

ارزیابی تغییر اقلیم حوزه آبخیز حبله‌رود با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو CanESM2

مهین نادری^۱، واحد بردی شیخ^{۱*}، عبدالرضا بهره‌مند^۱، چوقی بایرام کمکی^۲ و عبدالعظیم قانقرمه^۳

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۴/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۷/۱۵)

چکیده

با توسعه فناوری و صنعتی‌شدن جوامع بشری، شاهد افزایش گازهای گلخانه‌ای و بروز تغییرات آب‌وهوایی هستیم. با توجه به اهمیت تغییرات آب‌وهوایی برای زمین و ساکنان آن، پیش‌بینی بلندمدت پارامترهای اقلیمی همیشه مورد توجه بوده است. یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اقلیم آینده، استفاده از مدل گردش عمومی جو است. در پژوهش حاضر پس از بررسی خروجی سه مدل گردش عمومی جو از جمله مدل آمریکایی (GFDL-CM3)، مدل کانادایی (CanESM2) و مدل روسی (Inmcm4.ncml) و انتخاب مدل بهتر برای پیش‌بینی اقلیم منطقه مورد مطالعه، از داده‌های سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 مدل کانادایی (CanESM2) برای ارزیابی تغییرات اقلیمی حوزه حبله‌رود در دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۱ استفاده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر روند افزایشی مجموع بارش ماهانه دوره آتی (۲۰۲۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۱۷) در حوزه حبله‌رود است. نتایج بررسی تغییرات دمای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۱ در حوزه حبله‌رود نیز بیانگر افزایش میانگین ماهانه دمای بیشینه و کمینه در ده‌های آتی است. پیامدهای این شرایط در منطقه مورد مطالعه که رژیم جریان آن به طور عمده توسط نزولات برفی کنترل می‌شود، از جنبه هیدرولوژیک اهمیت بالایی دارد و نیازمند اتخاذ سیاست‌های سازگاری با پدیده تغییر اقلیم در این حوزه آبخیز است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، بارش، دما، ریزمقیاس‌سازی، RCP، CanESM2، SDSM

۱. گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 ۲. گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران
 ۳. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
- *: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: sheikh@gau.ac.ir

مقدمه

امروزه باتوجه به افزایش جمعیت کره زمین، پیشرفت تکنولوژی، توسعه جوامع و نیاز روزافزون بشر به مناطق مسکونی، منابع اولیه و غیره، دست‌درازی بشر به منابع طبیعی، بیش‌ازپیش نمایان شده است، به طوری که دخل و تصرف در محیط طبیعی، با روند صعودی همراه بوده و آثار مخرب و ویرانگری به جا گذاشته است. برای نمونه می‌توان به استفاده فزاینده بشر از گازهای گلخانه‌ای و سوخت‌های فسیلی اشاره کرد که پیامد آن تسریع در روند تغییر اقلیم جهانی است (۱۹). همه‌ی سناریوهای هیات بین‌الدول تغییر اقلیم (Panel on Climate Change Intergovernmental) و مدل‌های گردش عمومی (General Circulation Models) پیش‌بینی می‌کنند، افزایش در غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند دمای سطح کره زمین را بالا ببرد که این تغییرات بر چرخه هیدرولوژی مناطق مختلف اثر گذار خواهد بود (۵). طبق گزارش‌های IPCC، تغییر اقلیم باعث ایجاد تغییر در رژیم هیدرولوژی در چند دهه اخیر در سطح جهان شده است، به گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخداد‌های بیشینه اقلیمی مانند سیلاب افزایش یافته است (۴). برای شناخت پیامدهای گرمایش جهانی و آمادگی برای سازگاری با آن باید شرایط آبی و هوایی پیش‌یابی شوند. معتبرترین ابزار برای تولید سناریوهای اقلیمی، مدل‌های گردش عمومی هستند که بر پایه قوانین فیزیکی که به وسیله روابط ریاضی ارائه می‌شوند، استوار هستند (۲۲) و بهترین اطلاعات را درباره پاسخ جو به افزایش تمرکز گازهای گلخانه‌ای فراهم می‌کنند (۶). تغییرات گازهای گلخانه‌ای و میزان انتشار این گازها طی دوره‌های آبی، از مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها محسوب می‌گردند. از این رو سناریوهای انتشار که نشان دهنده‌ی میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و وضعیت آن‌ها تا سال ۲۱۰۰ هستند، به مدل‌ها معرفی می‌شوند و بر این اساس، شرایط اقلیمی آینده شبیه‌سازی می‌شود (۳). سناریوی جدید انتشار دارای چهار خط سیر کلیدی با نام‌های RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 6، و RCP 8.5 هستند که

بر اساس میزان واداشت تابشی آن‌ها در سال ۲۱۰۰ نام‌گذاری شده‌اند (۲). مدل‌های سیاره‌ای آب و هوا، به دلیل بزرگ‌مقیاس بودن شبکه محاسباتی آن‌ها، قادر به پیش‌بینی متغیرهای آب و هواشناختی در مقیاس منطقه‌ای نیستند، بنابراین پژوهشگران ابزار واسطی به نام مدل‌های مولد هوا را ابداع کرده‌اند که می‌توان بر اساس آن و با استفاده از خروجی مدل‌های عددی و با لحاظ رفتار آب‌وهوای مشاهداتی منطقه یا ایستگاه مورد مطالعه، تغییر آب و هوا را در مقیاس نقطه‌ای و ایستگاه هواشناسی، مطالعه و ارزیابی کرد. از روش‌های مختلف دینامیکی و آماری برای ریزگردانی خروجی مدل‌های گردش عمومی برای شناخت رفتار جو در مقیاس ریزتر استفاده می‌شود (۲). بسیاری از مطالعات مربوط به تغییرات آب و هوا در سالیان اخیر، با استفاده از مدل‌های GCM و سناریوهای RCP به‌عنوان سناریوهای آب‌وهوایی در دوره‌ی آینده انجام شده است. استیل و همکاران (۲۳) تغییر اقلیم ایرلند را با استفاده از مدل گردش عمومی ECHAM5 و سناریوی انتشار A1B بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند، بارش زمستانه و تابستانه به ترتیب افزایش و کاهش خواهد یافت و دما نیز افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر نیز عثمان و همکاران (۱۵) بارش مناطق مرکزی عراق را بر اساس هفت مدل جهانی و با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس‌سازی کردند و نتایج بیانگر روند افزایشی بارش در ماه‌های دسامبر، فوریه، سپتامبر و نوامبر و روند کاهشی بارش در ماه‌های مارس، آوریل است. همچنین اوینگ و همکاران (۱۶) با استفاده از خروجی شش مدل GCM تحت سه سناریوی RCP به بررسی تغییر اقلیم حوضه رودخانه Tuotuo در چین پرداختند و بیان کردند، میانگین دمای سالانه در دوره‌های آبی افزایش خواهد یافت و همچنین میزان تبخیر و تعرق افزایش می‌یابد. تان و همکاران (۲۴) نیز تغییرات اقلیمی در حوزه رودخانه کلانتان در مالزی را با استفاده از شش مدل گردش عمومی و سه سناریوی RCP در دوره آینده بررسی کردند. این مطالعه افزایش بارندگی ماهانه در طول فصل مرطوب و کاهش آن در طول فصل خشک را نشان می‌دهد. در پژوهشی دیگر

نشان دادند، تغییرات در شاخص‌های بارشی بسیار کمتر از شاخص‌های دمایی بوده و ایران تحت تأثیر افزایش چشمگیر دما قرار دارد. همچنین نی و همکاران در سال ۲۰۱۹ تحلیل روند دما و بارندگی شدید در طول دوره رشد گندم زمستانه در منطقه عمده کاشت گندم زمستانه چین را بررسی کردند. طبق نتایج به دست آمده، روند شاخص‌های دمایی به صورت افزایشی است. آندرد و همکاران (۱) با استفاده از مدل‌های آب‌وهوایی منطقه‌ای، به ارزیابی تغییر اقلیم در حوزه رودخانه موندو در برزیل پرداختند. نتایج این پژوهش، بیانگر کاهش میزان بارش و افزایش دمای بیشینه و کمینه در این حوزه است. ردی و همکاران (۱۷) اثرات تغییر آب و هوا بر بارش و دما در زیر حوضه غاتا پرابها در کشور هند را بررسی کردند. نتایج نشان داد، میانگین سالانه بارندگی و همچنین میانگین دمای روزانه در ده‌های آتی افزایش می‌یابد. با توجه به پژوهش‌های انجام شده در رابطه با پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دیده می‌شود، در اکثر موارد و در نقاط مختلف دنیا، نتایج بیانگر افزایش دمای کمینه و بیشینه در ده‌های آتی است. اما در رابطه با پارامتر بارش، روند مشخصی وجود نداشته و در مناطق مختلف افزایش یا کاهش بارش در آینده را پیش‌بینی کرده‌اند.

باتوجه به آنکه منابع آبی و طبیعی در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارند، بررسی تغییرات اقلیمی در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی چون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی و تخریب محیط‌زیستی باشد (۲۴). حوضه حبله رود نیز همانند سایر حوزه‌های آبخیز، تحت تأثیر مخاطرات ناشی از تغییرات اقلیمی قرار دارد. باتوجه به پیامدهای تغییر اقلیم در این حوزه آبخیز و تأثیرات آن بر رژیم جریان رودخانه حبله رود و همچنین حساسیت اکولوژیک منطقه و تنش‌هایی که کشاورزان و ذی‌نفعان این حوزه بر سر منابع آبی با آن روبرو هستند، نیاز به توجه جدی ذی‌مدخلان و ذی‌نفعان و اتخاذ سیاست‌های سازگاری با پدیده تغییر اقلیم در این حوزه آبخیز است. پژوهش حاضر در مقایسه با پژوهش‌های مشابه، به بررسی خروجی ریزمقیاس شده دو مدل گردش عمومی جو از

جهانبخش اصل و همکاران (۱۰) به منظور بررسی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم روی دما و بارش حوزه‌ی شهرچای ارومیه، خروجی شش مدل گردش عمومی جو تحت سه سناریوی A2، A1B و B1 را با استفاده از مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس کردند و نشان دادند، بارش دوره‌ی آتی کاهش می‌یابد. این در حالی است که دمای کمینه و دمای بیشینه افزایش خواهد یافت. ضیایی و همکاران (۲۸) نیز در پژوهشی با استفاده از مدل LARS-WG و سناریوهای A2، B2 و A1B به مقایسه اثر سناریوهای تغییر اقلیم بر شدت و ریسک بیابان‌زایی حوزه حبله رود پرداختند که طبق نتایج این پژوهش بارش ماهانه حوضه به طور متوسط در آینده نزدیک افزایش خواهد یافت و کمینه و بیشینه دما نیز در ده‌های آتی افزایش می‌یابد. در پژوهشی صالح‌پور و همکاران (۲۰) نیز با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو HADCM3 و تحت سه سناریوی تغییر اقلیم A2، A1B و B1 سری‌های زمانی بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه دوره آماری ۲۰۴۰-۲۰۱۱ را مورد شبیه‌سازی قرار دادند و نوسان‌های این متغیرها را با دوره پایه ۲۰۱۰-۱۹۹۵ مقایسه کردند. نتایج نشان داد، نوسان‌های بارش در دوره آتی، اختلاف معنی‌داری با بارش در دوره پایه ندارد؛ اما میانگین دمای حداکثر سالانه در هر سه سناریو افزایش خواهد یافت. سلمان و همکاران (۲۱) در مطالعه‌ای روند بلندمدت دمای روزانه در عراق را بررسی کردند و افزایش چشمگیری در دمای کمینه و بیشینه در همه ایستگاه‌ها را شناسایی کردند. در پژوهشی دیگر لی و همکاران (۱۲) در مغولستان، وقایع بارش‌های حدی را بررسی کردند و گزارش دادند، ۱۱ شاخص حدی بارش از سال ۱۹۵۹ تا ۲۰۱۴ کاهش یافته و شاخص‌های خشکی بیشتر از شاخص‌های مرطوب کاهش یافته‌اند. فسیا و همکاران (۷) داده‌های مدل گردش عمومی جو برای شهر آدیس آبابا را کوچک‌مقیاس کردند. شبیه‌سازی داده‌های دما تحت سناریوهای مختلف از سال ۲۰۲۰ تا سال ۲۰۸۰، نشان‌دهنده افزایش دمای بیشینه و دمای کمینه است. در پژوهشی دیگر در ایران قیامی شمایی و همکاران (۸)

جمله مدل آمریکایی (GFDL-CM3) و مدل روسی (inmcm4.ncml) و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل کانادایی (CanESM2) از طریق مدل SDSM پرداخته است و پس از تشخیص مدل بهتر برای پیش‌یابی اقلیم منطقه مورد مطالعه، از داده‌های سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 مدل کانادایی (CanESM2) برای ارزیابی تغییرات اقلیمی حوضه حبله‌رود در دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۱ استفاده کرده است.

انتخاب مدل GCM مناسب برای منطقه مورد مطالعه

به‌منظور پیش‌یابی دما و بارش برای دوره آتی، ابتدا باید بهترین مدل (Atmospheric Ocean General Circulation Models) AOGCM انتخاب شود و مطالعات بر اساس آن ادامه یابد که مفهوم آن این است که عدم قطعیت مربوط به مدل‌ها می‌بایست لحاظ شود. زیرا عدم قطعیت مربوط به مدل‌های مختلف AOGCM به‌مراتب بیشتر از عدم قطعیت مربوط به سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای است (۱۳). در این پژوهش به‌منظور انتخاب مدل و روش مناسب، خروجی‌های سه مدل گردش عمومی جو بررسی شد. از جمله این مدل‌ها، مدل آمریکایی (GFDL-CM3) است که یکی از مدل‌های گردش عمومی جو مربوط به گزارش پنجم (Coupled Model Intercomparison Project Phase (CMIP5)) بوده و نسخه توسعه یافته مدل CM2.1 است و تمرکز اصلی آن بر مؤلفه‌های جوی است. همچنین خروجی‌های این مدل به‌صورت ریزمقیاس شده در دسترس است که از سایت سازمان ناسا (<https://ds.nccs.nasa.gov>) قابل‌دانلود است (۹). مدل کانادایی (CanESM2) که برای مدل‌سازی و تحلیل تغییرات آب‌وهوای کانادا توسعه یافته است، یک مدل سیستم زمین در مقیاس جهانی بوده که برای تولید پیش‌بینی‌های آب‌وهوای فصلی و دهه‌ای، شبیه‌سازی آب‌وهوای تاریخی و پیش‌بینی در مقیاس صد ساله آب‌وهوای آینده استفاده می‌شود (۱۱). مدل روسی (inmcm4.ncml)، یک مدل سیستم آب‌وهوایی زمین مربوط به گزارش پنجم بوده و نسخه توسعه یافته‌ی مدل INMCM3 است. این مدل، کاهش وسعت یخ دریا، تغییر در شار گرما و گردش نصف النهاری در اقیانوس تحت گرم شدن کره زمین و همچنین برخی از جنبه‌های تغییرپذیری آب‌وهوای طبیعی را در نظر گرفته است (۲۶). خروجی‌های این

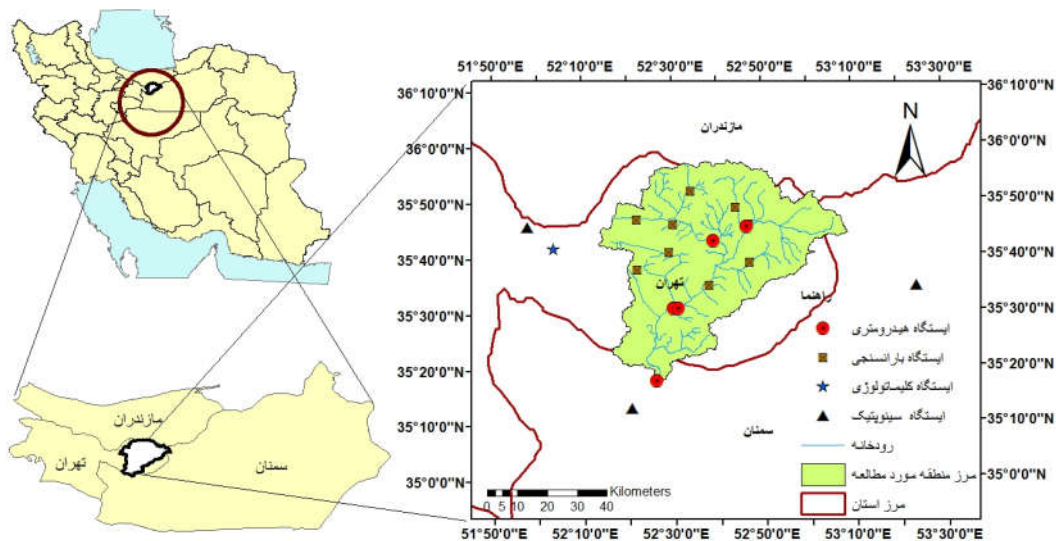
جمله مدل آمریکایی (GFDL-CM3) و مدل روسی (inmcm4.ncml) و مقایسه نتایج آن‌ها با نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل کانادایی (CanESM2) از طریق مدل SDSM پرداخته است و پس از تشخیص مدل بهتر برای پیش‌یابی اقلیم منطقه مورد مطالعه، از داده‌های سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP 8.5 مدل کانادایی (CanESM2) برای ارزیابی تغییرات اقلیمی حوضه حبله‌رود در دوره آتی ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۱ استفاده کرده است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز حبله‌رود با طول جغرافیایی ۵۲ درجه و ۲۵ دقیقه و ۸ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۴۲ دقیقه و ۲۵ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۳ دقیقه و ۴ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۴۴ دقیقه و ۶ ثانیه شمالی، یکی از زیر حوضه‌های مهم حوزه آبخیز کویر مرکزی ایران است. این حوزه آبخیز که مناطقی از استان‌های تهران (شامل شهرستان‌های فیروزکوه و دماوند) و استان سمنان (شهرستان‌های سمنان و گرمسار) را شامل می‌شود، در شمال غربی حوزه آبخیز دشت کویر قرار دارد و به زیر حوضه کویر سمنان و گرمسار تعلق دارد. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شامل بخش بالادست این حوزه آبخیز تا ایستگاه بنکوه است که در محدوده استان تهران واقع شده است و حدود ۳۲۰۰ کیلومترمربع مساحت دارد. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از آمار و اطلاعات ایستگاه‌های واقع در داخل و مجاور حوضه حبله‌رود شامل ایستگاه‌های سینوپتیک فیروزکوه، گرمسار، همدان، سمنان و آبدلی طی دوره آماری ۱۹۸۶ الی ۲۰۱۷ برای بررسی تغییرات دما و بارش و همچنین مقایسه با دوره آینده (سال ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۱) استفاده شده است. همچنین به‌منظور پیش‌یابی تغییرات اقلیمی در منطقه مورد مطالعه، از خروجی‌های سه مدل گردش عمومی جو از جمله مدل آمریکایی

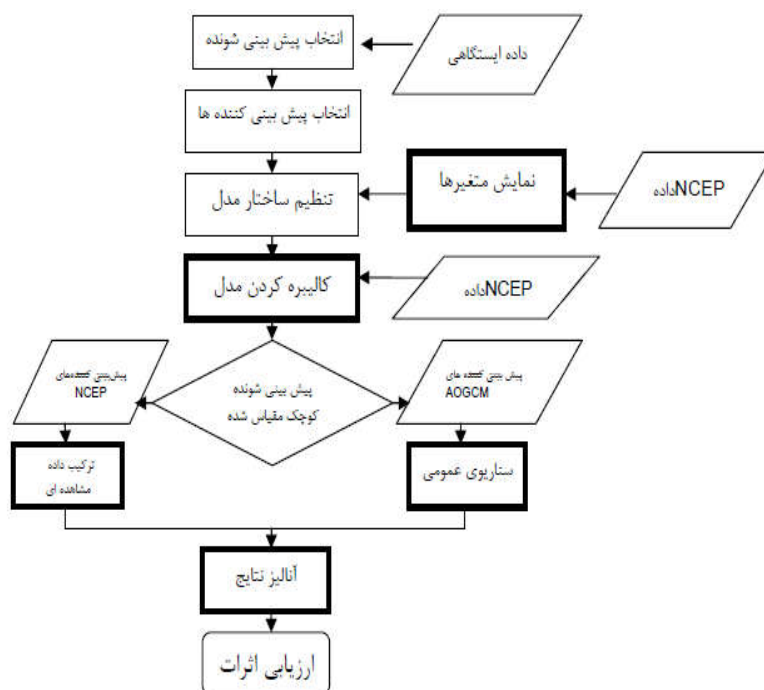


شکل ۱. موقعیت حوزه آبخیز حبله رود تا ایستگاه هیدرومتری بنکوه

پیش‌یابی تغییرپذیری متغیرهای اقلیمی

به منظور پیش‌یابی تغییرپذیری متغیرهای اقلیمی از داده‌های مدل گردش عمومی جو استفاده می‌شود. در این پژوهش پس از مقایسه ۳ مدل گردش عمومی مورد بررسی و انتخاب مدل CanESM2 به عنوان مدل بهتر، به منظور پیش‌یابی تغییرپذیری متغیرهای اقلیمی از داده‌های مدل CanESM2 استفاده شد که با به کارگیری مدل آماری SDSM، خروجی‌های این مدل گردش عمومی جو برای منطقه مورد مطالعه کوچک‌مقیاس شدند. مدل CanESM2، نسخه‌ی بروزشده‌ی مدل‌های GCM است که تحت عنوان مدل‌های سیستم زمین (ESM (Earth System Model)) شناخته می‌شوند. این مدل توسط مرکز Center for Climate Modeling and Canadian) CCCma (Analysis ارائه شده است و دارای سه سناریو، شامل RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 است. سناریوی RCP2.6 دارای کمترین میزان افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن بوده که طبق این سناریو واداشت تابشی در اواسط قرن حاضر به حدود ۳.۱ رسیده و سپس کاهش می‌یابد و در سال ۲۱۰۰ به ۲.۶ وات بر مترمربع می‌سد (۲۵). سناریوی RCP8.5 سناریویی است که بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم، آب‌وهوای کره

مدل نیز به صورت ریزمقیاس شده در دسترس است که از سایت سازمان ناسا (<https://ds.nccs.nasa.gov>) قابل دانلود است. با مقایسه نتایج این مدل‌ها، مدل و روش مناسب برای پیش‌یابی اقلیم منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. سپس، خروجی‌های ریزمقیاس شده دو مدل GFDL-CM3 و inmcm4.ncml و همچنین نتایج حاصل از ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل کانادایی (CanESM2) در ۴ ایستگاه منطقه مورد مطالعه بررسی شد و نتایج شبیه‌سازی بارش توسط این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در همان دوره مقایسه شد. همچنین ضریب همبستگی بین بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده توسط این مدل‌ها نیز محاسبه شد. در این پژوهش، به منظور ریزمقیاس کردن خروجی مدل CanESM2، روش آماری SDSM استفاده شده است. این مدل ارتباطات آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و محلی (پیش‌بینی‌شونده‌ها) را بر اساس روش رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. این ارتباطات با استفاده از داده‌های مشاهداتی ایستگاه و خروجی مدل‌های گردش عمومی در دوره مشابه دیدبانی ایجاد می‌شوند. مراحل ریزمقیاس کردن خروجی مدل‌های گردش عمومی در مدل SDSM در شکل ۲ به صورت فلوجارت نشان داده شده است.



شکل ۲. فرایند کوچک مقیاس کردن نتایج مدل‌های گردش عمومی به روش رگرسیون خطی در مدل SDSM (ویلیبی و همکاران، ۲۰۰۷)

استفاده شده است که نتایج مربوطه در شکل ۳ و جداول ۱ تا ۳ نشان داده شده است. باتوجه به نمودارها و ضرایب به دست آمده در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل SDSM برای هر کدام از ایستگاه‌های مورد بررسی در حوضه حبله رود، دیده می‌شود که مدل SDSM دارای توانایی بالایی در ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی CanESM2 و پیش‌بینی اقلیم آبی حوضه حبله رود است.

انتخاب مدل GCM مناسب برای منطقه مورد مطالعه

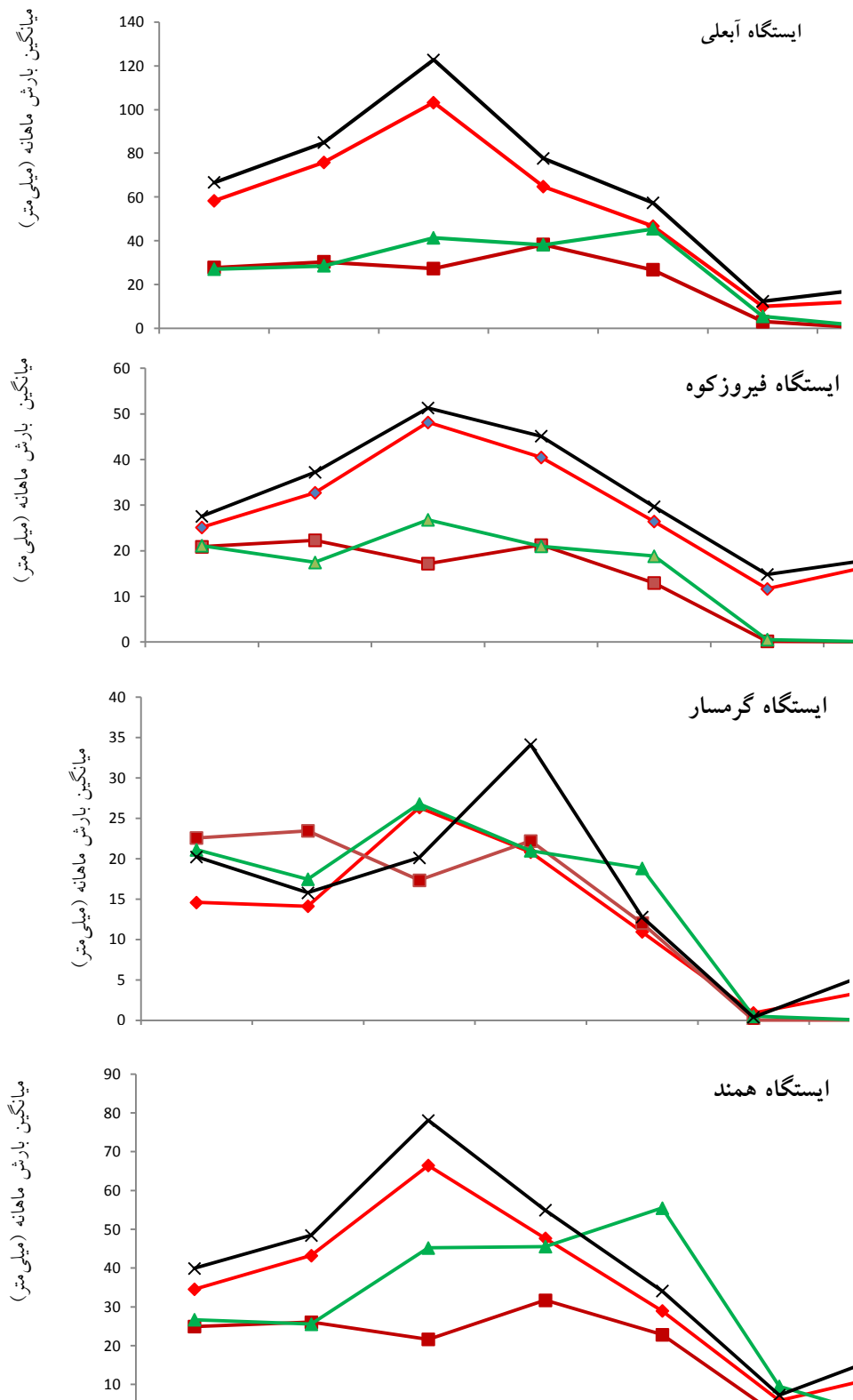
نتایج مربوط به مقایسه میانگین بارش ماهانه مشاهداتی دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۶ با میانگین بارش ماهانه مدل GFDL-CM3 و مدل inmcm4.ncml و میانگین بارش ماهانه ریزمقیاس شده مدل CanESM2 با استفاده از مدل SDSM برای ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۶، در شکل ۳ نشان داده شده است.

در جدول ۴، ضریب همبستگی بین نتایج مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های مورد بررسی خلاصه شده است. با

زمین در خط سیر این سناریو پیش خواهد رفت. به طوری که ادامه این روند، منجر به واداشت تابشی به میزان ۸.۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام، غلظت دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایشی خواهد داشت. این سناریو توسط تیم مدل‌سازی MESSAGE و در موسسه بین‌المللی آنالیز سیستم‌های کاربردی IIASA اتریش توسعه و طراحی شد که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است (۱۸). میزان انتشار در سناریوی RCP4.5 حد وسط دو سناریوی دیگر است و این سناریو به سناریوی تثبیت معروف است (۲۵).

نتایج و بحث

در این پژوهش برای بررسی کارایی مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل گردش عمومی جو برای منطقه مورد مطالعه، سال‌های ۱۹۸۶ تا ۱۹۹۶ به عنوان دوره واسنجی مدل و سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۵ به عنوان دوره اعتبارسنجی مدل در هر کدام از ایستگاه‌های مورد بررسی



شکل ۳. مقایسه میانگین بارش ماهانه شبیه سازی شده با مدل‌های GFDL-CM3، inmcm4.ncml و CanESM2 با مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵

جدول ۱. نتایج مربوط به مرحله واسنجی (۱۹۸۶-۱۹۹۶) و اعتبارسنجی (۱۹۹۷-۲۰۰۵) مدل SDSM برای پارامتر بارش

ضرایب	ایستگاه ابعلی	ایستگاه فیروزکوه	ایستگاه گرمسار	ایستگاه همدان
واسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹
مجموع بارش	ضریب همبستگی			
(۱۹۸۶-۱۹۹۶)	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۰
اعتبارسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۶	۰/۹۹
مجموع بارش	ضریب همبستگی			
(۱۹۹۷-۲۰۰۵)	۰/۹۶	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۷
واریانس بارش	ضریب همبستگی			

جدول ۲. نتایج مربوط به مرحله واسنجی (۱۹۸۶-۱۹۹۶) و اعتبارسنجی (۱۹۹۷-۲۰۰۵) مدل SDSM برای پارامتر دمای پیشینه

ضرایب	ایستگاه ابعلی	ایستگاه گرمسار	ایستگاه سمنان	ایستگاه همدان
واسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
میانگین دمای پیشینه	ضریب همبستگی			
(۱۹۸۶-۱۹۹۶)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
اعتبارسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
میانگین دمای پیشینه	ضریب همبستگی			
(۱۹۹۷-۲۰۰۵)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
واریانس دمای پیشینه	ضریب همبستگی			

جدول ۳. نتایج مربوط به مرحله واسنجی (۱۹۸۶-۱۹۹۶) و اعتبارسنجی (۱۹۹۷-۲۰۰۵) مدل SDSM برای پارامتر دمای کمینه

ضرایب	ایستگاه ابعلی	ایستگاه گرمسار	ایستگاه سمنان	ایستگاه همدان
واسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
میانگین دمای کمینه	ضریب همبستگی			
(۱۹۸۶-۱۹۹۶)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
اعتبارسنجی	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
میانگین دمای کمینه	ضریب همبستگی			
(۱۹۹۷-۲۰۰۵)	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۹۹
واریانس دمای کمینه	ضریب همبستگی			

جدول ۴. ضریب همبستگی بین بارش پیش‌بینی شده با مدل‌های مورد استفاده و داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های

مورد بررسی در دوره آماری ۱۹۸۶-۲۰۰۵

مدل	ایستگاه ابعلی	ایستگاه فیروزکوه	ایستگاه گرمسار	ایستگاه همدان
GFDL-CM3	۰/۸۷	۰/۸۲	۰/۸۳	۰/۸۳
inmcm4.ncml	۰/۸۴	۰/۸۷	۰/۸۸	۰/۷۷
CanESM2	۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۸۶	۰/۹۹

پیش‌یابی متوسط دمای بیشینه و کمینه

نتایج مقایسه شرایط دمایی پیش‌یابی شده در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۱) تحت شرایط تغییر اقلیم با دوره پایه (۲۰۱۷-۱۹۸۶) برای ایستگاه‌های منتخب در شکل ۶ خلاصه شده است. باتوجه به این شکل، روند تغییرات دما در حوضه حبله‌رود طبق هر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5 در بیشتر ماه‌های سال در جهت افزایش میانگین ماهانه دمای بیشینه و کمینه در ده‌های آتی است.

نتیجه‌گیری

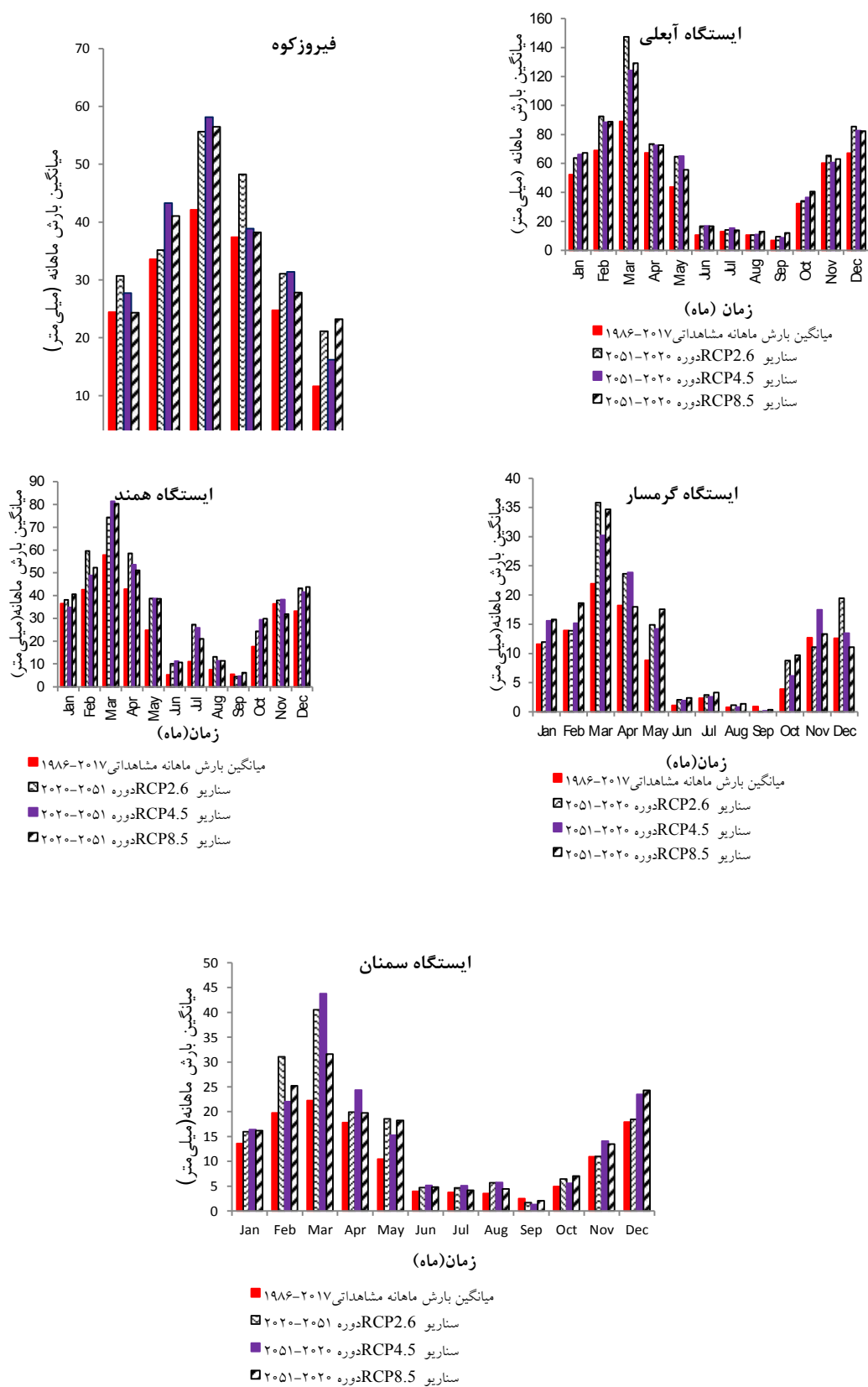
در پژوهش حاضر، خروجی سه مدل گردش عمومی جو از جمله مدل آمریکایی (GFDL-CM3)، مدل کانادایی (CanESM2) و مدل روسی (inmcm4.ncml) برای حوضه حبله‌رود مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت و مدل CanESM2، به‌عنوان مدل برتر انتخاب شد. سپس اثر تغییر اقلیم بر بارندگی و دمای حوضه حبله‌رود با استفاده از خروجی‌های مدل کانادایی (CanESM2) و سه سناریو انتشار گازهای گلخانه‌ای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌یابی شد که طبق نتایج به‌دست آمده، در بیشتر ایستگاه‌ها و ماه‌های سال در دهه‌های آتی، طبق هر سه سناریوی RCP 8.5، RCP 4.5 و RCP 2.6، مجموع بارش ماهانه دارای روند افزایشی است. همچنین طبق هر سه سناریو موجود، روند بارش سالانه نیز در دوره ۲۰۲۰ الی ۲۰۵۱ نسبت به دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۷ به‌صورت افزایشی است؛ بنابراین طبق نتایج حاصل از این پژوهش و باتوجه به پیش‌یابی اقلیم توسط مدل CanESM2 و مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM، در ده‌های آتی شاهد افزایش میزان بارش در حوضه حبله‌رود خواهیم بود که این امر با نتایج حاصل از پژوهش ضیایی و همکاران (۲۸) (که بیانگر افزایش بارش متوسط ماهانه حوضه حبله‌رود در آینده است) مطابقت داشته است؛ اما با نتایج حاصل از پژوهش صالح‌پور و همکاران (۲۰) (که نوسانات بارش حوضه حبله‌رود در دوره

توجه به شکل ۳ و جدول ۴ دیده می‌شود، مدل CanESM2 نسبت به دو مدل دیگر دارای کارایی بیشتری در پیش‌بینی بارش منطقه مورد مطالعه است.

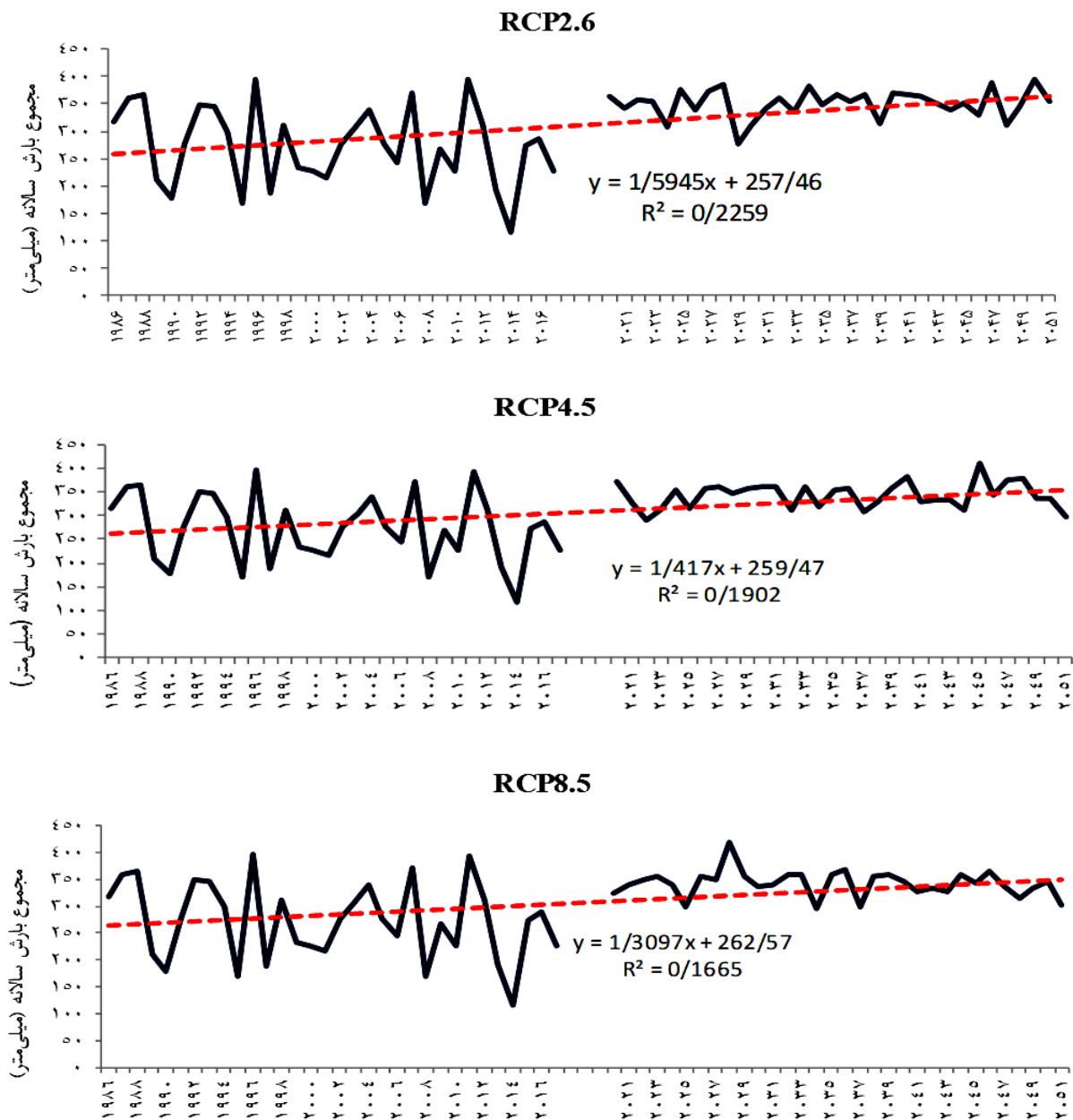
پیش‌یابی بارش ماهانه و سالانه

بارش یکی از پارامترهای مهم اقلیمی برای هر منطقه محسوب می‌شود. بررسی این سنجه اقلیمی برای درک آب‌وهوای آینده و سنجش تغییر اقلیم آتی حائز اهمیت است. نتایج پیش‌یابی مقدار بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه در نمودارهای زیر (شکل ۴) ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، در حوضه حبله‌رود، مطابق سناریوی RCP8.5 یعنی بدون اتخاذ هیچ‌گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم که وجه مشخصه آن روند افزایش گازهای گلخانه‌ای است، در اکثر ایستگاه‌ها و اکثر ماه‌های سال، روند بارش به‌صورت افزایشی پیش‌یابی شده است. همچنین مطابق سناریو RCP4.5 که در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند، در ایستگاه‌های مورد بررسی روند بارش به‌صورت افزایشی خواهد بود و مطابق سناریو RCP2.6 که در برگیرنده کمترین نرخ افزایش گازهای گلخانه‌ای و واداشت تابشی ناشی از آن است، روند بارش در ده‌های آتی در بیشتر ماه‌های سال به‌صورت افزایشی خواهد بود؛ بنابراین در بیشتر ایستگاه‌ها و ماه‌های سال در دهه‌های آتی، طبق هر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5، مجموع بارش ماهانه دارای روند افزایشی خواهد بود که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

باتوجه به نمودارهای فوق، افزایش بارش در فصل بهار بیشتر خواهد بود که نشان‌دهنده تغییر الگوی توزیع زمانی بارندگی در اثر تغییر اقلیم است. در شکل ۵ نیز مشاهده می‌شود که طبق هر سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، مجموع بارش سالانه در ده‌های آتی (دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۷) دارای روند صعودی خواهد بود.



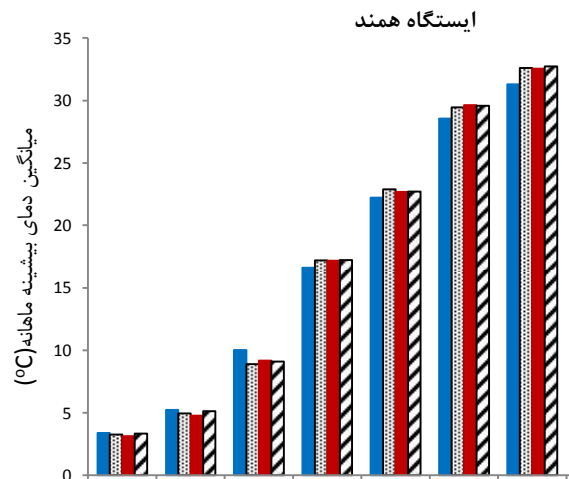
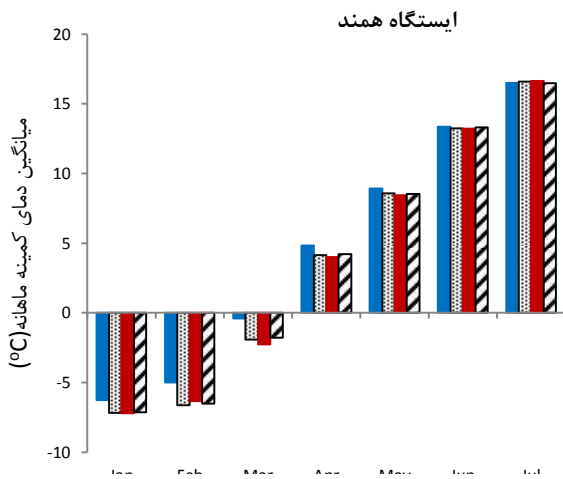
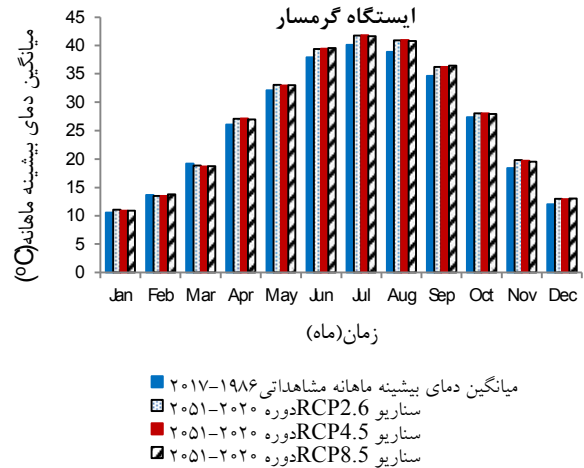
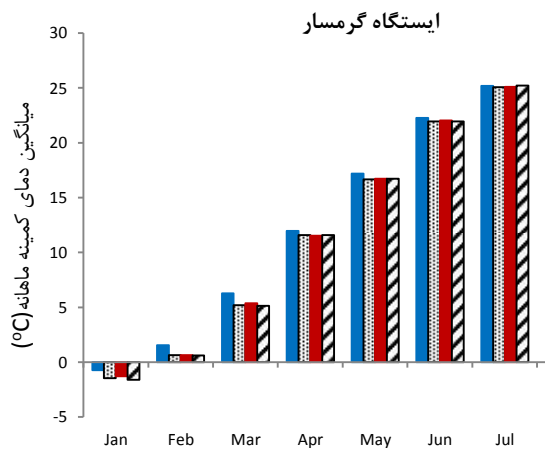
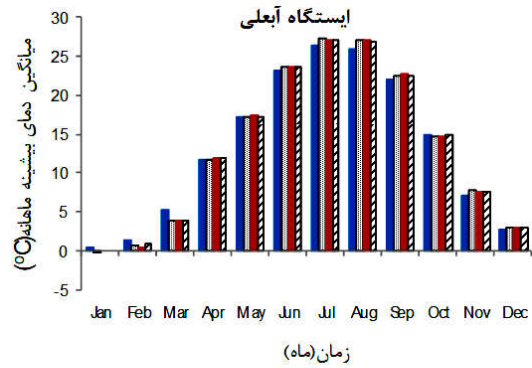
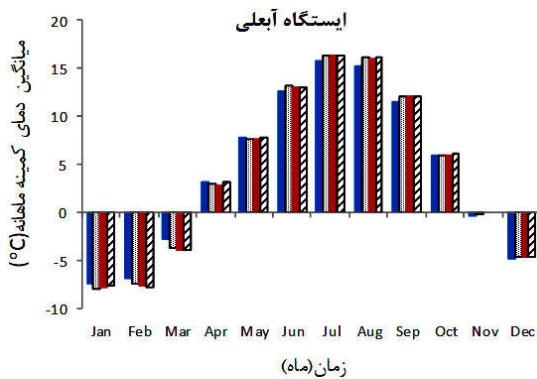
شکل ۴. نتایج پیش‌یابی مقدار بارش در دوره آتی نسبت به دوره پایه



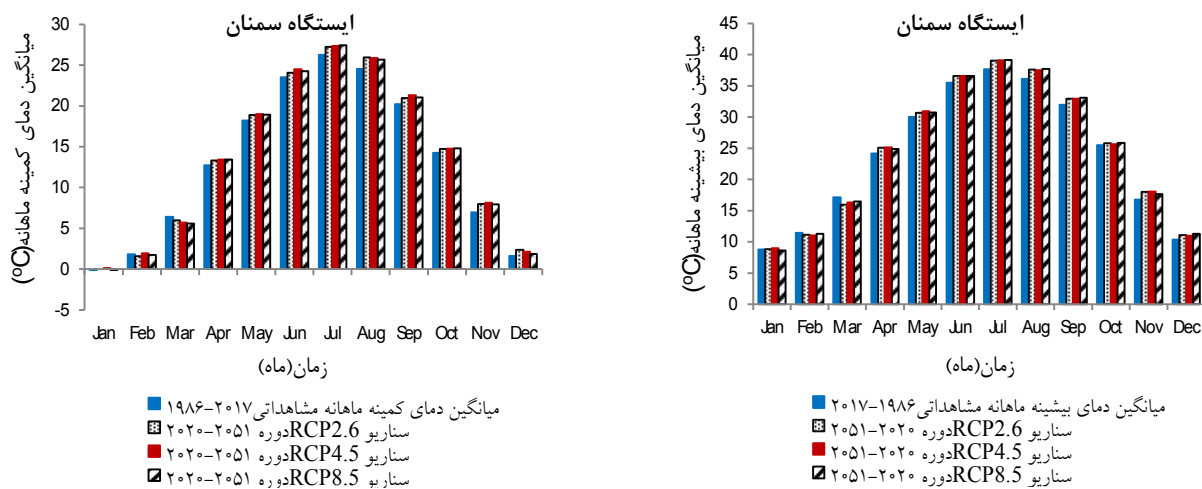
شکل ۵. مقایسه بارش سالانه دوره (۲۰۲۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره مشاهداتی (۱۹۸۶-۲۰۱۷)

شده در ایران و حوضه حبله رود از جمله جهانبخش اصل و همکاران (۱۰)، ضیایی و همکاران (۲۸)، صالح پور و همکاران (۲۰)، قیامی شماری و همکاران (۸) که افزایش دمای کمینه و بیشینه را در سایر نقاط ایران و حوضه حبله رود در ده‌های آتی پیش‌یابی کرده‌اند مطابقت دارد. همچنین این امر با الگوی منظم افزایش دما در سایر مطالعات جهانی از جمله مطالعات سلمان و همکاران (۲۱)،

آتی را بدون اختلاف معنی‌داری با بارش در دوره پایه پیش‌یابی کردند) و پژوهش قیامی شماری و همکاران (۸) (که نشان دادند، تغییرات در شاخص‌های بارشی در ایران کم است)، مطابقت ندارد. روند تغییرات دما نیز در حوضه حبله رود طبق هر سه سناریوی RCP 4.5، RCP 8.5 و RCP 2.6 در جهت افزایش میانگین ماهانه دمای بیشینه و کمینه در ده‌های آتی است، این امر با اکثر مطالعات انجام



شکل ۶. مقایسه سه سناریو RCP 2.6 و RCP 4.5، RCP8.5 در دوره (۲۰۲۰-۲۰۵۱) با دمای مشاهداتی در دوره (۱۹۸۶-۲۰۰۵) در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۶. مقایسه سه سناریو RCP 2.6، RCP 4.5، RCP 8.5 در دوره (۲۰۲۰-۲۰۵۱) با دمای مشاهداتی در دوره (۱۹۸۶-۲۰۰۵) در

ایستگاه‌های مورد مطالعه (ادامه)

سیاست های سازگاری با پدیده تغییر اقلیم از جمله اجرای برنامه‌های جامع بیابان‌زدایی، کشت محصولات منطبق با شرایط اقلیمی، حفر چاه‌های تغذیه‌ای در بستر رودخانه‌ها، ایجاد استخرهای ذخیره آب در بالادست حوزه برای نفوذ آب در زمستان و کاهش خطر سیلاب و جلوگیری از توسعه اراضی زراعی و باغات در این حوزه آبخیز است.

فسیا و همکاران (۷)، نی و همکاران (۱۴) و ردی و همکاران (۱۷) مطابقت دارد. به طور کلی، تغییرات دمای متوسط بیشینه و کمینه و همچنین تغییرات نوع و میزان بارندگی منطقه در ردیابی اثرات تغییر اقلیم حائز اهمیت است. این شرایط در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان سرچشمه رودخانه بزرگ حبله رود از جنبه هیدرولوژیک اهمیت بالایی دارد و نیازمند توجه مسئولان مربوطه و اتخاذ

منابع مورد استفاده

1. Andrade, C. W., S. M. Montenegro, A. A. Montenegro, J. R. Lima, R. Srinivasan and C. A. Jones. 2021. Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology* 41(S1): :E1045-E061.
2. Babaeian, I. and M. Kuhl. 2012. Assessment of Agricultural Climate Indicators under Climate Change Scenarios at Selected Stations of Khorasan Razavi. *Water and Soil*. 26(4):953-67 (in Farsi).
3. Babaeian, I., Z. Najafi Nik, F. Zabol Abbasi, M. Habibi Nokhandan, H. Adab and S. Malbousi. 2009. Assessing the country's climate change in the period 2010 to 2039 using the exponential scale of model data ECHO-G Atmospheric Circulation. *Geography and Development*, 16:152-135 (in Farsi).
4. Change, I. C. 2007. The physical science Basis. contribution of working group i to the fourth assessment. *Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 996.
5. Ficklin, D. L., Y. Luo, E. Luedeling and M. Zhang. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*. 374(1-2):16-29.
6. Dracup, J. A. and S. Vicuna. 2005. An overview of hydrology and water resources studies on climate change: the California experience. *Impacts of Global Climate Change*. 1-12.
7. Feyissa, G., G. Zeleke, W. Bewket and E. Gebremariam. 2018. Downscaling of future temperature and precipitation extremes in Addis Ababa under climate change. *Climate*, 6(3):58.

8. Ghiami-Shamami, F., A. A. Sabziparvar and S. Shinoda. 2019. Long-term comparison of the climate extremes variability in different climate types located in coastal and inland regions of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 1;136:875-97 (in Farsi).
9. Griffies, S. M., M. Winton, L. J. Donner, L. W. Horowitz, S. M. Downes, R. Farneti, A. Gnanadesikan, W. J. Hurlin, H. C. Lee, Z. Liang and J. B. Palter. 2011. The GFDL CM3 coupled climate model: characteristics of the ocean and sea ice simulations. *Journal of Climate*, 24(13):3520-3544.
10. Jahanbakhsh Asl, S., A. Khorshiddoust, M. Alinejad, F. Pourasghr. 2016. Impact of Climate Change on Precipitation and Temperature by Taking the Uncertainty of Models and Climate Scenarios (Case Study: Shahrchay Basin in Urmia). *Hydrogeomorphology*, 3(7): 107-122 (in Farsi).
11. Jeong, D. I., B. Yu and A. J. Cannon. 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.
12. Li, X., X. Wang and V. Babovic. 2018. Analysis of variability and trends of precipitation extremes in Singapore during 1980–2013. *International Journal of Climatology* 38(1):125-141..
13. Masah Bowani, A. and S. Merid. 2014. The effects of climate change on the flow of Zayandeh River in Isfahan. *Water and Soil Sciences (Agricultural Sciences and Techniques and Natural Resources)*. 9(4):17-27 (in Farsi).
14. Nie, H., T. Qin, H. Yang, J. Chen, S. He, Z. Lv and Z. Shen. 2019. Trend analysis of temperature and precipitation extremes during winter wheat growth period in the major winter wheat planting area of China. *Atmosphere*, 10(5):240.
15. Osman, Y., N. Al-Ansari, M. Abdellatif, S. B. Aljawad and S. Knutsson. 2014. Expected future precipitation in central Iraq using LARS-WG stochastic weather generator. *Engineering*, 6(13):948-959.
16. Ouyang F, Zhu Y, Fu G, Lü H, Zhang A, Yu Z, Chen X. Impacts of climate change under CMIP5 RCP scenarios on streamflow in the Huangnizhuang catchment. *Stochastic environmental research and risk assessment*. 2015 Oct;29:1781-95.
17. Reddy, N., N. S. Patil and M. Nataraja. 2021. Assessment of climate change impacts on precipitation and temperature in the Ghataprabha sub-basin using CMIP5 models. *MAPAN*. 36:1-10.
18. Riahi, K., A. Grübler and N. Nakicenovic. 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change*, 74(7):887-935.
19. Roshan, G. 2006. Synoptic study of pervasive floods in Gorganrood basin, Master Thesis, University of Tehran, Tehran, I.R. Iran (in Farsi).
20. Salehpour Laghani, J., A. Ashrafzadeh and S. Mousavi. 2017. Evaluation of the effect of climate change on meteorological variables in the Hablehroud watershed using the LARS-WG model. The first international conference of the Silk Road Geographic Information System, Esfahan, Iran (in Farsi).
21. Salman, S. A., S. Shahid, T. Ismail, E. S. Chung and A. M. Al-Abadi. 2017. Long-term trends in daily temperature extremes in Iraq. *Atmospheric Research*, 198:97-107 (in Farsi).
22. ShahKarami, N., S. Murid, A. Massah Boani, H. Fahimi. 2008. The effect of uncertainty of AOGCM models on the risk of change in water demand of agricultural products due to climate change in Zayandehrood irrigation network. *Iranian Journal of Irrigation and Drainage*. 2: 1-10 (in Farsi).
23. Steele-Dunne, S., P. Lynch, R. McGrath, T. Semmler, S. Wang, J. Hanafin and P. Nolan. 2008. The impacts of climate change on hydrology in Ireland. *Journal of hydrology*, 356(1-2):28-45.
24. Tan, M. L., Z. Yusop, V. P. Chua and N. W. Chan. 2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research*, 189:1-10.
25. Thomson, A. M., K. V. Calvin, S. J. Smith, G. P. Kyle, A. Volke, P. Patel, S. Delgado-Arias, B. Bond-Lamberty, M. A. Wise, L. E. Clarke and J. A. Edmonds. 2011. RCP4. 5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*. 109:77-94.
26. Volodin, E.M., N. A. Diansky and A. V. Gusev. 2013. Simulation and prediction of climate changes in the 19th to 21st centuries with the Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences, model of the Earth's climate system. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 49:347-66.
27. Wilby, R. L. and C. W. Dawson. 2004. Using SDSM version 3.1—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *User Manual*, 8:1-7.
28. Ziaei, N., M. Onagh, H. Asgari, A. Massah Boani, A. Salman Mahini, M. Hossein Alizadeh. 2017. Comparison of the effect of climate change scenarios on the severity of risk and desertification risk of Hablehroud Basin, Tehran Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 16(6): 105-118 (in Farsi).

Climate Change Assessment of Hablehroud Watershed Using Downscaling of CanESM2 General Circulation Model Data

M. Naderi^{1*}, V. Sheikh¹, A. Bahreghand¹, C. B. Komaki², A. Ghangermeh³

(Received: July 4-2023 ; Accepted: October 7-2023)

Abstract

Greenhouse gases and the occurrence of climate change have occurred with the development of technology and the industrialization of human societies. long-term forecasting of climate parameters has always been interesting due to the importance of climate change for the earth and its inhabitants. General Circulation Models (GCMs) are one of the most widely used methods for evaluating future climate conditions. In the present study, the results of three general circulation models including the American model of GFDL-CM3, the Canadian model of CanESM2, and the Russian model of Inmcm4ncml for the study area were evaluated and the CanESM2 model was selected as the superior model. The RCP scenarios 2.6, 4.5, and RCP 8.5 were used with the CanESM2 model to assess climate change conditions across the Hablehroud River basin for the period 2020-2051. According to the results, the total monthly precipitation shows an increasing trend in the coming decades 2020-2051 period compared to the period 1986-2017. The results of the study of temperature changes in the period 2020-2051 in the Hablehroud River basin also indicate an increase in the monthly average of maximum and minimum temperatures in the coming decades. The consequences of these conditions are of great hydrological importance in the study area, this condition necessitates the adoption of climate change adaptation policies in this watershed.

Keywords: Climate change, Precipitation, Temperature, Downscaling, RCP, CanESM, SDSM

1. Department of Watershed Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran.

2. Department of Desert Management, Faculty of Pasture and Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran.

3. Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

*: Corresponding author, Email: sheikh@gau.ac.ir