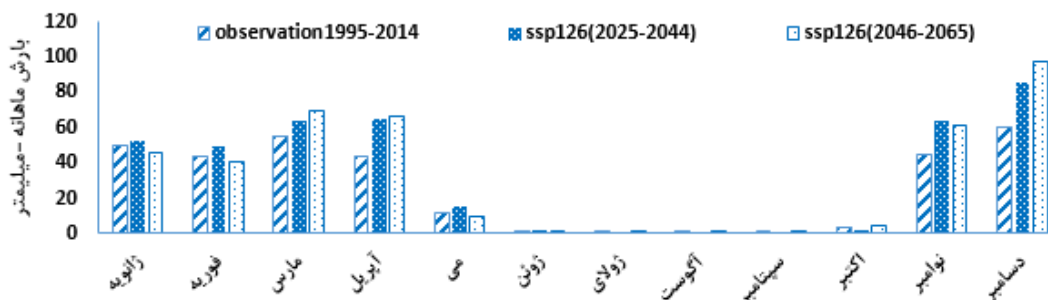
دمای حداکثر

نتایج چشم‌انداز مقادیر دمای حداکثر داده‌های مشاهداتی ایستگاه بروجن در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و داده‌های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در شکل‌های ۱۲ تا ۱۴ نشان داده شده است. با بررسی تغییرات نمودار در طول دوره پایه، آینده نزدیک و آینده دور، برای کلیه سناریوهای انتشار، می‌توان گفت با گذر زمان، روند تغییرات دمای حداکثر در ماه‌های مرطوب سال کاهشی بوده و در ماه‌های خشک روند افزایشی خواهد داشت (شکل‌های ۱۲ تا ۱۴).

جدول ۲- ارزیابی خطای شبیه‌سازی مجموع بارش، میانگین و حداکثر و حداقل دمای داده‌های تاریخی مدل CanESM5 در دوره پایه

شاخص	بارش	حداکثر دما	حداقل دما
MAD	۶/۱	۰/۰۲	۰/۱۱
RMSE	۹/۱	۰/۰۳	۰/۱۷
NS	۰/۸۵	۰/۹۹	۰/۹۹
R ²	۰/۹۱	۰/۹۹	۰/۹۹

برای افزایش همبستگی بین مدل و داده‌های واقعی در SDSM، می‌توان از تکنیک‌های زیر استفاده نمود: تنظیم پارامترهای مدل شامل تغییر در روش‌های آماری یا بهینه‌سازی پارامترها، استفاده از مجموعه داده‌های بزرگ‌تر و متنوع‌تر برای بهبود دقت مدل، تجزیه و تحلیل حساسیت شامل بررسی متغیرهایی با بیشترین تأثیر بر نتایج مدل و تغییر تنظیمات مدل بر اساس آن‌ها، اعتبارسنجی مدل با استفاده از داده‌های مستقل، بهینه‌سازی روش‌های آماری مانند رگرسیون چندگانه، بررسی فرضیات مدل و در صورت نیاز تصحیح آن‌ها، تجزیه و تحلیل خطا و شناسایی و اصلاح عوامل مؤثر بر آن‌ها. مقادیر ارزیابی عملکرد مدل مطابق با جدول (۲) نشان می‌دهد که مدل CanESM5 دقت مناسبی در شبیه‌سازی پارامترهای بارش و دمای روزانه در ایستگاه مورد مطالعه دارد و در مقیاس ماهانه پیش‌بینی‌ها با دقت بالایی صورت گرفته است. همچنین با توجه به شکل‌های ۶ تا ۸ در مقایسه مقادیر متوسط ماهانه برای حداقل و حداکثر دما، اختلاف بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ناچیز است و مدل CanESM5 دقت بالایی در شبیه‌سازی پارامترهای دما در مقیاس روزانه نسبت به بارندگی داشته است.



شکل ۹- سناریوی انتشار خوش‌بینانه SSP1-2.6 بارش برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده‌ی دور (۲۰۶۵-۲۰۸۵) (۲۰۲۵-۲۰۴۵)

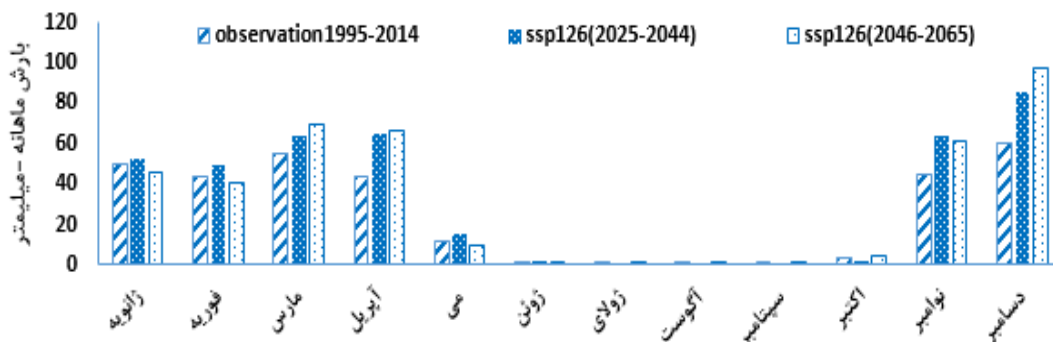
بروجن در دوره پایه ۱۹۹۵-۲۰۱۴ و داده‌های خروجی مدل CanESM5 تحت سناریوهای خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی

دمای حداقل

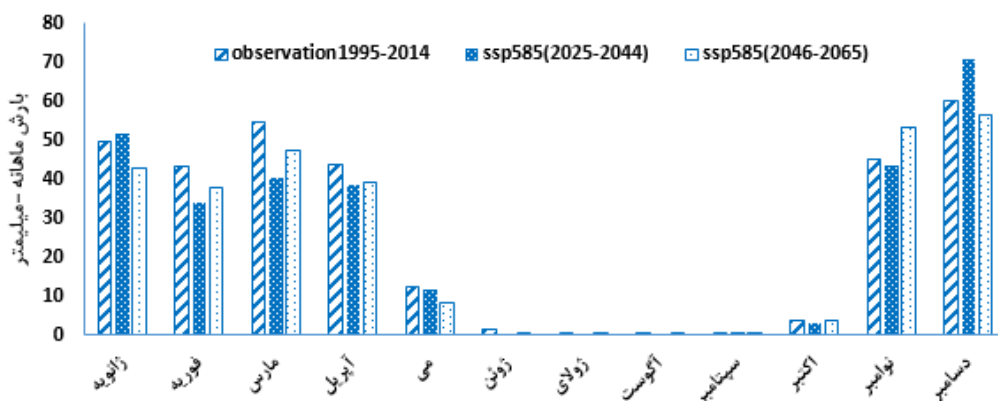
نتایج چشم‌انداز مقادیر دمای حداقل داده‌های مشاهداتی ایستگاه

حداقل دمای ماهانه کاهش خواهد یافت و از ماه ژولای تا دسامبر و در ماه های خشک نسبت به دوره پایه افزایشی خواهد بود. بنابراین دامنه اختلاف دمای حداقل در طول سال در آینده ی این ایستگاه بیشتر است.

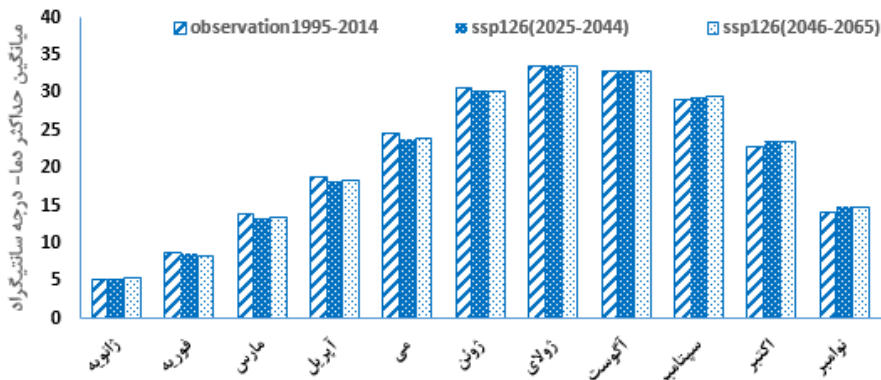
میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در شکل های ۱۵ تا ۱۷ نشان داده شده است. با بررسی نمودارهای ۱۵ تا ۱۷ در طول دوره پایه و پیش بینی شده در دوره آینده نزدیک و آینده دور، تغییرات حداقل دمای ثبت شده برای کلیه سناریوهای انتشار، می توان گفت با گذر زمان در ماه های سرد سال (از ژانویه تا ژوئن) مقادیر میانگین



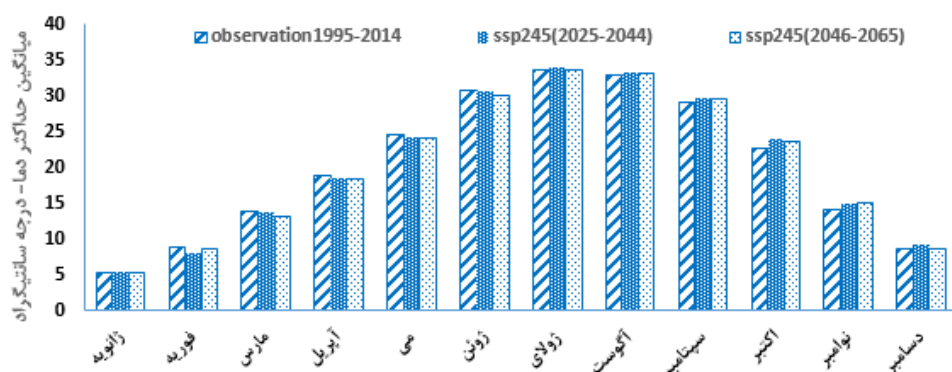
شکل ۱۰- سناریوی انتشار بینابینی SSP2-4-5 بارش برای دو دوره ی ۲۰ ساله در آینده ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده ی دور (۲۰۴۶-۲۰۶۵)



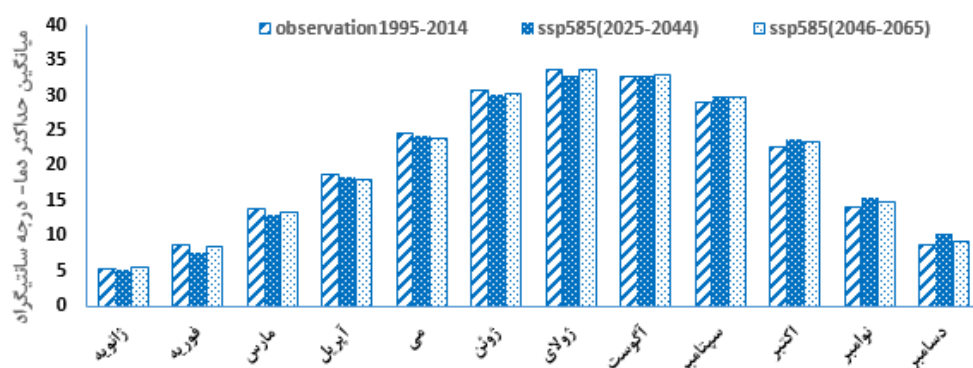
شکل ۱۱- سناریوی انتشار بدبینانه SSP5-8-5 بارش برای دو دوره ی ۲۰ ساله در آینده ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده ی دور (۲۰۴۶-۲۰۶۵)



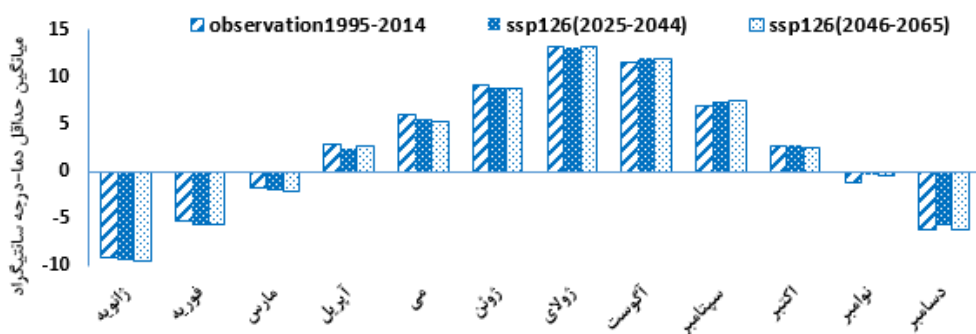
شکل ۱۲- سناریوی انتشار خوش بینانه SSP1-2-6 دمای حداکثر برای دو دوره ی ۲۰ ساله در آینده ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده ی دور (۲۰۴۶-۲۰۶۵)



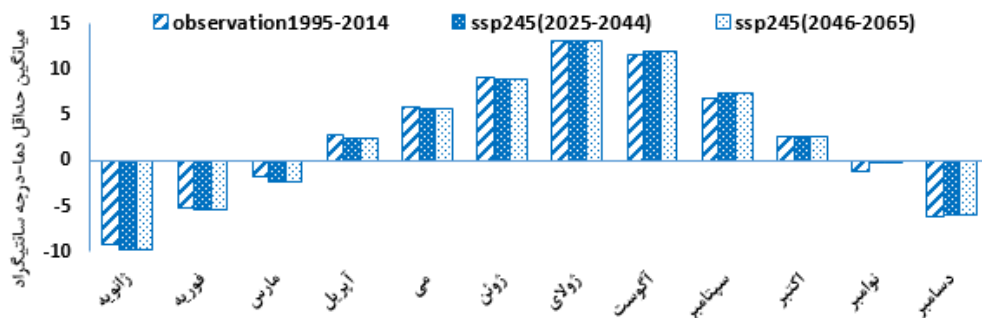
شکل ۱۳- سناریوی انتشار بینابینی SSP2-4-5 دمای حداکثر برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۴۶)



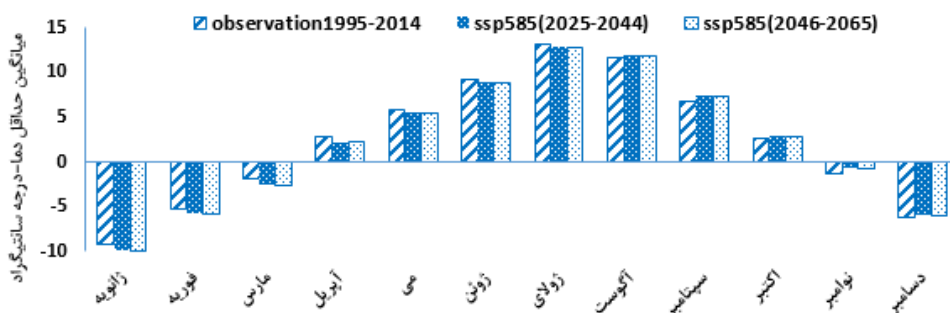
شکل ۱۴- سناریوی انتشار بدبینانه SSP5-8-5 دمای حداکثر برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۴۶)



شکل ۱۵- سناریوی انتشار خوش بینانه SSP1-2-6 دمای حداقل برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۴) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۴۶)



شکل ۱۶- سناریوی انتشار بینایی SSP2-4-5 دمای حداقل برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۴) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۹۶)



شکل ۱۷- سناریوی انتشار بدبینانه SSP5-8-5 دمای حداقل برای دو دوره ۲۰ ساله در آینده نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۴) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۹۶)

مقدار میانگین حداکثر دما بیشترین میزان کاهش را در ماه فوریه و مارس و بیشترین میزان افزایش را در ماه نوامبر و دسامبر تجربه خواهد نمود. شکل ۱۸ تغییرات سالانه میانگین دمای حداکثر را برای سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده نزدیک و آینده دور نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به دست آمده در شبیه‌سازی حداکثر دما بر مبنای سناریوی انتشار SSP5-8.5 در ایستگاه شهرکرد بیشترین میزان کاهش در میانگین حداکثر دمای ماهانه در دوره آینده دور مربوط به ماه آوریل و می و بیشترین میزان افزایش در ماه‌های کم بارش از قبیل اکتبر و نوامبر پیش‌بینی شده است. همچنین در آینده نزدیک



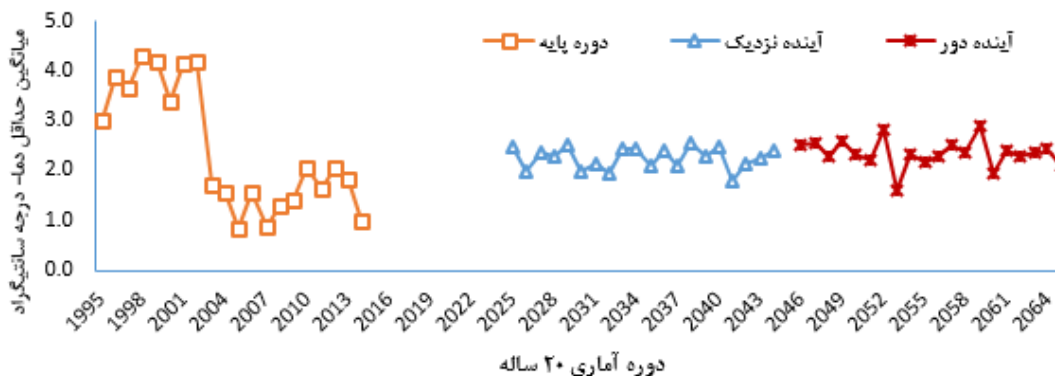
شکل ۱۸- تغییرات سالانه میانگین دمای حداکثر در دوره‌های زمانی مورد مطالعه برای سناریوی منتخب SSP5-8.5

انتهای دوره آینده نزدیک (سال ۲۰۴۴) ابتدا کاهش یافته و به دمای ۲/۲۵ درجه سانتی‌گراد رسیده است و سپس تا انتهای دوره آینده دور (سال ۲۰۶۵) به صورت صعودی بوده و با مقداری افزایش تا ۲/۳۴

با توجه به شیب نمودار حاصل از نتایج بدست آمده در شبیه‌سازی حداقل دمای روزانه بر مبنای سناریوی انتشار SSP5-8.5 در ایستگاه شهرکرد مقدار میانگین حداقل دمای سالانه با عبور از دوره پایه تا

ماه ژانویه تا مارس رخ خواهد داد. شکل ۱۹ تغییرات سالانه میانگین دمای حداقل را برای سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۴ و آینده دور ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ نشان می‌دهد.

درجه سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. همچنین در آینده با در نظر گرفتن شرایط بدینانه، بیشترین میزان افزایش در میانگین حداقل دمای ماهانه در ماه‌های سپتامبر و نوامبر و بیشترین میزان کاهش در



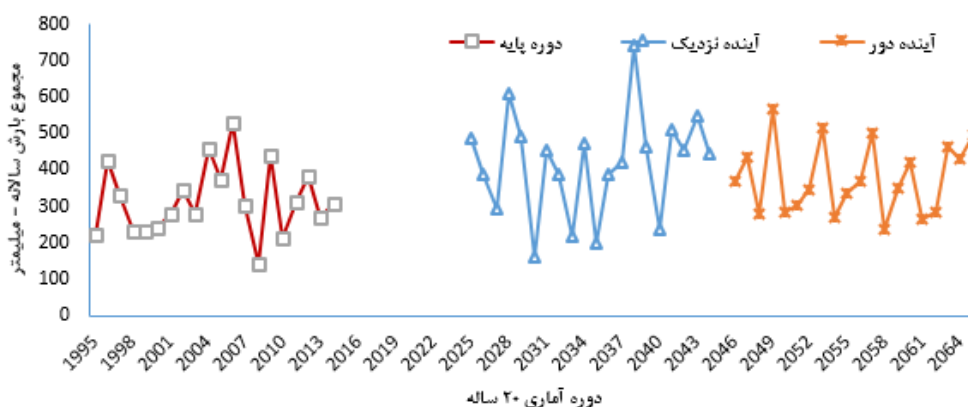
شکل ۱۹- تغییرات سالانه میانگین دمای حداقل در دوره‌های زمانی مورد مطالعه برای سناریوی منتخب SSP5-8.5

بدینانه عمدتاً شاهد کاهش بارندگی فصلی برای زمستان، بهار و تابستان بوده و افزایش اندک بارندگی را برای پاییز خواهد داشت (شکل ۲۱).

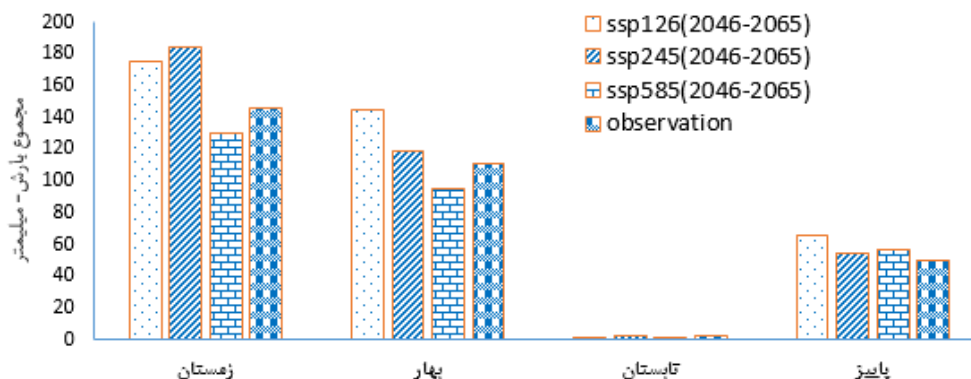
اعمال سناریوهای انتشار برای پیش‌بینی متغیر بارندگی با بررسی در مقیاس فصلی مشاهده می‌شود که برای دو سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 و سناریوی بینابینی SSP2-4.5 مقادیر میانگین فصلی این پارامتر در بخش شبیه‌سازی شده در هر دو دوره آتی توسط مدل، برای فصول بهار، پاییز و زمستان بیش از مقادیر مشاهداتی در دوره پایه و برای تابستان نزدیک به میانگین مقادیر مشاهداتی دوره پایه پیش‌بینی شده است. با وجودی که سناریوی انتشار بدینانه SSP5-8.5 مقادیر مجموع بارش فصلی را در هر دو افق آتی کمتر از بارش دوره پایه پیش‌بینی نموده است که نشان از وجود فرایند تغییر اقلیم در ایستگاه سینوپتیک شهرکرد است.

با توجه به نتایج بدست آمده برای ایستگاه شهرکرد در آینده نزدیک ۲۰۲۵ تا ۲۰۴۴ در دو سناریوی انتخابی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 روند تغییرات مجموع بارش سالانه از ابتدا تا انتهای دوره بصورت کاهشی بوده و در سناریوی SSP2-4.5 تغییرات مجموع بارندگی سالانه بصورت افزایشی پیش‌بینی شده است (شکل ۲۰).

همچنین در این سناریو با مقایسه مقادیر میانگین سالانه داده‌های دوره پایه با نتایج شبیه‌سازی شده متناظر آن‌ها در دوره آینده دور و نزدیک، میزان مجموع بارندگی سالانه برای دو دوره زمانی آتی مورد مطالعه تا ۶ درصد کاهش برای شرایط بدینانه در آینده نزدیک و تا ۸ درصد کاهش در شرایط بدینانه‌ی آینده دور پیش‌بینی شده است (شکل ۲۱). پیش‌بینی می‌شود ایستگاه مورد مطالعه بیشترین میزان کاهش بارندگی را در ماه‌های فوریه و مارس تجربه نماید. پیش‌بینی‌های مدل نشان می‌دهد ایستگاه شهرکرد در سناریوی



شکل ۲۰- تغییرات سالانه مجموع بارش در دوره‌های زمانی مورد مطالعه برای سناریوی منتخب SSP5-8.5



شکل ۲۱- تغییرات میانگین بارش فصلی برای سناریوهای انتشار منتخب در آینده

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم، یک نگرانی جهانی، پیامدهای قابل توجهی بر الگوهای بارش و دما دارد. انتخاب مدل‌های گردش عمومی (GCM) به دلیل محدودیت‌های محاسباتی و عدم قطعیت‌های اساسی حیاتی است. در این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در شهرکرد با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی کننده CanESM5 بر اساس سناریوهای طراحی شده برای پیش‌بینی وضعیت جو از سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 برای دو دوره بیست ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۵-۲۰۴۵) و آینده‌ی دور (۲۰۴۶-۲۰۶۶) استفاده شد. ابتدا به بررسی داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک فرودگاه شهرکرد طی بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۵ پرداخته شد. به منظور بازتولید داده‌ها از روش ریزمقیاس نمایی آماری SDSM5.2 استفاده شد. نتایج نشان داد در ایستگاه مورد مطالعه کمترین میزان افزایش بارش را در ماه‌های ژوئیه تا اگوست و بیشترین میزان افزایش را در ماه نوامبر و دسامبر تجربه نماید. طبق یافته‌های پژوهش حاضر با توجه به سناریوهای انتشار خوشبینانه در آینده نزدیک و دور، میانگین بیست ساله مجموع بارندگی سالانه بیشتر از سناریوی انتشار بدبینانه پیش‌بینی خواهد شد. بنابراین ایستگاه مطالعاتی با گذر از دوره پایه و در حالت بدبینانه با کاهش مجموع بارندگی سالانه و در انتهای دوره آینده نزدیک تا پایان دوره آینده دور مواجه خواهد بود. همچنین این ایستگاه در حالت خوش‌بینانه کمترین میزان افزایش بارش را در ماه‌های ژوئیه تا اگوست و بیشترین میزان افزایش را در ماه نوامبر و دسامبر و پس از آن در آوریل و مارس تجربه می‌نماید و در حالت بدبینانه در کلیه ماه‌های سال بجز نوامبر و دسامبر شاهد کاهش بارندگی خواهد بود و بیشترین میزان کاهش در ریزش بارندگی در ماه‌های ژانویه تا می رخ خواهد داد. در حالت کلی و مقیاس فصلی نیز می‌توان گفت در انتهای دوره پیش‌بینی آتی، سناریوی خوش‌بینانه

نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام شده در داخل کشور همخوانی دارد. زارعیان (۱۴۰۱) به اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 پرداخت. در این مطالعه از روش وزن‌دهی بر اساس شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE) برای ترکیب این مدل‌ها، استفاده شد. پس از وزن‌دهی مدل‌ها، مقدار تغییرات ماهانه دما و بارش در هر ماه بر اساس سناریوهای انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 محاسبه شده و با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG، سری زمانی روزانه داده‌های دما و بارش ایستگاه‌های هواشناسی مختلف، استخراج شد. نتایج نشان داد که مدل‌های CanESM5 و BCC-CSM2-MR به ترتیب بیشترین توانایی را در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در تمامی ایستگاه‌های مختلف هواشناسی دارا هستند. الماسی و همکاران (۱۴۰۳) به پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم پرداختند. آن‌ها از سه مدل Canesm5، MRI-ESM2-0، MIROC6 و MIROC6 استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل Canesm5 و MIROC6 در پیش‌نگری آینده بارندگی عملکرد بهتری دارند. ملکی‌مرشت و همکاران (۱۴۰۳) به پیش‌نگری دمای بیشینه دوره‌های آتی در شمال غرب ایران براساس برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6 پرداختند. آن‌ها از داده‌های متغیر دمای حداکثر ۱۲ ایستگاه منتخب شمال غرب ایران طی دوره آماری ۲۰۱۴-۱۹۸۵ از سازمان هواشناسی تحت دو سناریوی متوسط (SSP 2-4.5) و بدبینانه (SSP 5-8.5) و مدل‌های CanEsm5 و MPI-ESMI-2HR در نرم‌افزار SDSM6.1 شبیه‌سازی و برای ۳۰ سال آتی پیش‌بینی استفاده نمودند. نتایج مدل‌سازی دمای حداکثر نشان داد که مدل CanESM5 در مقایسه با مدل MPI-ESMI-2HR در پیش‌بینی دمای حداکثر خطای کمتر و دقت بیشتری دارد.

- سالاریه، پ.، خوش روش، م.، نوروز ولاشیدی، ر. و کیانی، ع. ر. ۱۴۰۳. ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر تاریخ کشت بر بهره‌وری آب ذرت در شهرستان گرگان. آبیاری و زهکشی ایران. ۱۸(۲): ۲۳۵-۲۲۷.
- سزائی تبریزی، م.، محمدیان خراسانی، ش.، میرزایی، م. و اسمعیل زاده هنجی، ا. ۱۴۰۲. مباحث کاربردی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب. نشر علمی دانشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی. ۳۲۵ صفحه.
- فولادی نصرآباد، م.، امیرآبادی‌زاده، م. و دستورانی، م. ۱۴۰۳. بررسی عملکرد دو مدل گردش عمومی جو-اقیانوس در ریزمقیاس‌سازی دمای متوسط در شهرستان بیرجند. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۱۴(۱): ۳۰-۴۵.
- الماسی، آ.، فاطمی، ا. و اقبال زاده، ا. ۱۴۰۳. پیش‌بینی بارندگی ماهانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه تحت سناریوهای اجتماعی-اقتصادی گزارش ششم تغییر اقلیم. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب. ۱۴(۱): ۴۰-۶۴.
- ملکی مرشد، ر.، صلاحی، ب. و صابر، م. ۱۴۰۳. پیش‌نگری دمای پیشینه دوره‌های آبی در شمال غرب ایران براساس برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6. مخاطرات محیط طبیعی. DOI: 10.22111/jneh.2024.47321.2006
- میان‌آبادی، آ.، باطنی، م. و محمدی، ص. ۱۴۰۲. پیش‌نمایی تغییرات توزیع بارش و دما با استفاده از شبیه‌سازی اصلاح‌اریبی شده مدل‌های اقلیمی گزارش ششم (مطالعه موردی: ایستگاه همدیدی کرمان). پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی. ۱۴(۱): ۸۴-۶۵
- Annan, J. D. and Hargreaves, J. C. 2011. Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble.
- Anonymous. 2024. Chaharmahal and Bakhtiari meteorological Administration. Available on: <http://www.chbmet.ir>. Accessed 19 September. chbmet.ir
- Gebisa, B. T., Dibaba, W. T. and Kabeta, A. 2023. Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future climate change projections in the Baro River Basin. Journal of Water and Climate Change. 14(8): 2680-2705.
- IPCC. 2021. Climate change 2021 the physical science basis, AR6, Summary for policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Jeong, D. I., Yu, B. and Cannon, A. J. 2023. Climate change impacts on linkages between atmospheric blocking and North American winter cold spells in CanESM2 and CanESM5. Climate Dynamics. 60(1-2): 477-491.
- افزایش بارندگی در کلیه فصول سال و در سناریوی بدبینانه کاهش بارندگی در فصول بهار، تابستان و زمستان اتفاق خواهد افتاد و تنها افزایش جزئی در مجموع بارش فصلی پاییز نسبت به دوره پایه را نشان خواهد داد. با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین بخش‌های متاثر از تغییر اقلیم به دلیل وابستگی به متغیرهای اقلیمی بخش کشاورزی می‌باشد، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی منجر به برنامه‌ریزی مؤثر تصمیمات صحیح و آگاهانه در این بخش می‌گردد.
- ### منابع
- افشاری نیا، م.، پناهی، ف. و احترام، م. ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت کاشان). مهندسی آبیاری و آب ایران. ۱۴(۲): ۲۵۶-۲۳۷.
- امیرآبادی زاده، م.، یعقوب زاده، م.، هاشمی، ر. و خزیمه نژاد، ح. ۱۳۹۸. ارزیابی مدل‌های خطی و داده‌مبنا در ریزمقیاس‌نمایی بارش و دما در استان خراسان جنوبی. هواشناسی و علوم جو. ۱۲(۱): ۸۲-۶۸.
- برارخان‌پور احمدی، ص.، غلامی سفیدکوهی، م. ع. و خوش روش، م. ۱۴۰۲. بررسی اثر پارامترهای هواشناسی بر رخدادهای بارشی شدید در اقلیم‌های مختلف ایران با استفاده از رگرسیون چندک. حفاظت منابع آب و خاک. ۱۲(۳): ۳۳-۴۹.
- جهانگیر، م. ح.، ساداتی‌نژاد، ج. و حقیقی، پ. ۱۳۹۷. پیش‌بینی پارامترهای دمایی تحت مدل CanEMS2 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک لار). ترویج و توسعه آبخیزداری. ۶(۲۲): ۵۲-۴۵.
- چمانه‌فر، س.، موسوی بایگی، م.، بابائیان، ی. و مدرسی، ف. ۱۴۰۱. پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۶ بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد). آبیاری و زهکشی ایران. ۱۶(۵): ۹۷۶-۹۶۳.
- حقیقی، پ.، سلیمان‌پور، م. و مرادی، ا. ۱۴۰۳. اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش و دما با استفاده از سناریوهای SSP (مطالعه موردی: استان فارس). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک. DOI: 10.22098/mmws.2024.14691.1425
- روشنی، ا. و حمیدی، م. ۱۴۰۰. پیش‌بینی اثرات سناریوهای تغییر اقلیم بر دما و بارش بر اساس مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه ساری). مدیریت آب و آبیاری. ۱۱(۴): ۷۹۵-۷۸۱.
- زارعیان، م. ۱۴۰۱. اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6. علوم آب و خاک. ۲۶(۲): ۹۱-۱۰۵.

- Amanuel, A. 2018. Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model: the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*. 4: 437-449.
- Tadase, A. T. 2024. Climate trend analysis in the ramis catchment, upper wabi shebelle basin, Ethiopia, using the CMIP6 dataset. *Journal of African Earth Sciences*. 217: 105347.
- Tafula, M., Chilundo, M., de Sousa, W., Bjornlund, H., Pittock, J., Ramshaw, P. and Wellington, M. (2025). Climate change adaptation benefits from rejuvenated irrigation farming systems in Mozambique. *International Journal of Water Resources Development*. 41(2): 298-324.
- Valipour, M., Khoshravesh, M. and Gholami Sefidkouhi, M. A. 2017. Estimation and trend evaluation of reference evapotranspiration in a humid region. *Italian Journal of Agrometeorology*. 1: 19-36.
- Jones, J. W., Antle, J. M., Basso, B., Boote, K. J., Conant, R. T., Foster, I., Godfray, H. C. J., Herrero, M., Howitt, R. E. and Janssen, S. 2017. Brief history of agricultural systems modeling. *Agricultural Systems*. 155: 240–254.
- Kendall, M. G. 1970. *Rank Correlation Methods*, 2nd Ed., New York: Hafner.
- Nikkhoo Amiri, S., Khoshravesh, M. and Norooz Valashedi, R. 2023. Assessing the effect of climate and land use changes on the hydrologic regimes in the upstream of Tajan river basin using SWAT model. *Applied Water Science*. 13(6): 1-13.
- O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy. and Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*. 42(1): 169-180.
- Shiferaw, H., Amdom, B., Gebretsadkan, G. T. and

Analysis of the Impact of Climate Change on Temperature and Precipitation in Shahrekord Using the Outputs of the Sixth Assessment Report Models with Emphasis on Sustainable Development Scenarios

S.M.R. Hosseini-Vardanjani¹, M. Khoshravesh^{2*}, R. Fatahi Nafchi³, R. Norooz-Valashedi⁴, Y. Pourmohamad⁵

Received: Dec.26, 2024

Accepted: Jan.19, 2025

Abstract

The rapid expansion of industries and increased use of fossil fuels have led to a rise in greenhouse gas concentrations, particularly carbon dioxide, resulting in global warming. Climate change is a global concern with significant impacts on precipitation and temperature patterns. Therefore, this study aims to evaluate the effects of climate change on climatic variables at the Shahrekord station, utilizing the CanESM5 climate prediction model in accordance with the CMIP6 Sixth Assessment Report. For this purpose, climate data (temperature and precipitation) recorded at Shahrekord Airport's synoptic station during the baseline period (1995–2014) were analyzed. Future climatic conditions were predicted using three designed emission scenarios: optimistic (SSP1-2-6), moderate (SSP2-4-5), and pessimistic (SSP5-8-5), covering two future 20-year periods—near future (2025–2045) and distant future (2046–2066). The statistical downscaling method SDSM5.2 was applied to downscale the predicted values. The performance of the CanESM5 model was subsequently assessed using appropriate statistical measures. The simulation results indicated that the CanESM5 model provided higher accuracy and lower error margins in predicting minimum and maximum temperatures compared to precipitation. According to the study findings, the Shahrekord station is projected to experience an increase in annual precipitation up to 6.5% under the optimistic scenario, while a decrease of up to 16% is expected under the pessimistic scenario, compared to the baseline period. Overall, future projections show a significant increase in average maximum winter temperatures under moderate and pessimistic scenarios, with this rise becoming notably apparent in all seasons during the distant future period. Additionally, the range of variations in maximum temperature in the distant future is expected to show greater fluctuations compared to the near future. A slight reduction in average annual minimum temperature is anticipated in the near future, followed by an increase in the distant future.

Keywords: Climate, Meteorological variable, SSP scenario, Water resources

1- PhD Candidate of Irrigation and Drainage, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

4- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

5- Researcher at Boise State University, Boise, USA

(*- Corresponding Author Email: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)