

بررسی اثر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی دما و بارش در حوضه سفیدرود بر اساس مدل‌های CMIP6

محمد جواد زارعیان^{۱*}، رضا سراج ابراهیمی^۲ و حسین دهبان^۱

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۳/۱۳)

چکیده

در این مطالعه، اثر تغییر اقلیم بر دمای حداکثر و حداکثر بارش روزانه در ۱۶ ایستگاه هواشناسی واقع در حوضه آبریز سفیدرود، در دوره زمانی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲ بررسی شده است. بدین منظور ۱۰ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC (CMIP6) بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی (سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴)، رتبه‌بندی شدند. سپس خروجی دمای حداکثر و بارش روزانه مربوط به بهترین مدل در هر ایستگاه، با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG تحت سه سناریوی انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 در دوره زمانی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲، استخراج شدند. همچنین از آزمون من-کندال (در سطح آماری ۹۵ درصد) جهت بررسی روند تغییر در متوسط سالانه دمای حداکثر و بارش حداکثر استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف AOGCM در نواحی مختلف حوضه، دارای دقت‌های متفاوتی در شبیه‌سازی دمای حداکثر و بارش هستند و دقت‌های آن‌ها در شبیه‌سازی دما بهتر از شبیه‌سازی بارش بودند. به‌طور کلی، مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی دمای حداکثر و مدل HadGEM3-GC31-LL بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش نشان دادند. همچنین نتایج نشان دادند که متوسط سالانه دمای حداکثر در سناریوهای انتشار مختلف بین ۰/۹ تا ۲/۸ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. متوسط حداکثر بارش سالانه نیز در سناریوهای انتشار مختلف، بین ۶/۸- تا ۱۷/۷ میلی‌متر تغییر خواهد کرد...

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، حوضه سفیدرود، مقادیر حدی، مدل AOGCM

۱. پژوهشکده مطالعات و تحقیقات منابع آب، موسسه تحقیقات آب، تهران

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد، نجف‌آباد، ایران

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: m.zareian@wri.ac.ir

مقدمه

یکی از مهمترین فرایندهایی که موجب تأثیر قابل توجه بر اکوسیستم کلی کره زمین شده است، تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم منجر به تغییر در فرایندهای آب و هوایی زمین شده است و این تغییر به طور قابل ملاحظه‌ای بر وضعیت آب و هوا و اقلیم نواحی مختلف جهان، اثرگذار بوده است. دامنه و شدت این اثرات به نحوی است که تلاش‌های مختلفی در سطح جهان جهت شناسایی هر چه بیشتر عوامل ایجادکننده تغییر اقلیم و همچنین راهکارهای مدیریت و سازگاری با آن شکل گرفته است (۱۵ و ۱۶).

یکی از بارزترین اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آب و هوایی کره زمین را می‌توان در اثرگذاری این پدیده بر متغیرهای آب و هواشناسی دانست. دما و بارندگی دو متغیر اصلی هواشناسی هستند که تأثیر تغییر اقلیم بر آن‌ها طی چند دهه گذشته و بر اساس مطالعات و بررسی‌های مختلف، به اثبات رسیده است (۲۳). طی ۱۰۰ سال گذشته دمای زمین در حدود ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است و پیش‌بینی می‌شود در صورت ادامه‌دار بودن روند انتشار گازهای گلخانه‌ای (که عامل اصلی ایجاد تغییر اقلیم به شمار می‌روند)، تا پایان قرن حاضر دمای زمین ۱/۵ درجه سانتی‌گراد دیگر نیز افزایش پیدا نماید (۱۹). از طرف دیگر مقدار بارندگی‌ها نیز در نواحی مختلف زمین در اثر تغییر اقلیم کاهش یا افزایش پیدا کرده است. علاوه بر تغییر در مقدار دما و بارش، تغییر اقلیم الگوهای دما و بارش را نیز به طور محسوسی تغییر داده است. به‌عنوان مثال، حداقل‌ها و حداکثرهای دما، موج‌های حرارتی، نوع بارندگی‌ها (برف یا باران) و زمان وقوع بارش‌ها در نواحی مختلف جهان در اثر تغییر اقلیم، دچار تغییرات قابل توجهی شده‌اند (۸ و ۲۵).

یکی از مهمترین متغیرهای هواشناسی که تغییر اقلیم می‌تواند باعث اثرگذاری بر مقدار آن شود، دمای حداکثر است. این متغیر به نحو قابل توجهی بر مؤلفه‌های مدیریت آب تأثیرگذار است. افزایش مصرف آب در اثر افزایش دمای حداکثر، وقوع تنش‌های آبی در مصارف مختلف و همچنین

اثرگذاری قابل توجه بر مصرف آب و تنش‌های آبی محصولات کشاورزی (به‌دلیل افزایش تبخیر و تعرق)، از مهم‌ترین مواردی هستند که در اثر تغییر در دمای حداکثر، به وقوع خواهند پیوست. تأمین آب بیشتر برای جبران افزایش مصرف آب ناشی از افزایش دمای حداکثر، به نوبه خود باعث برهم خوردن تعادل در عرضه و تقاضای آب خواهد شد (۳ و ۲۶).

علاوه بر دمای حداکثر، بارندگی نیز متغیر دیگر مهم هواشناسی است که مقادیر حدی آن در اثر تغییر اقلیم ممکن است تغییر پیدا کنند. در مقیاس روزانه، تغییر در مقدار بارش در اثر تغییر اقلیم، موجب برهم خوردن برنامه‌ریزی‌های جاری در خصوص عرضه و تقاضای آب می‌شود. همچنین در صورتی که تغییر اقلیم موجب افزایش مقدار بارش و شدت‌های آن شود، مخاطراتی نظیر وقوع جریان‌های سیلابی را در نواحی مختلف ایجاد خواهد کرد (۱۷).

بر اساس توضیحات قبلی مشخص است که تغییر در مقادیر حدی دمای حداکثر و بارش، می‌تواند به‌طور قابل ملاحظه‌ای فرایندهای فعلی مدیریت منابع و مصارف آب را در نقاط مختلف جهان تحت تأثیر قرار دهد. این تأثیرات را می‌توان در دو قالب اثرگذاری بر عرضه و تقاضای آب و همچنین وقوع مخاطرات حدی اقلیمی جستجو کرد. در چنین شرایطی نمی‌توان مدیریت منابع آب را در نواحی مختلف بر اساس الگوهای فعلی دنبال کرد و لازم است رویکردهای سازگاری با تغییر اقلیم با هدف انطباق سیستم‌های مدیریت منابع آب با شرایط حدی جدید آب و هوایی، در نظر گرفته شوند (۲۱ و ۲۷).

تاکنون مطالعات مختلفی به‌منظور بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای حدی دما و بارش در نواحی مختلف دنیا صورت گرفته است. در بسیاری از این مطالعات سعی شده است تا با استفاده از نتایج و خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس یا AOGCM (Atmosphere-Ocean General Circulation Model)، مقدار تغییر در مقادیر حدی دما و بارش در دوره‌های زمانی آتی تحت سناریوهای انتشار مختلف شبیه‌سازی شود. حسن و هاشیم (۲۰۲۰) تغییرات دمای حداکثر را در عراق را با استفاده از مدل‌های HadCM3 و CanESM2 و تحت سناریوهای انتشار

موج‌های گرمایی در چهار شهر هند با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که وقوع موج‌های گرمایی در سناریوهای انتشار SSP370 و SSP585 تا سال ۲۱۰۰ افزایش پیدا خواهد کرد (۶).

انصاری و همکاران (۲۰۲۲) با انجام یک مطالعه به بررسی دقت ۱۰ مدل CMIP6 در برآورد دما و بارش ۱۳۸ ایستگاه هواشناسی در سطح ایران پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، این مدل‌ها در نواحی مختلف ایران دارای عملکرد متفاوتی بودند. به‌عنوان نمونه مدل BCC-CSM2-MR در نواحی شرقی و مدل IPSL-CM6A-LR در نواحی شمالی بالاترین دقت را در برآورد دمای دوره تاریخی دارا بودند (۲). همچنین مدل HadGEM3-GC31-LL در نواحی شرقی و مدل MIROC6 در نواحی شمالی بهترین دقت را در برآورد بارش از خود نشان دادند. کدخدا و همکاران (۲۰۲۳) طی انجام یک پژوهش به بررسی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما، رطوبت نسبی و سرعت باد در نواحی مختلف ایران پرداختند. نتایج نشان داد که از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل‌های GFDL-CM4 و MPI-ESM1-2-HR بالاترین دقت را برای شبیه‌سازی داده‌های مورد اشاره در ایران دارا هستند (۱۲).

بر اساس مرور تحقیقات گذشته مشخص است که استفاده از مدل‌های AOGCM یکی از روش‌های اصلی برای برآورد اثر تغییرات اقلیم بر مقادیر حدی اقلیمی است. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی مقادیر اقلیمی در لایه‌های مختلف جو بر اساس قوانین فیزیکی و جوی مختلف، هستند. تاکنون نسخه‌های مختلفی از نتایج این مدل‌ها در قالب گزارشات ارزیابی توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) منتشر شده است که گزارش ششم IPCC (AR6)، ششمین فاز از این نتایج این مدل‌ها (CMIP6) را ارائه داده است (۱۰). یا این وجود، قبل از استفاده از خروجی این مدل‌ها بایستی مدل بهینه انتخاب و شبیه‌سازی‌های آتی بر اساس آن صورت پذیرد. مبنای بسیاری از این مطالعات، رتبه‌بندی این مدل‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در دوره تاریخی است (۱۱ و ۲۸).

مربوط به چهارمین و پنجمین گزارش ارزیابی IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) بررسی کردند. نتایج نشان داد که دمای حداکثر تا پایان قرن ۲۱ و در نواحی مختلف عراق، بین ۰/۳ تا ۱/۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت و مدل HadCM3 این افزایش را بیشتر از سایر مدل‌ها برآورد کرد (۹). فلاح قاهره و همکاران (۲۰۱۹)، با استفاده از نتایج مدل‌های MPI-ESM و CanESM2 مربوط به گزارش پنجم IPCC و تحت سه سناریوی انتشار RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5، نتیجه گرفتند که تا پایان قرن ۲۱، دمای ماکزیمم در نواحی مختلف ایران ممکن است تا ۱/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش یابد (۴). تیبولت و ست (۲۰۱۴) با انجام مطالعه‌ای در خصوص اثر تغییر اقلیم بر شاخص‌های حدی هواشناسی در ایالات متحده آمریکا با استفاده از مدل‌های CMIP5 نتیجه گرفتند که تا سال ۲۰۷۰، بیشترین افزایش در شدت بارش برای مناطق شمالی، ساحلی و کوهستانی این کشور قابل پیش‌بینی است (۲۵). همچنین ژو و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل‌های CMIP6 به بررسی تغییرات مقادیر حدی بارش و دما در چین تا سال ۲۱۰۰ پرداختند. بر اساس نتایج به دست آمده، دمای حداکثر در برخی از نواحی چین تا ۵/۶ درجه سانتی‌گراد (سناریوی SSP585) افزایش پیدا خواهد کرد. همچنین تعداد روزهای با بارش سنگین نیز تا ۱/۵ برابر افزایش پیدا خواهند کرد (۳۰).

نتایج مطالعه گائو و همکاران (۲۰۲۰) که در حوزه رودخانه کیو چین (Qu River basin) انجام گرفت، نشان داد که فراوانی وقوع رویدادهای بارندگی شدید تا پایان قرن ۲۱، در اثر تغییر اقلیم افزایش می‌یابد و این موضوع ممکن است باعث افزایش خطر سیل در منطقه شود (۵). المزروعی و همکاران (۲۰۲۱) به تحلیل مقادیر حدی برخی متغیرهای هواشناسی در نواحی مختلف قاره آمریکا با استفاده از خروجی مدل‌های CMIP6 پرداختند. نتایج نشان داد که احتمال وقوع مقادیر حدی دما و بارش در منطقه افزایش پیدا خواهد کرد (۱). گویال و همکاران (۲۰۲۳) نیز اثر تغییر اقلیم را بر

مطالعه انتخاب شده است. این حوضه دارای مساحت ۵۹۵۰۰ کیلومتر مربع بوده و در محدوده طول‌های جغرافیایی ۳۷° ۳۷' تا ۴۶° ۱۳' شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۵° ۰۰' تا ۵۵° ۳۷' شمالی قرار گرفته است. این حوضه شامل سه قسمت بالایی حوضه (بالتر از ایستگاه قره‌گونی و شاخه‌های واقع در استان کردستان)، قسمت میانی (از روستای استور تا قره‌گونی و شاخه شاهرود) و قسمت پائینی (از روستای استور تا محل خروجی آن به دریای خزر) است. سفیدرود رودخانه اصلی این حوضه می‌باشد که از دو شاخه اصلی قزل‌اوزن و شاهرود تشکیل شده است. این حوضه شامل بخش‌هایی از استان‌های زنجان و کردستان، آذربایجان شرقی، اردبیل، گیلان، قزوین و البرز، آذربایجان غربی، مازندران و همدان را در بر می‌گیرد و بدین لحاظ یک حوضه پراهمیت و پیچیده از لحاظ مدیریت منابع و مصارف آب به شمار می‌آید. شکل ۱ موقعیت حوضه آبریز سفیدرود را در بخش شمالی ایران نشان می‌دهد.

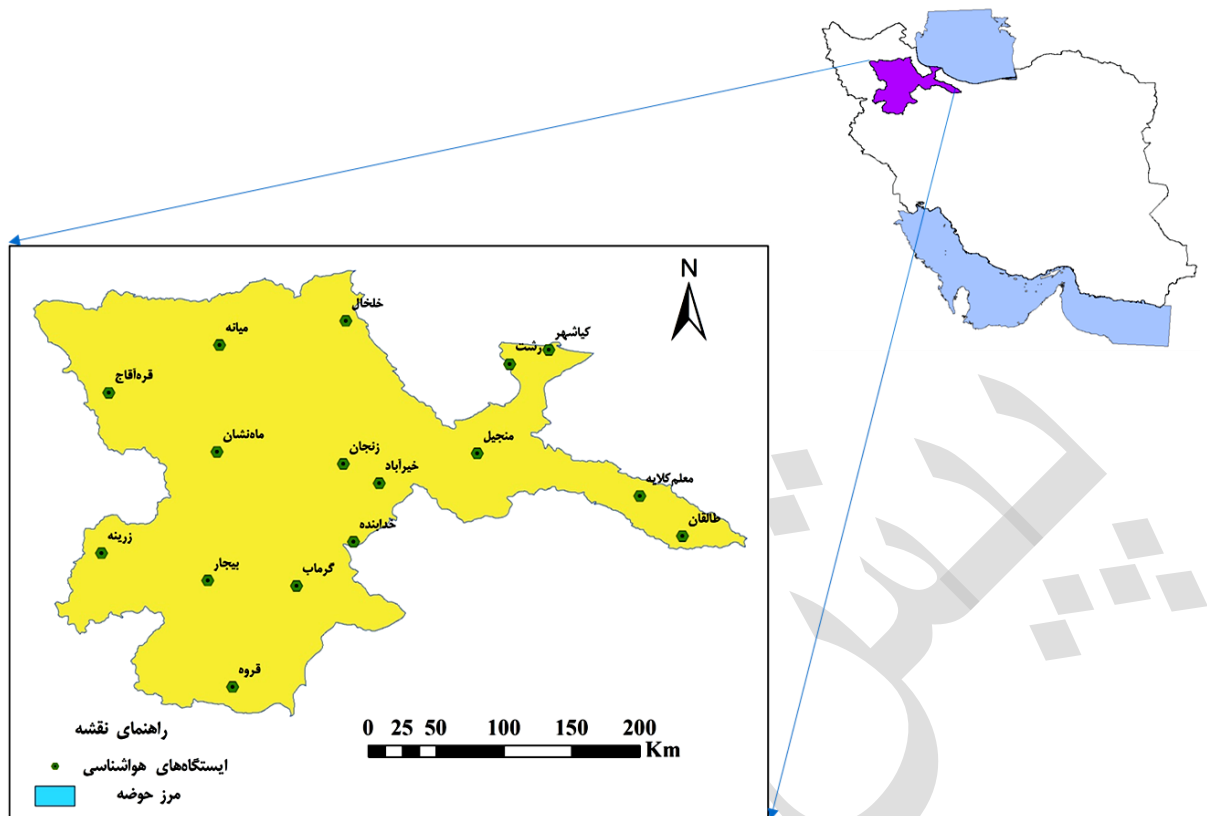
در این تحقیق از اطلاعات خروجی ۱۰ مدل AOGCM مربوط به ششمین گزارش ارزیابی IPCC استفاده شد. مشخصات مدل‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است. اطلاعات استخراج شده از این مدل‌ها شامل دو متغیر دمای حداکثر و بارش در دوره‌های تاریخی (سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) و دوره آینده (سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲) بود. این اطلاعات از سایت مرکز توزیع داده‌های IPCC استخراج شد. از اطلاعات استخراج شده در دوره تاریخی برای ارزیابی دقت مدل‌های AOGCM در شبیه‌سازی دما و بارش مشاهداتی منطقه استفاده شد. برای انجام این ارزیابی از داده‌های مشاهداتی دمای حداکثر و بارش ۱۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک واقع در سطح حوضه استفاده شد. مشخصات این ایستگاه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین پراکندگی این ایستگاه‌ها در سطح حوضه نیز، قبلاً در شکل ۱ نشان داده شده است. انتخاب این ایستگاه‌ها به‌صورتی انجام گرفت تا علاوه بر پوشش مختلف نواحی مختلف حوضه، دارای طول دوره آماری مناسب برای داده‌های دمای حداکثر و بارش نیز باشند.

مرور تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات زیادی در خصوص استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو برای شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در نقاط مختلف ایران صورت گرفته است. در بسیاری از این مطالعات سعی شده است تا این مدل‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی رتبه‌بندی شوند. با این وجود در این تحقیق علاوه بر استفاده از نتایج خروجی سری ششم این مدل‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها برای شبیه‌سازی دمای حداکثر و بارش، به شبیه‌سازی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای حدی پرداخته شده است. به عبارت دیگر علاوه بر بررسی دقت این مدل‌ها، تحلیل‌های مربوط به دوره آینده نیز بر وقایع حدی دما و بارش (و نه مقدار متوسط آن‌ها) متمرکز بوده است. با این وجود یکی از عواملی که می‌توان به‌عنوان محدودیت کار عنوان کرد، نیاز به ایستگاه‌های هواشناسی بیشتر با طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه است تا بتوان بر اساس آن پهنه‌بندی مناسب‌تری از متغیرهای مورد بررسی (دمای و بارش حداکثر) ارائه کرد. همچنین بایستی به عدم قطعیت حاکم بر سناریوهای انتشار مختلف توجه داشت و آن را در برنامه‌ریزی‌های آتی مدنظر قرار داد.

حوضه آبریز سفیدرود، یکی از حوضه‌های آبریز مهم واقع در شمال ایران است که استان‌های زیادی را در بر گرفته و مراکز مهم جمعیتی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیز در این حوضه واقع شده‌اند. اطلاع از اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت آبی متغیرهای حدی در این حوضه، یک موضوع مهم برای مدیریت بهینه منابع و مخاطرات آبی در این منطقه به شمار می‌رود. لذا در این مطالعه ضمن بررسی و انتخاب بهترین مدل‌های AOGCM مربوط به سری CMIP6 برای شبیه‌سازی دمای حداکثر و بارش در حوضه سفیدرود، اثرات تغییر اقلیم بر متوسط سالانه دمای حداکثر و بارش حداکثر نیز تحت سناریوهای انتشار مختلف، بررسی شده‌اند.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، حوضه آبریز سفیدرود به‌عنوان منطقه مورد



شکل ۱. موقعیت حوضه آبریز سفیدرود و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

جدول ۱. خصوصیات مدل‌های AOGCM مورد استفاده در تحقیق

ردیف	نام مدل	نام مرکز تحقیقاتی توسعه‌دهنده	دقت تفکیک (درجه)
۱	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center, China Meteorological Administration	$1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$
۲	CAMS-CSM1-0	Chinese Academy of Meteorological Sciences, China	$1/1^{\circ} \times 1/1^{\circ}$
۳	CESM2	Community Earth System Model Contributors	$1/25^{\circ} \times 0/94^{\circ}$
۴	CMCC-ESM2	Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici	$1/1^{\circ} \times 1/1^{\circ}$
۵	CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)	$1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$
۶	GFDL-ESM4	NOAA-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	$1/3^{\circ} \times 1/0^{\circ}$
۷	HadGEM3-GC31-LL	Meteorological Office Hadley Centre	$1/88^{\circ} \times 1/25^{\circ}$
۸	IPSL-CM6A-LR	Institute Pierre-Simon Laplace	$2/5^{\circ} \times 1/26^{\circ}$
۹	MIROC6	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	$1/4^{\circ} \times 1/4^{\circ}$
۱۰	MRI-EMS2-0	Meteorological Research Institute	$1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$

جدول ۲. ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک منتخب در حوضه سفیدرود به همراه مقادیر متوسط سالانه دمای حداکثر و بارش حداکثر طی دوره تاریخی (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵)

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)	حداکثر دمای مطلق (°C)	حداکثر بارش روزانه (mm)
۱	طالقان	۵۰° ۴۶'	۳۶° ۱۰'	۱۸۵۷	۳۳/۶	۳۵/۶
۲	خلخال	۴۸° ۳۱'	۳۷° ۳۶'	۱۷۹۷	۳۲/۹	۶۶/۱
۳	میانه	۴۷° ۴۲'	۳۷° ۲۷'	۱۱۱۰	۳۳/۶	۵۰/۴
۴	قره‌آغاج	۴۶° ۵۷'	۳۷° ۰۷'	۱۳۰۲	۳۳/۱	۳۸/۴
۵	کیاشهر	۴۹° ۵۲'	۳۷° ۲۴'	-۲۲	۳۳	۶۵/۱
۶	رشت	۴۹° ۳۷'	۳۷° ۱۹'	-۸	۳۳/۳	۵۱/۳
۷	منجیل	۴۹° ۲۴'	۳۶° ۴۳'	۳۳۸	۳۲/۱	۵۳/۵
۸	زرینه	۴۶° ۵۴'	۳۶° ۰۳'	۲۱۴۲	۳۱/۱	۵۲/۹
۹	بیجار	۴۷° ۳۷'	۳۵° ۵۲'	۱۸۱۳	۳۱/۲	۳۶/۲
۱۰	قروه	۴۷° ۴۶'	۳۵° ۱۰'	۱۹۰۶	۳۰/۸	۴۶/۳
۱۱	معلم‌کلیه	۵۰° ۲۸'	۳۶° ۲۶'	۱۶۲۹	۳۴	۴۸/۷
۱۲	ماه‌نشان	۴۷° ۴۰'	۳۶° ۴۴'	۱۲۸۴	۳۲/۷	۴۰/۳
۱۳	زنجان	۴۸° ۳۱'	۳۶° ۳۹'	۱۶۵۹	۳۱/۶	۴۷/۳
۱۴	خیرآباد	۴۸° ۴۵'	۳۶° ۳۱'	۱۷۶۷	۳۱/۲	۴۸/۲
۱۵	خدابنده	۴۸° ۳۴'	۳۶° ۰۸'	۱۸۸۷	۳۱/۲	۴۶/۲
۱۶	گرماب	۴۸° ۱۲'	۳۵° ۵۰'	۱۶۳۲	۳۱/۸	۴۳/۳

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad (1)$$

که در این معادله، α نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهده شده، β نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی شده به مقادیر مشاهده شده و r ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی است که از معادله (۲) محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}} \quad (2)$$

که در آن، S_i و O_i به ترتیب داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی (دما و بارش) در هر ایستگاه هواشناسی هستند.

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های مختلف AOGCM در شبیه‌سازی دمای حداکثر و بارش در هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی منتخب طی دوره زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴، از شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا یا KGE (Kling-Gupta) استفاده شد. شاخص KGE علاوه بر سنجش عملکرد مدل‌های هیدرولوژیک و هواشناسی، می‌تواند برای مقایسه عملکرد چندین مدل هیدرولوژیک که برای شبیه‌سازی یک مؤلفه خاص استفاده می‌شوند، به کار رود. مدلی که بالاترین مقدار KGE را داشته باشد، به طور کلی عملکرد بهتری دارد. این شاخص با استفاده از معادله (۱) قابل محاسبه است (۷ و ۱۴):

مقدار شاخص KGE بین $-\infty$ تا ۱ تغییر کرده و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیکتر باشد، دقت مدل مورد نظر در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، بهتر خواهد بود (۷ و ۱۴). این مقایسه برای هر مدل و هر کدام از متغیرهای دمای حداکثر و بارش در هر ایستگاه هواشناسی انجام گرفت و بر اساس آن بهترین مدل AOGCM در هر کدام از ایستگاه‌ها انتخاب شد تا جهت سناریوسازی در طی دوره آتی استفاده شود. به عبارت دیگر رتبه‌های تخصیص داده شده به مدل‌ها بین ۱ تا ۱۰ متغیر بود و به مدل با بالاترین دقت رتبه ۱ و به مدل با کمترین دقت رتبه ۱۰ تعلق گرفت. این رتبه‌ها به‌عنوان وزن هر کدام از مدل‌ها در نظر گرفته شدند.

پس از تولید سری روزانه متغیرهای دمای حداکثر و حداکثر بارش روزانه در دوره آینده، جهت بررسی معنی‌دار بودن روند تغییرات آن‌ها از آزمون من- کندال (در سطح آماری ۹۵ درصد) استفاده شد. این آزمون یکی از پرکاربرترین آزمون‌های نا پارامتریک برای تحلیل روند داده‌ها است و تغییرات مقدار مرکزی یک سری زمانی را نسبت به زمان مشخص می‌کند. آزمون من- کندال به دلیل تطبیق‌پذیری بالا در تحلیل روند، به‌صورت برای داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی به‌عنوان آزمون تحلیل روند مناسب در این تحقیق انتخاب شد. این آزمون بر خلاف بسیاری از آزمون‌های پارامتری، نیازی نرمال بودن داده‌ها ندارد و این موضوع استفاده از این آزمون را برای داده‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی مناسب می‌سازد. علاوه بر این، آزمون من- کندال در شرایط وجود داده‌های پرت نیز می‌تواند دقت قابل قبولی ارائه دهد (۱۸ و ۲۳).

برای محاسبه آماره آزمون من- کندال از معادلات (۳) تا (۷) استفاده می‌شود:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (3)$$

که x_i مقدار داده i ام، در طول دوره آماری و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت است. به ازای $n \geq 8$ آماره دارای توزیع نرمال بوده و میانگین و واریانس آن به ترتیب با استفاده از معادلات (۴) و (۵) محاسبه می‌شوند:

$$E(S) = 0 \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n - (n-1)(2\pi+5) - \beta}{18} \quad (5)$$

که β عاملی مربوط به تصحیح پراکندگی است و در صورتی که داده‌های تکراری در سری مورد بررسی وجود داشته باشد از

مقدار شاخص KGE بین $-\infty$ تا ۱ تغییر کرده و هر چه مقدار آن به ۱ نزدیکتر باشد، دقت مدل مورد نظر در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، بهتر خواهد بود (۷ و ۱۴). این مقایسه برای هر مدل و هر کدام از متغیرهای دمای حداکثر و بارش در هر ایستگاه هواشناسی انجام گرفت و بر اساس آن بهترین مدل AOGCM در هر کدام از ایستگاه‌ها انتخاب شد تا جهت سناریوسازی در طی دوره آتی استفاده شود. به عبارت دیگر رتبه‌های تخصیص داده شده به مدل‌ها بین ۱ تا ۱۰ متغیر بود و به مدل با بالاترین دقت رتبه ۱ و به مدل با کمترین دقت رتبه ۱۰ تعلق گرفت. این رتبه‌ها به‌عنوان وزن هر کدام از مدل‌ها در نظر گرفته شدند.

پس از تعیین رتبه مدل‌های AOGCM، متوسط تغییرات متغیرهای دمای حداکثر و بارندگی طی دوره آتی (سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴) در هر کدام از ایستگاه‌های هواشناسی با استفاده از خروجی بهترین مدل در هر ایستگاه، استخراج شد. این خروجی‌ها برای سه سناریوی انتشار SSP126، SSP245 و SSP585 استخراج شدند. سناریوهای انتشار به‌طور کلی حاوی اطلاعاتی از وضعیت اقتصادی- اجتماعی و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر کره زمین است و در برگیرنده طیف وسیعی از تغییرات رشد جمعیت انسان در آینده، عوامل اقتصادی و تکنولوژیکی مؤثر بر انتشار گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق است. در حالت کلی میزان واداشت تابشی که منجر به تشدید گرمایش زمین خواهد شد، در سناریوی انتشار SSP585 بیشتر از سناریوی SSP245 و در سناریوی SSP245 نیز بیشتر از سناریوی SSP126 است.

در مرحله بعد جهت استخراج سری روزانه متغیرهای دمای حداکثر و حداکثر بارش روزانه برای دوره آینده و تحت سناریوهای انتشار مختلف، از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG استفاده شد. این مدل یک مولد آب و هوای تصادفی است که در تحقیقات آب و هواشناسی جهت تولید سری‌های روزانه متغیرهای هواشناسی بر اساس سناریوهای

معادله (۶) محاسبه شده و در واریانس اعمال می شود:

$$\beta = \sum_{i=1}^m t_i (t_i - 1)(2t_i - 5) \quad (6)$$

که t_i تعداد داده های یکسان در دسته i ام است. در نهایت آماره آزمون MK یا Z با استفاده از معادله (۷) محاسبه می شود:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

فرض صفر یا فرض عدم وجود روند (H_0) به شرط $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z \leq Z_{1-\alpha/2}$ پذیرفته می شود و در غیر این صورت، H_0 رد و فرض مخالف آن یعنی وجود روند پذیرفته می شود (۱۳ و ۱۸).

نتایج و بحث

اثر تغییر اقلیم بر دمای حداکثر حوضه آبریز سفیدرود

جدول ۳ رتبه محاسبه شده برای هر کدام از مدل های AOGCM را جهت شبیه سازی دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه، در هر ماه ارائه داده است. این رتبه ها بر اساس میانگین رتبه هر کدام از مدل ها در ایستگاه های هواشناسی مختلف، محاسبه شده اند. همچنین مقادیر متوسط شاخص KGE و ضریب همبستگی نیز برای محاسبه دمای حداکثر در شکل ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می دهند که مدل های مختلف دارای توانایی متفاوتی در شبیه سازی دمای حداکثر در منطقه مورد مطالعه طی دوره تاریخی بوده اند. بر اساس نتایج به دست آمده، مدل های IPSL-CM6A-LR و MIROC6 با میانگین رتبه ماهانه ۳، بهترین عملکرد را شبیه سازی دمای حداکثر داشته اند. همچنین، مدل های CAMS-CSM1-0 و BCC-CSM2-MR به ترتیب با رتبه های ۱۰ و ۹، ضعیف ترین کارایی را در شبیه سازی دمای حداکثر منطقه مورد مطالعه طی دوره تاریخی، داشته اند.

شکل های ۳ تا ۵ به ترتیب پهنه بندی حداکثر دمای مطلق سالانه را در محدوده مورد مطالعه برای سناریوهای انتشار SSP126،

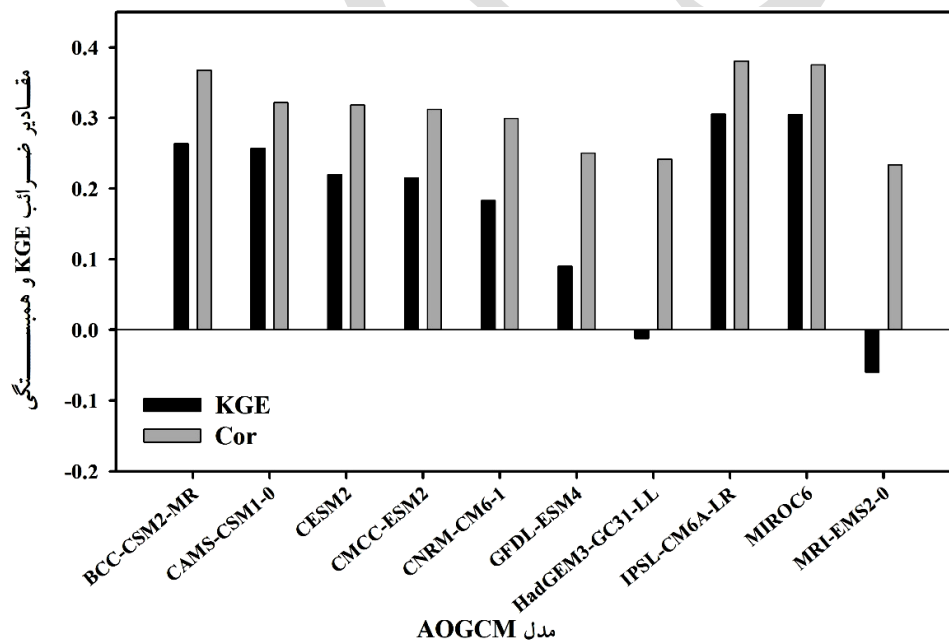
SSP245 و SSP585 طی دوره آتی (سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲) نشان داده اند. مقادیر ارائه شده در شکل های مذکور، متوسط مقادیر حداکثر مطلق سالانه دما در طی سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲ هستند. به عبارت دیگر در هر سال یک عدد به عنوان حداکثر دمای مطلق سالانه مشخص و با میانگین گیری ۳۰ ساله، یک عدد به عنوان متوسط دوره زمانی سال های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲ مشخص شد. نتایج گویای آن است که حداکثر دمای مطلق سالانه در محدوده حوضه سفیدرود و در نواحی شرقی حوضه به طور کلی بیشتر از نواحی غربی آن خواهد بود (تنها بخش کوچکی از مرزهای غربی حوضه دارای حداکثر دمای مطلق قابل توجه هستند). مقدار دمای حداکثر مطلق در سناریوی SSP126 بین ۳۲ تا ۳۶ درجه سانتی گراد، در سناریوی SSP245 بین ۳۳ تا ۳۸ درجه سانتی گراد و در سناریوی SSP585 بین ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد خواهد بود. بنابراین در حالت کلی پهنه بندی حداکثر دمای مطلق نشان دهنده آن است که مقدار این پارامتر در سناریوی SSP585 بیشتر از دو سناریوی SSP245 و SSP126 خواهد بود.

جدول ۴، متوسط تغییرات سالانه حداکثر دمای مطلق ایستگاه های هواشناسی منتخب و میزان معنی دار بودن روند آن را بر اساس آزمون من-کندل (در سطح ۹۵ درصد آماره) ارائه داده است. نتایج نشان می دهند که حداکثر دمای مطلق در تمامی سناریوهای انتشار و در تمامی ایستگاه های هواشناسی، افزایش پیدا خواهد کرد. مقدار این افزایش بین ۰/۹ تا ۲/۸ درجه سانتی گراد تغییر خواهد کرد. بر اساس نتایج به دست آمده در سناریوی انتشار SSP126، حداکثر دمای مطلق بین ۰/۹ درجه سانتی گراد (ایستگاه معلم کلاویه) و ۱/۹ درجه سانتی گراد (ایستگاه طالقان) افزایش پیدا خواهد کرد. در سناریوی انتشار SSP245 حداکثر دمای مطلق در ایستگاه های مختلف بین ۱/۲ درجه سانتی گراد (ایستگاه معلم کلاویه) تا ۲/۲ درجه سانتی گراد (ایستگاه طالقان) نوسان خواهد کرد. همچنین در سناریوی SSP585 این مقادیر بین ۲ درجه سانتی گراد (ایستگاه معلم کلاویه) و ۲/۸ درجه سانتی گراد (ایستگاه طالقان) تغییر خواهد کرد. بنابراین بر اساس نتایج به دست آمده، احتمال وقوع

جدول ۳. رتبه مدل‌های AOGCM را جهت شبیه‌سازی دمای حداکثر در حوضه سفیدرود

مدل	ماه												
	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین*
BCC-CSM2-MR	۹	۹	۱۰	۹	۹	۹	۸	۱۰	۹	۹	۹	۹	۹
CAMS-CSM1-0	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۸	۱۰	۱۰	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
CESM2	۶	۸	۸	۴	۱۰	۷	۹	۸	۵	۲	۶	۸	۷
CMCC-ESM2	۷	۲	۶	۵	۷	۸	۵	۶	۴	۶	۷	۲	۵
CNRM-CM6-1	۱	۵	۷	۸	۳	۲	۲	۷	۶	۷	۱	۵	۵
GFDL-ESM4	۳	۷	۵	۷	۴	۶	۴	۳	۸	۴	۳	۷	۵
HadGEM3-GC31-LL	۵	۱	۴	۲	۲	۳	۶	۵	۳	۸	۵	۱	۴
IPSL-CM6A-LR	۴	۳	۳	۳	۵	۱	۳	۱	۱	۳	۴	۳	۳
MIROC6	۲	۴	۲	۶	۱	۴	۱	۴	۲	۱	۲	۴	۳
MRI-EMS2-0	۸	۶	۱	۱	۶	۵	۷	۲	۷	۵	۸	۶	۵

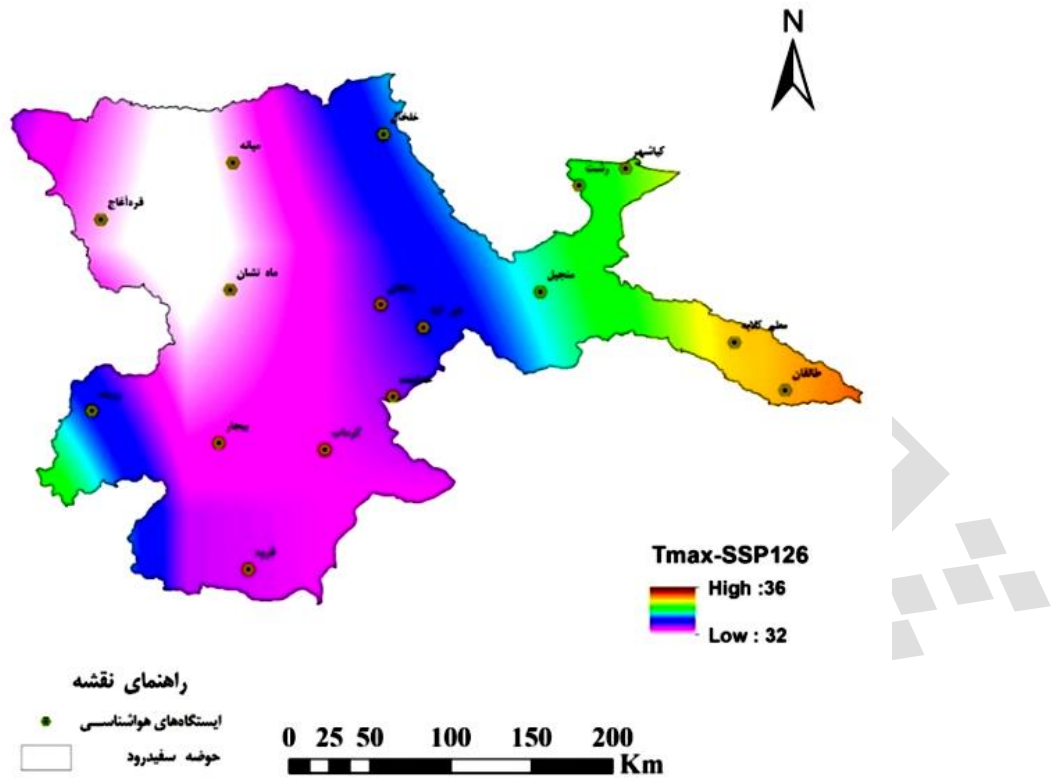
* اعداد مندرج در این ستون بر اساس میانگین‌گیری حسابی از رتبه مدل‌ها در ماه‌های مختلف محاسبه و به سمت نزدیکترین عدد صحیح رند شده‌اند.



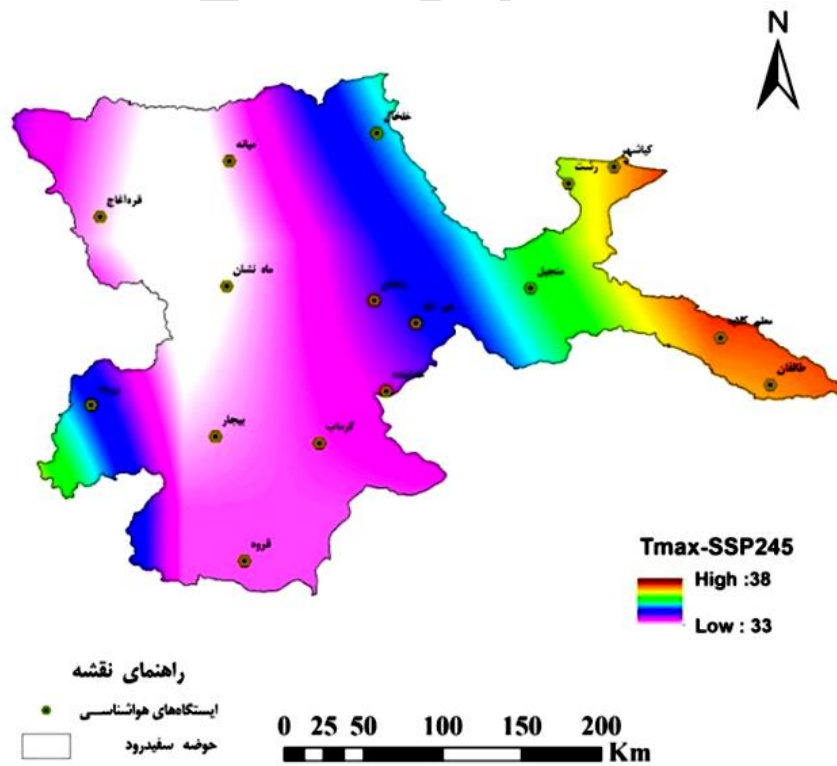
شکل ۲. مقادیر متوسط شاخص KGE و ضریب همبستگی جهت برآورد دقت مدل‌های AOGCM در تخمین دمای حداکثر

پیدا خواهد کرد. همچنین نتایج نشان‌دهنده آن است که حداکثر دمای مطلق در سناریوی انتشار SSP585 بیشتر از سایر سناریوهای انتشار افزایش پیدا خواهد کرد (جدول ۴).

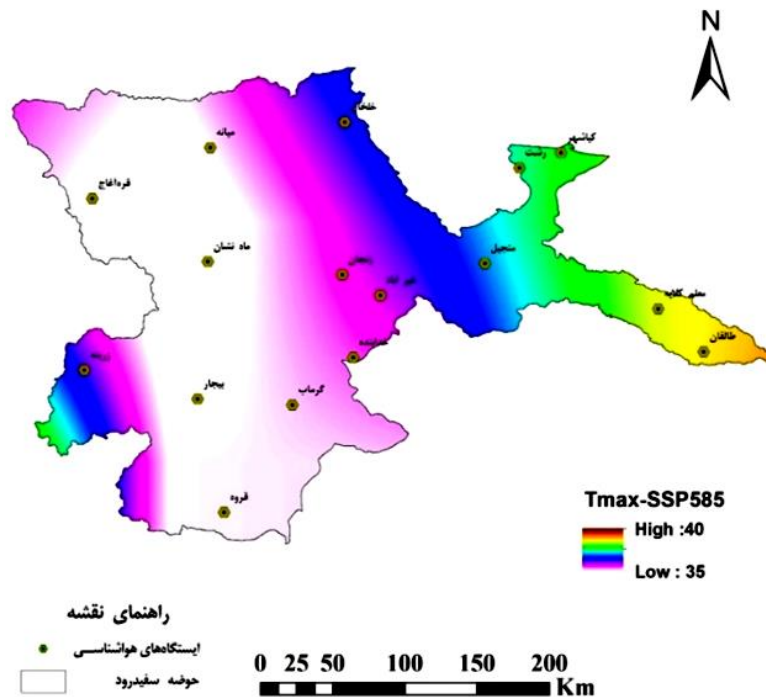
بیشترین افزایش حداکثر دمای مطلق در ایستگاه طالقان بیشتر از سایر ایستگاه‌ها است. همچنین در ایستگاه هواشناسی معلم‌کلايه، حداکثر دمای مطلق کمتر از سایر ایستگاه‌ها افزایش



شکل ۳. پهنه‌بندی حداکثر دمای مطلق محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP126 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲



شکل ۴. پهنه‌بندی حداکثر دمای مطلق محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP245 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲



شکل ۵. پهنه‌بندی حداکثر دمای مطلق محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP585 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲

جدول ۴. متوسط تغییرات سالانه حداکثر دمای ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و میزان معنی‌دار بودن روند آن

تغییرات حداکثر دمای مطلق نسبت به دوره پایه (درجه سانتی‌گراد)*			نام ایستگاه	ردیف
SSP585	SSP245	SSP126		
۲/۸*	۲/۲*	۱/۹	طالقان	۱
۲/۴*	۱/۶	۱/۳	خلخال	۲
۲/۲*	۱/۷	۱/۱	میانه	۳
۲/۴*	۱/۵	۱/۱	قره‌آغاج	۴
۲/۱*	۱/۵	۱/۳	کیاشهر	۵
۲/۳*	۱/۳	۱/۲	رشت	۶
۲/۳*	۱/۷	۱/۳	منجیل	۷
۲/۲*	۱/۸	۱/۶	زرینه	۸
۲/۵*	۲/۱*	۱/۸	بیجار	۹
۲/۵*	۲/۱*	۱/۸	قروه	۱۰
۲*	۱/۲	۰/۹	معلم‌کلاویه	۱۱
۲/۴*	۲/۱*	۱/۸	ماه‌نشان	۱۲
۲/۱*	۱/۸	۱/۲	زنجان	۱۳
۲/۵*	۱/۹	۱/۷	خیرآباد	۱۴
۲/۱*	۱/۷	۱/۶	خدابنده	۱۵
۲/۲*	۱/۸	۱/۳	گرماب	۱۶

* معنی‌دار در سطح ۹۵ درصدی آماری بر اساس آزمون من-کنندال

حداکثر بارش روزانه همچنین نشان می‌دهد که بیشترین مقدار این پارامتر در تمامی سناریوهای انتشار در نواحی شمال شرقی حوضه (عمدتاً نواحی واقع در استان گیلان) قابل پیش‌بینی است، هر چند در نواحی اندکی از غرب حوضه (نواحی از استان کردستان) نیز این مقادیر قابل توجه خواهند بود.

جدول ۶، تغییرات حداکثر بارش روزانه را طی دوره آتی (سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲) نسبت به دوره گذشته (سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵) ارائه داده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حداکثر بارش روزانه در سناریوهای انتشار مختلف، بین ۶/۸- تا ۱۷/۷ میلی‌متر تغییر خواهد کرد. به عبارت دیگر، حداکثر بارش روزانه در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی و برای برخی از سناریوها، افزایش و در برخی دیگر کاهش خواهد یافت. هر چند افزایش این متغیر در تعداد بیشتری از موارد رخ داده است. بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۶، در سناریوی انتشار SSP126، مقدار حداکثر بارش روزانه بین ۴/۱- میلی‌متر (ایستگاه خلخال) و ۱۷/۷ میلی‌متر (ایستگاه رشت)، تغییر خواهد کرد. این مقادیر در سناریوی انتشار SSP245 بین ۵/۵- میلی‌متر (ایستگاه خلخال) و ۱۵/۳ میلی‌متر (ایستگاه رشت) خواهند بود. همچنین برای سناریوی SSP585 مقادیر ذکرشده بین ۶/۸- میلی‌متر (ایستگاه خلخال) و ۱۷/۷ میلی‌متر (ایستگاه رشت)، نوسان خواهد داشت. در حالت کلی حداکثر بارش روزانه در ایستگاه‌های خلخال، کیشهر و قروه دارای کاهش و در سایر ایستگاه‌های هواشناسی افزایش خواهد داشت.

بررسی روند تغییرات حداکثر بارش روزانه (در سطح آماری ۹۵ درصد) طی دوره آتی نسبت به دوره گذشته بر اساس آزمون من- کندال نشان می‌دهد که روند افزایشی حداکثر بارش روزانه در سناریوی SSP126 در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی معنی‌دار بوده است. در این سناریو و در ایستگاه‌های خلخال، کیشهر و قروه روند کاهشی و فاقد روند معنی‌دار بوده است. در سناریوی SSP245 روند افزایشی حداکثر بارش روزانه در تمامی ایستگاه‌ها به جز خلخال، کیشهر و قروه و زنجان معنی‌دار بوده است. در این سناریو، روند کاهشی حداکثر بارش

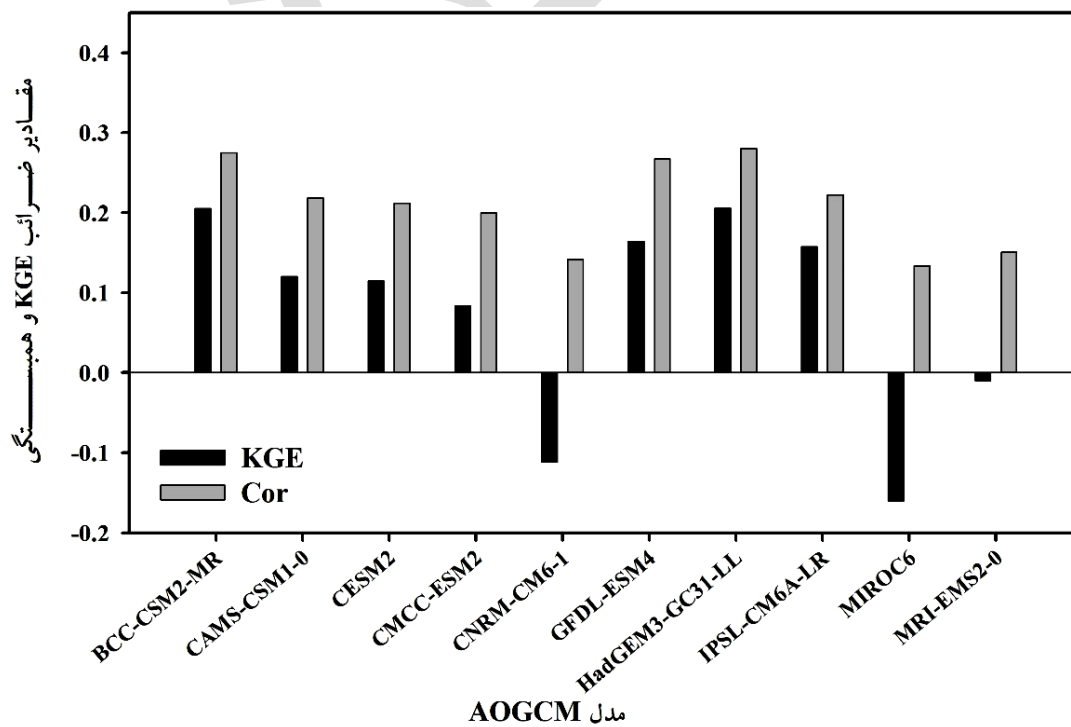
بررسی روند افزایش دمای حداکثر سالانه در ایستگاه‌های هواشناسی مختلف نشان می‌دهد که بر اساس آزمون من- کندال و در سطح آماری ۹۵ درصد، روند مشاهده‌شده در سناریوی انتشار SSP126 در هیچ‌کدام از ایستگاه‌های هواشناسی معنی‌دار نمی‌باشد. این روند برای سناریوی انتشار SSP245 در ایستگاه‌های طالقان، بیجار، قروه و ماه‌نشان معنی‌دار است. همچنین روند افزایش حداکثر دمای مطلق در تمامی ایستگاه‌های هواشناسی تحت سناریوی انتشار SSP585 معنی‌دار خواهد بود (جدول ۴).

اثر تغییر اقلیم بر حداکثر بارش روزانه حوضه آبریز سفیدرود
جدول ۵ رتبه محاسبه‌شده هر کدام از مدل‌های AOGCM را جهت برآورد بارش در ماه‌های مختلف سال و همچنین در دوره سالانه ارائه داده است. همچنین مقادیر متوسط شاخص KGE و ضریب همبستگی جهت برآورد بارش نیز در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است، مدلی که در هر دوره بیشترین توانایی را در برآورد بارش دوره تاریخی (۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵) داشته است، با رتبه ۱ و ضعیف‌ترین مدل نیز با رتبه ۱۰ مشخص شده است. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، مدل‌های BCC-CSM2-MR و HadGEM3-GC31-LL با میانگین رتبه‌های ۳ و ۴، بهترین عملکرد را در برآورد بارش روزانه در منطقه مورد مطالعه دارا هستند. همچنین مدل‌های MIROC6 و CNRM-CM6-1 با میانگین رتبه‌های ۸ و ۷، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های مختلف دارا بوده‌اند.

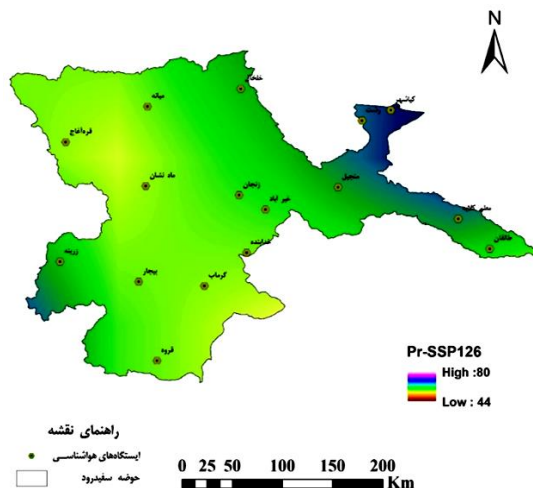
شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب مقدار حداکثر بارش روزانه را در نواحی مختلف حوضه سفیدرود و تحت سناریوهای انتشار مختلف نشان داده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، حداکثر بارش روزانه در سناریوی انتشار SSP126 بین ۴۴ تا ۸۰ میلی‌متر تغییر خواهد کرد (شکل ۵). در سناریوی انتشار SSP245، این مقدار بین ۴۰ تا ۷۵ میلی‌متر نوسان خواهد داشت (شکل ۶). همچنین مقدار این تغییرات در سناریوی SSP585 بین ۳۵ تا ۷۰ میلی‌متر خواهد بود (شکل ۷). نتایج پهنه‌بندی

جدول ۵. رتبه مدل‌های AOGCM را جهت شبیه‌سازی بارش در حوضه سفیدرود

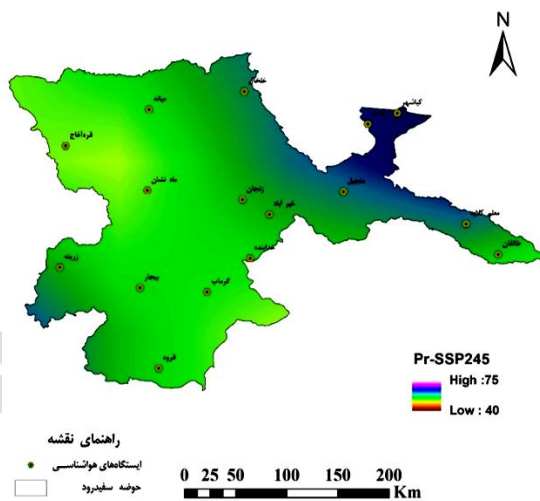
مدل	ماه												
	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	میانگین
BCC-CSM2-MR	۲	۵	۲	۲	۱	۱	۱	۸	۱۰	۹	۶	۱	۴
CAMS-CSM1-0	۹	۸	۷	۳	۳	۳	۱۰	۵	۶	۵	۷	۶	۶
CESM2	۷	۴	۴	۶	۹	۱۰	۵	۴	۲	۴	۴	۷	۶
CMCC-ESM2	۱۰	۷	۶	۵	۶	۹	۴	۹	۴	۹	۲	۵	۶
CNRM-CM6-1	۴	۱۰	۹	۹	۷	۵	۷	۶	۸	۱۰	۱۰	۴	۷
GFDL-ESM4	۱	۶	۵	۸	۴	۴	۳	۲	۳	۷	۸	۳	۵
HadGEM3-GC31-LL	۸	۱	۸	۱	۲	۲	۲	۱	۱	۳	۱	۲	۳
IPSL-CM6A-LR	۳	۳	۳	۴	۵	۷	۹	۱۰	۷	۲	۳	۸	۵
MIROC6	۵	۹	۱۰	۱۰	۱۰	۶	۸	۷	۹	۶	۵	۱۰	۸
MRI-EMS2-0	۶	۲	۱	۷	۸	۸	۶	۳	۵	۸	۹	۹	۶



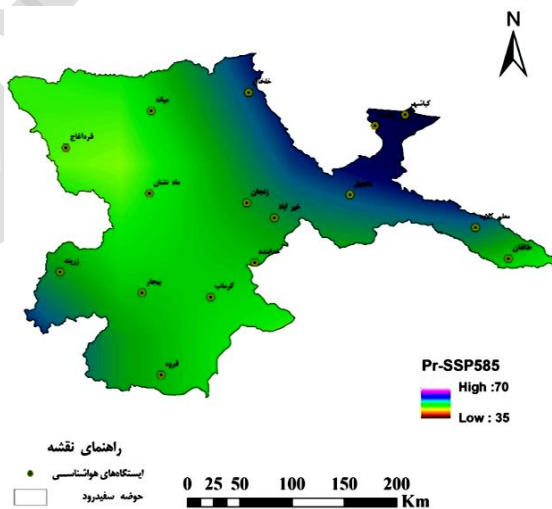
شکل ۶. مقادیر متوسط شاخص KGE و ضریب همبستگی جهت برآورد دقت مدل‌های AOGCM در تخمین بارش



شکل ۷. پهنه‌بندی حداکثر بارش روزانه محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP126 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲



شکل ۸. پهنه‌بندی حداکثر بارش روزانه محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP245 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲



شکل ۹. پهنه‌بندی حداکثر بارش روزانه محدوده مطالعاتی بر اساس سناریوی انتشار SSP585 طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۵۲

جدول ۶. متوسط تغییرات سالانه حداکثر بارش روزانه ایستگاه‌های هواشناسی منتخب و میزان معنی‌دار بودن روند آن

ردیف	نام ایستگاه	تغییرات حداکثر بارش روزانه (میلی‌متر)*		
		SSP585	SSP245	SSP126
۱	طالقان	۷*	۸/۸*	۹/۴*
۲	خلخال	-۶/۸*	-۵/۵*	-۴/۱
۳	میانه	۴/۸*	۵/۲*	۶/۶*
۴	قره‌آغاج	۱۱*	۱۱/۸*	۱۲/۶*
۵	کیاشهر	-۲	-۰/۴	-۰/۱
۶	رشت	۱۳/۸*	۱۵/۳*	۱۷/۷*
۷	منجیل	۷/۴*	۹/۲*	۹/۵*
۸	زرینه	۹/۳*	۹/۶*	۱۰/۱*
۹	بیجار	۵/۱*	۶/۵*	۱۲/۸*
۱۰	قروه	-۲/۵	-۱/۳	-۰/۳
۱۱	معلم کلاویه	۱۰/۸*	۱۴/۲*	۱۵/۳*
۱۲	ماه‌نشان	۴/۵*	۹/۷*	۱۶/۷*
۱۳	زنجان	۰/۹	۲/۳	۱۰/۷*
۱۴	خیرآباد	۶/۶*	۷/۲*	۹/۸*
۱۵	خدابنده	۶/۶*	۷/۵*	۹/۸*
۱۶	گرماب	۸/۱*	۱۲/۴*	۱۲/۷*

* معنی‌دار در سطح ۹۵ درصدی آماری بر اساس آزمون من-کندال

ارزیابی اولیه از دقت مدل‌های AOGCM مختلف صورت پذیرد، بهترین مدل‌های AOGCM برای برآورد دما و بارش منطقه با مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های مشاهداتی در ۱۶ ایستگاه هواشناسی در سطح حوضه، مشخص شدند. این موضوع در نواحی حساسی نظیر حوضه سفیدرود ضرورت بیشتری دارد چرا که تغییرات دما و بارش در این ناحیه بسیار متغیر بوده و عملکرد مدل‌های AOGCM را ممکن است به شدت تحت تأثیر قرار دهد. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل‌های AOGCM دارای دقت متفاوتی در برآورد دما و بارش حوضه سفیدرود هستند. این موضوع برای متغیر بارش بیشتر از متغیر دما احساس شد. در حالت کلی مشخص شد که مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را جهت برآورد دمای دوره تاریخی دارا بود. نتایج مربوط به برآورد بارش دوره تاریخی

در ایستگاه خلخال معنی‌دار است. در نهایت و در سناریوی SSP585، روند افزایشی حداکثر بارش روزانه در تمامی ایستگاه‌ها به جز خلخال، کیاشهر و قروه و زنجان معنی‌دار بوده و روند کاهشی نیز در ایستگاه خلخال دارای روند معنی‌دار است (در سطح آماری ۹۵ درصد) (جدول ۶).

نتیجه‌گیری

این تحقیق با هدف ارزیابی دقت جدیدترین مدل‌های AOGCM مربوط به ششمین هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) در برآورد دما و بارش حوضه سفیدرود و همچنین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای حدی حداکثر دما و حداکثر بارش روزانه در منطقه مورد مطالعه انجام گرفت. از آنجایی که ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش در نواحی مختلف باید بر اساس

افزایش حداکثر بارش روزانه نیز در سناریوی انتشار SSP126 رخ خواهد داد. نتایج این بخش از تحقیق نیز با نتایج محمدپور خویی و ناصری (۲۰۲۲) و همچنین نتایج صفوی و همکاران (۲۰۲۲) تطابق دارد که اعلام کردند تغییر اقلیم موجب افزایش شدت بارش و دمای حداکثر در نواحی مختلفی از ایران خواهد شد (۲۰ و ۲۲).

بر اساس نتایج به دست آمده، از هم‌اکنون ضروری است تا برنامه‌ریزی لازم برای مدیریت منابع آب در این منطقه صورت گیرد تا ضمن افزایش سازگاری با تغییر اقلیم، آمادگی لازم جهت مدیریت مخاطرات اقلیمی احتمالی نیز فراهم شود. انجام چنین برنامه‌ریزی‌هایی علاوه بر آنکه نیازمند بررسی اثر افزایش دمای حداکثر و شدت‌های بارش در نقاط مختلف حوضه است، به انجام تحلیل‌های تکمیلی در خصوص اثر تغییر اقلیم بر سایر متغیرهای مهم آب و هواشناسی (نظیر دمای حداقل، تبخیر و تعرق، نوع بارش‌ها، ذخیره برفی و غیره) نیز وابسته است.

نیز نشان داد که مدل HadGEM3-GC31-LL بالاترین دقت را برای برآورد بارش دوره تاریخی داشته است. نتایج این تحقیق با نتایج تحقیق صورت گرفته توسط انصاری و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد که مدل IPSL-CM6A-LR را به‌عنوان یک مدل مناسب جهت برآورد دما در نواحی شمالی ایران تشخیص دادند (۲). نتایج پژوهش کدخدا و همکاران نیز نشان می‌دهد که مدل‌های خانواده GFDL دقت مطلوبی در برآورد بارش نواحی مختلف ایران دارا هستند که در این تحقیق نیز مدل GFDL-ESM4 با رتبه ۵، عملکرد قابل نسبتاً قابل قبولی از خود نشان داد (۱۲).

نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که تغییر اقلیم باعث افزایش حداکثر دما در سطح حوضه بین ۰/۹ تا ۲/۸ درجه سانتی‌گراد خواهد شد. در حالت کلی مقدار افزایش دمای حداقل مطلق و دمای حداکثر در سناریوی انتشار SSP585 بیشتر از دو سناریوی SSP245 و SSP585 است. همچنین بررسی اثرات تغییر اقلیم بر حداکثر بارش روزانه نیز نشان می‌دهد که این متغیر نیز در سناریوهای انتشار مختلف بین ۶/۸- تا ۱۷/۷ میلی‌متر تغییر خواهد کرد. بیشترین مقدار

منابع مورد استفاده

- Almazroui, M., F. Saeed, S. Saeed, M. Ismail, M. A. Ehsan, M. N. Islam, M. A. Abid, E. O'Brien, S. Kamil, I. U. Rashid and I. Nadeem. 2021. Projected changes in climate extremes using CMIP6 simulations over SREX regions. *Earth Systems and Environment* 5(3): 481-497.
- Ansari, S., H. Dehban, M. J. Zareian and A. Farokhnia. 2022. Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal* 16(1): 11-24. (In Farsi).
- Ding, Y., C. Mu, T. Wu, G. Hu, D. Zou, D. Wang, W. Li and X. Wu. 2021. Increasing cryospheric hazards in a warming climate. *Earth-Science Reviews* 213, p.103500.
- Fallah-Ghalhari, G., F. Shakeri and A. Dadashi-Roudbari. 2019. Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology* 138: 1539-1562.
- Gao, C., M. J. Booij and Y. P. Xu. 2020. Impacts of climate change on characteristics of daily-scale rainfall events based on nine selected GCMs under four CMIP5 RCP scenarios in Qu River basin, east China. *International journal of climatology* 40(2): 887-907.
- Goyal, M. K., A. K. Gupta, J. Das, V. Jain and S. Rakkasagi. 2023. Heatwave magnitude impact over Indian cities: CMIP 6 projections. *Theoretical and Applied Climatology* 154(3): 959-971.
- Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz and G. F. Martinez. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377(1-2): 80-91.
- Hassan, W. H. 2021. Climate change projections of maximum temperatures for southwest Iraq using statistical downscaling. *Climate Research*, 83: 187-200.
- Hassan, W. H. and F. S. Hashim. 2020. The effect of climate change on the maximum temperature in Southwest Iraq using HadCM3 and CanESM2 modelling. *SN Applied Sciences* 2(9), p.1494.

10. IPCC, 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Final Draft Report of Working Group I, Stockholm, Sweden.
11. Jia, Q., H. Jia, Y. Li and D. Yin. 2023. Applicability of CMIP5 and CMIP6 models in China: reproducibility of historical simulation and uncertainty of future projection. *Journal of Climate*, 36(17): 5809-5824.
12. Kadkhoda, E., K. Omidvar, A. Zarrin, A. Mazidi and A. Dadashi-Roudbari. 2023. Projected heat stress in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Iranian Journal of Geophysics* 17(2): 157-173 (In Farsi).
13. Kendall, M. G. 1948. Rank correlation methods, Griffin, London, England.
14. Kling, H., M. Fuchs and M. Paulin. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424: 264-277.
15. Leemans, R. and B. Eickhout. 2004. Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change* 14(3): 219-228.
16. Loucks, D. P. 2021. Impacts of climate change on economies, ecosystems, energy, environments, and human equity: A systems perspective. In: *The impacts of climate change*, Elsevier, pp. 19-50.
17. Madsen, H., D. Lawrence, M. Lang, M. Martinkova and T. R. Kjeldsen. 2014. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology* 519: 3634-3650.
18. Mann, H. B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society* 13(3): 245-259.
19. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea and P. R. Shukla. 2022. Global Warming of 1.5 °C: IPCC special report on impacts of global warming of 1.5 C above pre-industrial levels in context of strengthening response to climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Cambridge University Press, London, England.
20. Mohammadpour Khoie, M. M. and M. Nasser. 2022. Evaluation of Unstationary and Extreme Value Patterns of Precipitation over Iran considering Impacts of Climate Change. *Journal of Climate Research* 1401(49): 131-148.
21. Rummukainen, M. 2012. Changes in climate and weather extremes in the 21st century. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 3(2): 115-129.
22. Safavi, M., H. Moslemi, M. Rezai & R. Darvishi. 2022. The Impact of Climate Change on the heavy Rainfall and Extreme Temperatures (Bijar, Khalkhal, Zanjan, Qorveh and Miane stations Sefidrood Basin). *Nivar* 46(118): 14-26.
23. Sonali, P. and D. N. Kumar. 2013. Review of trend detection methods and their application to detect temperature changes in India. *Journal of Hydrology* 476: 212-227.
24. Sun, Q., D. Kong, C. Miao, Q. Duan, T. Yang, A. Ye, Z. Di and W. Gong. 2014. Variations in global temperature and precipitation for the period of 1948 to 2010. *Environmental Monitoring and Assessment* 186: 5663-5679.
25. Thibeault, J. M. and A. Seth. 2014. Changing climate extremes in the Northeast United States: observations and projections from CMIP5. *Climatic Change* 127: 273-287.
26. Trenberth, K. E. 2011. Changes in precipitation with climate change. *Climate Research* 47(1-2): 123-138.
27. Williams, C. M., H. A. Henry and B. J. Sinclair. 2015. Cold truths: how winter drives responses of terrestrial organisms to climate change. *Biological Reviews* 90(1): 214-235.
28. Zareian, M. J. 2021. Optimal water allocation at different levels of climate change to minimize water shortage in arid regions (Case Study: Zayandeh-Rud River Basin, Iran). *Journal of Hydro-environment Research* 35: 13-30.
29. Zareian, M. J., S. Eslamian and H. R. Safavi 2015. A modified regionalization weighting approach for climate change impact assessment at watershed scale. *Theoretical and Applied Climatology* 122(3): 497-516.
30. Zhu, X., S.Y. Lee, X. Wen, Z. Ji, L. Lin, Z. Wei, Z. Zheng, D. Xu and W. Dong. 2021. Extreme climate changes over three major river basins in China as seen in CMIP5 and CMIP6. *Climate Dynamics* 57: 1187-1205.