

پیش‌بینی مقایسه‌ای بارش و دمای شهرستان کرمان با استفاده از مدل‌های LARS-WG6

میثم جعفری گدنه^۱، علی سلاجقه^{۲*}، پارسا حقیقی^۳

۱. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲. استاد دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی طبیعت، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۱۱/۱۶؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۹/۰۲/۲۲)

چکیده

ارزیابی تغییرات اقلیمی برای مناطق خشک و نیمه‌خشک که بحران کم‌آبی آن را فرا گرفته است، اهمیت زیادی دارد. بنابراین، هدف از تحقیق حاضر پیش‌بینی تغییرات اقلیمی شهرستان کرمان با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو قابل دسترس در نرم‌افزار LARS-WG6 (EC-EARTH، GFDL-CM، MIROC5، HadGEM2-ES و MPI-ESM-MR) تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ و برآورد حداکثر بارش آن در دوره بازگشت‌های مختلف طی دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۱۰) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) با استفاده از توزیع گامبل است. نتایج نشان داد هر پنج مدل در زمینه پیش‌بینی دمای این شهرستان پاسخ‌یكسانی در زمینه افزایش حداکثری دمای مینیمم و ماکزیمم نشان داده‌اند، به گونه‌ای که حداکثر افزایش دمای مینیمم در مدل‌های GFDL-CM، HadGEM2-ES، MIROC5 و MPI-ESM-MR به ترتیب به میزان ۳/۵۶، ۲/۷۳، ۲/۳۳ و ۲/۳۰ درجه سانتی‌گراد در ماه سپتامبر صورت گرفته است. همچنین، دمای ماکزیمم در سناریوی RCP4.5 در ماه‌های می، سپتامبر، می، سپتامبر و جولای به ترتیب در مدل‌های EC-EARTH، GFDL-CM، HadGEM2-ES، MIROC5 و MPI-ESM-MR حداکثر افزایش را به میزان ۲/۲۰، ۲/۸۲، ۲/۴۶، ۱/۹۸ و ۲/۳۸ درجه سانتی‌گراد نشان داده است. در فصل زمستان بارش به میزان ۱۹/۰۵ و ۴/۶۲ درصد به ترتیب در مدل‌های EC-EARTH و MIROC5 کاهش یافته است. نتایج بیانگر آن است که بارش‌های حداکثری در تمامی مدل‌ها به جز در مدل MPI-ESM-MR با میزان بارش بیشتری اتفاق خواهد افتاد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دوره بازگشت مقادیر حداکثر بارش محتمل طبق دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 افزایش داشته و تحت سناریوی RCP8.5 شدیدتر بوده است.

کلیدواژگان: تغییر اقلیم، حداکثر بارش محتمل، شهرستان کرمان، LARS-WG6.

مقدمه

گرم شدن زمین در نتیجه افزایش سطح غلظت دی‌اکسید کربن جو و افزایش دمای متوسط جهانی، ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌وضوح ادامه خواهد یافت. انتظار می‌رود که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو نه تنها در تغییرات میانگین آب‌وهوایی، بلکه در تغییرات فراوانی و شدت رویدادهای شدید، مانند سیل، خشکسالی و امواج گرما رخ دهد [۱ و ۲]. بارش و دما، مهم‌ترین متغیرهای اقلیمی در زمینه تغییر اقلیم هستند. این دو متغیر در سطح جهانی و منطقه‌ای با جنبه‌های گوناگون مطالعه شده‌اند [۳]، به گونه‌ای که این دو متغیر تأثیر درخور توجهی بر قابلیت دسترسی به آب خواهند داشت. علاوه بر این، آب‌وهوای گرم‌تر، تبخیر و تعرق را افزایش می‌دهد و از این‌رو تقاضا برای آب در کشاورزی، مراکز شهری و اکوسیستم‌های وابسته به آب افزایش می‌یابد [۴]. مدل‌های آب‌وهوایی جهانی (GCM^۱) ابزار اصلی برای مطالعه تغییرات اقلیمی تاریخی و طراحی آب‌وهوای آینده هستند، به طوری که مدل‌های گزارش پنجم عملکرد خوبی را نسبت به مدل‌های گزارش سوم و چهارم در بیان تغییرات اقلیمی و شدت شرایط آب‌وهوایی در جهان نشان داده‌اند [۵ و ۶]. مدل‌های گردش عمومی (GCM) می‌تواند برای برآورد تغییرات آب‌وهوایی آینده استفاده شود. از طرفی، استفاده مستقیم از خروجی‌های این مدل‌ها برای حل پروسه‌های مطالعاتی در سطح محلی و منطقه‌ای نیاز به ریزمقیاس‌سازی دارند، به طوری که این عمل ابزاری مناسب برای ارائه داده‌های با وضوح زیاد در مورد ارزیابی از شرایط آب‌وهوایی در هر منطقه‌ای است [۷-۹]. مطالعات متعددی در بررسی تغییرات اقلیمی با استفاده از پارامترهای دما و بارش در سطح داخل و خارج از کشور صورت پذیرفته است که در زیر به مواردی از آنها اشاره می‌شود:

نتایج پیش‌بینی آب‌وهوای آینده در حوضه رودخانه Ngerengere، تانزانیا با استفاده از نرم‌افزار Lars-WG بیانگر آن است که افزایش حداقل و حداکثر دما بین ۰/۲ تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد در دهه ۲۰۵۰ و بین ۲/۷ تا ۴/۴ درجه سانتی‌گراد در دهه ۲۰۸۰ رخ می‌دهد. به طوری که کمترین افزایش دما در آینده در اکتبر و نوامبر و بیشترین افزایش در ماه‌های ژوئن و ژوئیه رخ می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود

بارندگی‌های آینده در ماه‌های آوریل، مه، ژوئن و ژوئیه به میزان ۱۲-۳۷ درصد کاهش یابد، در حالی که در ماه‌های دیگر، با افزایش ۳-۵۸ درصد افزایش می‌یابد [۱۰]. همچنین، پیش‌بینی دما و امواج سرد و گرم در اسپانیا با استفاده از خروجی‌های گزارش پنجم در دو مرحله ریزمقیاس بیانگر آن است که سناریوهای تغییر اقلیمی افزایش تدریجی در دمای حداکثر روزانه طی قرن بیست‌ویکم را نشان می‌دهند و بیشترین افزایش دما در فصل تابستان در سناریوی RCP8.5 به میزان ۷ درجه سانتی‌گراد رخ خواهد داد. از طرفی، حداقل افزایش دما رفتاری مشابه حداکثر افزایش دما نشان می‌دهد، اما با افزایشی کمتر، به طوری که تا پایان قرن بیست‌ویکم به ترتیب به میزان ۳ و ۵/۶ درجه سانتی‌گراد برای سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 خواهد رسید [۱۱]. نتایج بررسی تأثیر تغییرات آب‌وهوایی آینده بر دسترسی منابع آب در حوضه رودخانه Manning استرالیا با استفاده از ۲۸ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوی RCP8.5 کاهش بارش سالانه را برای دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۱۰۰ نشان داد [۱۲]. همچنین، یافته‌ها بیانگر آن است که میزان متوسط دما در شهرستان‌های بم، بافت، کهنوج، کرمان، انار، رفسنجان، شهرابک، سیرجان و میانه جیرفت به ترتیب به میزان ۵/۷۰، ۱/۴۲، ۱/۱۵، ۱/۳۶، ۱/۸۲، ۰/۴۴، ۱/۲۹، ۰/۳۸ و ۱/۴۸ از سناریوی RCP2.6 به سناریوی RCP8.5 افزایش پیدا کرده است که گرمایش این مناطق در آینده نزدیک را نشان می‌دهد [۱۳]. همچنین، تغییرات مؤلفه بارش در استان زنجان طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۵۵ نسبت به دوره پایه رو به کاهش است، به طوری که این مقدار کاهش برای ایستگاه زنجان با ۲ میلی‌متر و بیشترین مقدار کاهش برای ایستگاه خدابنده و ماه‌نشان با ۲۴ میلی‌متر پیش‌بینی شده است [۱۴]. از طرفی، ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل LARS-WG تحت سناریوی A2 بیانگر آن بود که بارش سالانه به میزان ۴/۰۳ درصد کاهش یافته و دمای حداقل به میزان ۰/۶۴ تا ۱/۳۵ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. همچنین، بیشترین افزایش دمای حداکثر در ماه نوامبر به میزان ۱/۲۷ و کمترین افزایش آن، در ماه ژانویه به میزان ۰/۳۳ درجه خواهد بود [۱۵]. آنچه از بررسی منابع انجام‌شده در سراسر دنیا و کشور ایران برمی‌آید، اهمیت زیاد مطالعه روند و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی بارش و دما به صورت دقیق و

1. General Circulation Model

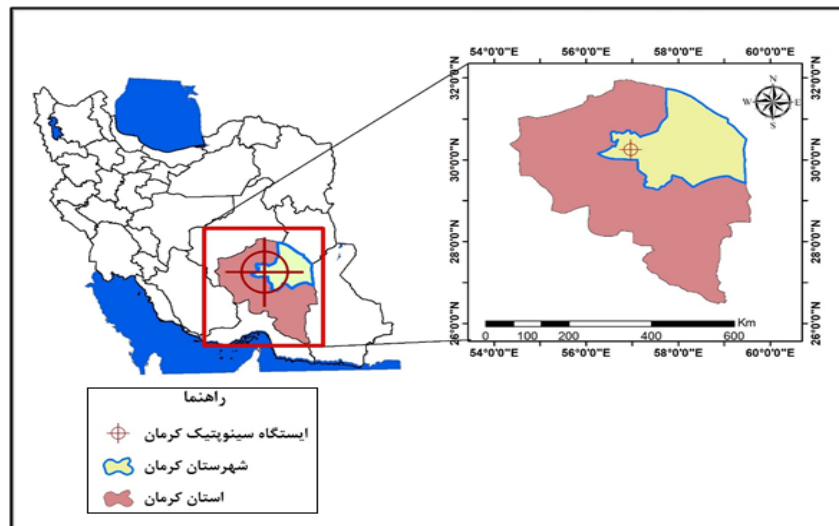
اقلیمی شهرستان کرمان با استفاده از ۵ مدل گردش عمومی جو تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ است.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه شده

منطقه بررسی شده شهرستان کرمان واقع در استان کرمان است که تقریباً در جنوب غرب دشت لوت قرار دارد. مساحت و متوسط بارش سالانه آن، به ترتیب ۴۵۴۰۰/۹۱ کیلومتر مربع و ۱۴۷ میلی‌متر است و در محدوده ۵۶° ۱۵' ۰۶" تا ۵۹° ۲۸' ۱۲" طول شرقی و ۲۹° ۱۶' ۲۷" تا ۳۱° ۴۴' ۳۵" عرض شمالی واقع شده است. موقعیت این شهرستان در کشور و استان کرمان در شکل ۱ ارائه شده است.

جامع برای تمام مناطق دنیاست. با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای و شدت گرم شدن زمین و تأثیراتی که این دو عامل روی پدیده‌های جوی و اقلیمی می‌گذارند، اهمیت مطالعات اقلیمی دو چندان می‌شود. از آنجا که شهر کرمان به عنوان دروازه جنوب شرق کشور و پایلوت الکترونیکی ایران در افق ۱۴۰۴ شناخته می‌شود و همچنین با توجه به سرمایه‌گذاری‌های کلان اقتصادی در این شهر و وجود بحران کم‌آبی به علت قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک، بررسی روند و پیش‌بینی اقلیم این شهر می‌تواند کمک زیادی به مدیران سیاست‌گذار این شهر کند. تا کنون تحقیق جامعی در منطقه یادشده صورت نگرفته است و تحقیق حاضر برای نخستین بار به موضوع یادشده در این منطقه می‌پردازد. بنابراین، هدف از مطالعه حاضر بررسی پیش‌بینی تغییرات



شکل ۱. محدوده منطقه مطالعه شده

توصیف مدل‌های گزارش پنجم

نسل جدیدی از مدل‌های گردش عمومی که در تهیه گزارش ارزیابی پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده شد، تحت عنوان «پروژه درون‌مقایسه‌ای مدل‌های جفت‌شده (CMIP5)»، شناخته شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها شامل شبیه‌سازی‌های قرن بیستم و پروژه‌های اقلیمی قرن ۲۱ تحت سناریوهای جدید انتشار با عنوان «نماینده خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP)».

روش تحقیق

در تحقیق حاضر ابتدا داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی و تابش خورشیدی ایستگاه سینوپتیک کرمان برای بررسی پدیده تغییر اقلیم طی دوره زمانی ۱۹۶۱-۲۰۱۰ از سازمان هواشناسی استان کرمان تهیه شد. سپس، شرط همگنی داده‌ها با روش کولموگروف-اسمیرنوف در این ایستگاه اعمال شد. پس از آن، بازسازی نواقص آماری با روش ایستگاه‌های معرف صورت گرفت. در نهایت، پس از جمع‌آوری و اصلاح داده‌ها، به منظور بررسی تغییرات اقلیمی از نرم‌افزار LARS-WG6 استفاده شد که مراحل انجام پژوهش به شرح زیر است:

1. Coupled Model Intercomparison Phase 5
2. Representative Concentration Pathway

جدول ۱. مشخصات مدل های گردش عمومی جو در دسترس به عنوان ورودی نرم افزار LARS-WG6

| منبع | سناریوها | قدرت تفکیک مکانی به درجه | مرجع | مدل |
|------|------------------|--------------------------|-------------------------------------------------------|------------|
| [۱۷] | RCP4.5 RCP8.5 | ۱/۴۰ * ۱/۴۰ | Atmosphere and Ocean Research Institute, Japan | MIROC5 |
| [۷] | RCP4.5 RCP8.5 | ۱/۱۲۱۵ * ۱/۱۲۵ | EC-EARTH consortium | EC-EARTH |
| [۱۸] | RCP4.5 RCP8.5 | ۲/۵ * ۲/۰ | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (United States) | GFDL-CM3 |
| [۱۹] | RCP4.5 RCP8.5 | ۱/۸۷۵ * ۱/۳۵ | MOHC, Met Office Hadley Center, UK | HadGEM2-ES |
| [۲۰] | RCP4.5 RCP8.5 | ۱/۸۶۵ * ۱/۸۷۵ | Max Planck Institute for Meteorology, Germany | MPI-ESM-MR |

میانگین، انحراف معیار آنها را مطابق رابطه ۲ تغییر می دهد [۱۵]:

$$F_{fut} = \frac{STD_{obs}}{STD_{base}(GCM)} * STD_{fut}(GCM) \quad (2)$$

همچنین، به منظور قابلیت این مدل از معیارهای آماری R^2 ، میانگین مربعات خطا (MSE^1)، مجذور مربعات خطا ($RMSE^2$) و انحراف مطلق متوسط (MAD^3) استفاده می شود (روابط ۳ تا ۶):

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (A_{obs,t} - \bar{A}_{obs}) * (F_{model,t} - \bar{F}_{model})}{\left[\sum_{i=1}^n (A_{obs,t} - \bar{A}_{obs})^2 \right]^{0.5} * \left[\sum_{i=1}^n (F_{model,t} - \bar{F}_{model})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_t - F_t)^2} \quad (5)$$

$$MAD = \sum_{i=1}^n \frac{|(A_t - F_t)|}{n} \quad (6)$$

که در آن A_t مقادیر مشاهده شده و F_t مقادیر پیش بینی شده و n تعداد داده هاست (شکل ۲).

برآورد بارش حداکثر دوره پایه و سناریوهای اقلیمی

نمایه حدی پدیده ای است که از دیدگاه آماری در حد بالا و پایین توزیع آماری قرار می گیرد. به بیانی، نشان دهنده وضعیت رویدادهای حد است که باید جنبه هایی از رخداد تغییر اقلیم و تأثیرات آن را نمایش دهد [۲۳]. تحلیل فراوانی حداکثر بارش های روزانه در طراحی و اجرای سازه های کنترل آب، نقشه کاربری اراضی، حفاظت از

مدل های گزارش پنجم را تشکیل می دهند [۱۶]. در مطالعه حاضر از پنج مدل قابل استفاده در نرم افزار LARS-WG برای پیش بینی اقلیم شهرستان کرمان استفاده شد (جدول ۱).

ریز مقیاس نمایی

با توجه به بزرگ مقیاس بودن مدل های گردش عمومی جو، یکی از راهکارهای فائق آمدن بر نقیصه فضایی کم این مدل ها، استفاده از ریز مقیاس نمایی آماری است. از جمله این مدل ها LARS-WG است که برای ریز مقیاس نمایی از روش آماری استفاده می کند [۲۱]. این مدل قادر است داده های بارش (میلی متر)، دمای کمینه و بیشینه (درجه سلسیوس) و تابش خورشیدی (مگاژول بر مترمربع در روز) را برای شرایط حاضر و آینده پیش بینی کند. مبنای آن برای مدل سازی طول دوره های خشک و تر، بارش روزانه و سری های تابش، توزیع نیمه تجربی است. سری های فوریه، دما را تخمین می زنند. دماهای حداقل و حداکثر روزانه به صورت فرایندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز مد نظر هستند، مدل سازی می شوند. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه سازی میانگین و انحراف معیار دمای فصلی به کار می رود. مقادیر مانده ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیده بانی شده به دست می آیند، در تحلیل خود همبستگی زمانی داده های مینیمم و ماکزیمم استفاده می شوند [۲۲]. مکانیسم عمل این به این صورت است که ابتدا با استفاده از تولید داده ماهانه که دربرگیرنده رفتار اقلیم پایه است، تمامی داده های ماهانه را مطابق رابطه ۱ محاسبه می کند:

$$F_{fut} = F_{obs} + (F_{fut}(GCM) - F_{base}(GCM)) \quad (1)$$

که در آن، F_{fit} آینده و F_{obs} گذشته است. سپس با حفظ

1. Mean Squared Error
2. Root Mean Square Error
3. Median Absolute Deviation

فصلی پس از ریزمقیاس‌نمایی در شکل ۳ نمایش داده شده است. نتایج بیانگر آن است که دمای حداقل دارای حداکثر افزایش دما به میزان ۲/۰۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP4.5 در مدل EC-EARTH رخ داده است. همچنین، حداکثر افزایش دمای مینیمم در مدل‌های GFDL-CM، MIROC5، HadGEM2-ES و MPI-ESM-MR به ترتیب به میزان ۳/۵۶، ۲/۷۳، ۲/۳۳ و ۲/۳۰ در ماه سپتامبر صورت گرفته است. در ضمن، دمای ماکزیمم در سناریوی RCP4.5 در ماه‌های می، سپتامبر، می، سپتامبر و جولای به ترتیب در مدل‌های EC-EARTH، GFDL-CM، HadGEM2-ES، MIROC5 و MPI-ESM-MR حداکثر افزایش را به میزان ۲/۲۰، ۲/۸۲، ۲/۴۶، ۱/۹۸ و ۲/۳۸ درجه سانتی‌گراد نشان داده است. افزایش حداکثر دمای ماکزیمم در سناریوی RCP8.5 در ماه‌های آوریل، می، جولای و سپتامبر رخ داده است که نشان‌دهنده افزایش دما در اواسط و اواخر فصل‌های بهار و تابستان است. همچنین، این شکل نشان‌دهنده تغییرات فصلی بارش ۳۱ سال آینده است، به طوری که بارش در فصل زمستان به میزان ۱۹/۰۵ و ۴/۶۲ درصد به ترتیب در مدل‌های EC-EARTH و MIROC5 کاهش یافته است. همچنین، در مدل MPI-ESM-MR شاهد افزایش بارندگی به میزان ۱۸/۷۳ و ۲۵/۹۸ درصد به ترتیب در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 هستیم. در ضمن، مدل MIROC5 بیانگر تغییرات جزئی بارش به میزان ۱/۳۸ درصد افزایش در فصل بهار است.

مناطق مسکونی، باغ‌ها و مزارع به منظور جلوگیری از خسارت‌های احتمالی سیلاب استفاده می‌شود [۲۴]. بنابراین، پس از پیش‌بینی بارش توسط مدل‌های گردش عمومی جو به منظور برآورد حداکثر بارش از توزیع گامبل در نرم‌افزار SDSM4.2 استفاده شد. سپس، حداکثر بارش در هر بازه زمانی و یک مجموعه از دوره بازگشت‌های انتخابی (۲، ۵، ۱۰، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ سال) محاسبه شد.

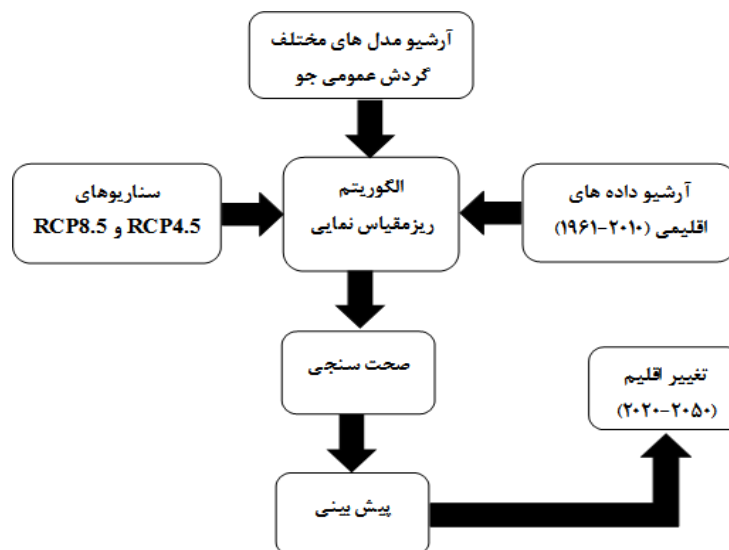
نتایج

نتایج ارزیابی مدل‌های گزارش پنجم

در جدول ۲ مقادیر R^2 ، MSE، RMSE و MAD به منظور ارزیابی مدل‌های گزارش پنجم برای پارامترهای بارش، دمای مینیمم و ماکزیمم ارائه شده است. طبق این جدول، مدل‌های MPI-ESM-MR و EC-EARTH4، HadGEM2-ES بیشترین ضریب همبستگی به ترتیب در مؤلفه‌های دمای کمینه (۰/۸۷)، ماکزیمم (۰/۹۸) و بارش (۰/۸۲) را دارند. این مقادیر بیانگر آن است که سه مدل یادشده در کلاس ارزیابی بسیار مناسب قرار می‌گیرند. همچنین، سایر مدل‌ها در مؤلفه دمای کمینه و ماکزیمم در کلاس ارزیابی مناسب و خیلی مناسب و در مؤلفه بارش، در کلاس مناسب و متوسط قرار می‌گیرند.

نتایج پیش‌بینی بارش و دما تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5

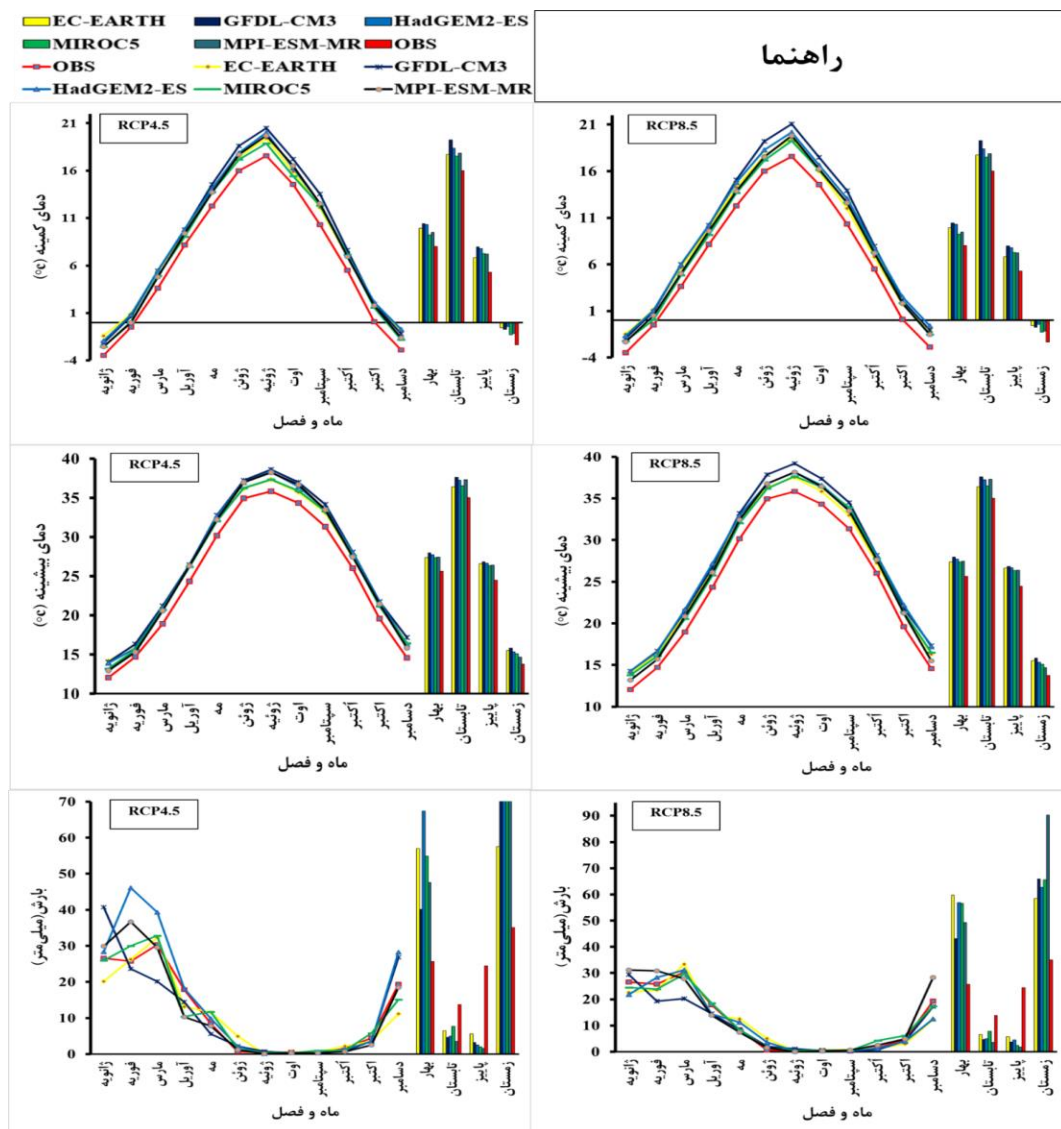
خروجی حاصل از پنج مدل گردش عمومی جو تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 به صورت ماهانه و



شکل ۲. مراحل ریزمقیاس‌سازی پارامتر بارش و دما در نرم‌افزار LARS-WG6

جدول ۲. قابلیت ارزیابی مدل های گزارش پنجم طی دوره ۱۹۶۱-۲۰۱۰

| مدل های اقلیمی | | | | | آماره های | پارامتر |
|----------------|------------|--------|----------|-----------|----------------|-------------|
| HadGEM2-ES | MPI-ESM-MR | MIROC5 | GFDL-CM3 | EC-EARTH4 | آزمون | |
| ۰/۸۹ | ۱/۱۱ | ۱/۱۱ | ۱/۴۳ | ۱/۳۲ | MAD | دمای کمینه |
| ۱/۲۷ | ۱/۷۱ | ۱/۶۸ | ۲/۵۷ | ۲/۲۴ | MSE | |
| ۱/۱۲ | ۱/۳۰ | ۱/۳۹ | ۱/۶ | ۱/۴۹ | RMSE | |
| ۰/۸۷ | ۰/۸۰ | ۰/۸۱ | ۰/۷۱ | ۰/۷۹ | R ² | |
| ۰/۷۳ | ۰/۳۲ | ۰/۹۰ | ۰/۵۶ | ۰/۱۱ | MAD | دمای بیشینه |
| ۰/۵۹ | ۰/۱۷ | ۰/۹۸ | ۰/۳۶ | ۰/۰۱۶ | MSE | |
| ۰/۷۷ | ۰/۴۱ | ۰/۶۹ | ۰/۶۰ | ۰/۱۲ | RMSE | |
| ۰/۸۵ | ۰/۹۳ | ۰/۸۷ | ۰/۹۱ | ۰/۹۸ | R ² | |
| ۱/۸۴ | ۱/۴۱ | ۱/۹۵ | ۱/۵۳ | ۱/۲۰ | MAD | بارش |
| ۴/۷۱ | ۲/۶۷ | ۵/۷۰ | ۳/۸۴ | ۴/۲۳ | MSE | |
| ۲/۱۷ | ۱/۶۳ | ۲/۳۸ | ۱/۹۶ | ۲/۰۲ | RMSE | |
| ۰/۶۳ | ۰/۸۲ | ۰/۶۱ | ۰/۷۲ | ۰/۶۸ | R ² | |



شکل ۳. دمای کمینه، بیشینه و بارش ماهانه و فصلی مدل های گزارش پنجم در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰

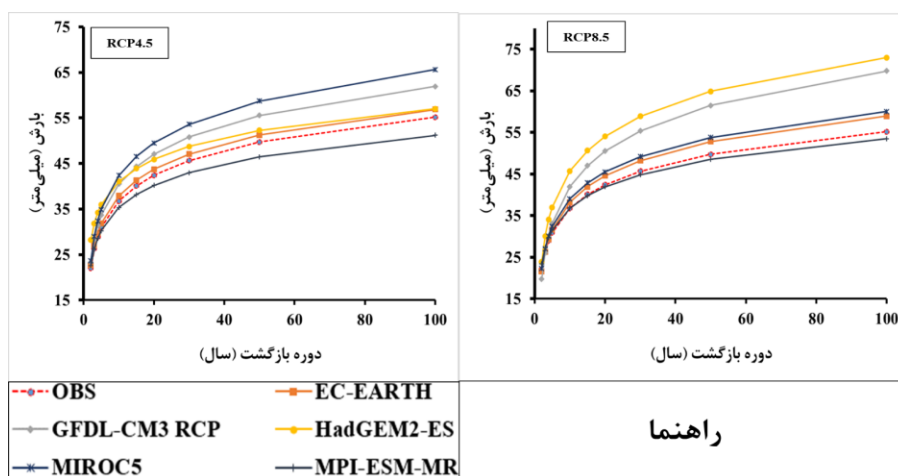
MPI-ESM-MR در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 شاهد افزایش بارش سالانه در دوره ۲۰۲۰-۲۰۵۰ به ترتیب به میزان ۲/۲۱، ۳۰/۴۵، ۱/۲۴ و ۹/۷۷ درصد هستیم.

نتایج بارش حداکثر حاصل از سناریوهای اقلیمی نتایج به دست آمده از بارش در دوره بازگشت‌های مختلف بیانگر آن است که در مدل MIROC5 تحت سناریوی RCP4.5 بارش با شدت بیشتری رخ خواهد داشت. اما تحت سناریوی RCP8.5 در مدل HadGEM2-ES شدت بارش در دوره بازگشت‌های مختلف بیش از سایر مدل‌هاست. فقط در مدل MPI-ESM-MR در هر دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 شدت بارش نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۱۰) کمتر خواهد بود (شکل ۴).

مطابق جدول ۳ مدل GFDL-CM3 دارای حداکثر افزایش دمای کمینه سالانه نسبت به سایر مدل‌های یادشده است. به گونه‌ای که این افزایش حداقل دما از ۲/۱۲ تا ۲/۴۸ درجه سانتی‌گراد از سناریوی RCP4.5 به سناریوی RCP8.5 رخ داده است. همانند حداقل افزایش دما، نتایج نشان‌دهنده آن است که مدل GFDL-CM3 حداکثر افزایش دمای بیشینه سالانه آن از سناریوی RCP4.5 به سناریوی RCP8.5 به میزان ۲/۳۲ تا ۲/۶۶ درجه سانتی‌گراد صورت گرفته است. همچنین، در تمامی فصل‌های سال شاهد افزایش دمای مینیمم و ماکزیمم هستیم، به گونه‌ای که این افزایش دما بیش از ۰/۸۸ درجه سانتی‌گراد رخ داده است. همچنین، در زمینه درصد تغییرات بارش سالانه فقط در مدل‌های GFDL-CM3 و HadGEM2-ES در سناریوی RCP4.5 و در مدل

جدول ۳. تغییرات دمای کمینه، بیشینه و بارش فصلی مدل‌های گزارش پنجم (۲۰۲۰-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۱۰)

| MPI-ESM-MR | | MIROC5 | | HadGEM2-ES | | GFDL-CM3 | | EC-EARTH4 | | فصل | پارامتر |
|------------|--------|--------|---------|------------|---------|----------|---------|-----------|---------|---------|-------------|
| RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | RCP8.5 | RCP4.5 | | |
| ۱/۴۷ | ۱/۲۹ | ۱/۲۰ | ۱/۲۲ | ۲/۳۱ | ۱/۷۸ | ۲/۴۱ | ۱/۹۲ | ۱/۹۱ | ۱/۷۱ | بهار | دمای کمینه |
| ۱/۸۲ | ۱/۹۴ | ۱/۴۹ | ۱/۱۲ | ۲/۳۴ | ۲/۰۲ | ۳/۲۳ | ۲/۷۴ | ۱/۷۰ | ۱/۵۶ | تابستان | |
| ۱/۹۲ | ۱/۷۸ | ۱/۹۷ | ۱/۷۱ | ۲/۴۸ | ۱/۹۹ | ۲/۶۹ | ۲/۴۲ | ۱/۵۴ | ۱/۷۱ | پاییز | |
| ۱/۱۸ | ۰/۹۰ | ۱/۰۶ | ۰/۸۸ | ۱/۹۰ | ۱/۶۹ | ۱/۶۰ | ۱/۴۱ | ۱/۷۹ | ۱/۸۲ | زمستان | |
| ۱/۶۰ | ۱/۴۸ | ۱/۴۳ | ۱/۲۳ | ۲/۲۶ | ۱/۸۷ | ۲/۴۸ | ۲/۱۲ | ۱/۷۳ | ۱/۷۰ | سالانه | |
| ۲/۰۰ | ۱/۹۲ | ۱/۶۴ | ۱/۸۶ | ۲/۷۹ | ۲/۱۹ | ۲/۶۷ | ۲/۳۴ | ۲/۱۹ | ۲/۱۴ | بهار | دمای بیشینه |
| ۲/۰۸ | ۲/۲۶ | ۱/۷۰ | ۱/۴۷ | ۲/۱۳ | ۲/۱۹ | ۳/۱۱ | ۲/۵۶ | ۱/۵۳ | ۱/۳۸ | تابستان | |
| ۱/۸۲ | ۱/۸۱ | ۲/۰۵ | ۱/۷۲ | ۲/۴۳ | ۲/۰۸ | ۲/۵۲ | ۲/۳۲ | ۱/۵۵ | ۱/۷۳ | پاییز | |
| ۱/۰۲ | ۰/۹۳ | ۱/۶۹ | ۱/۳۲ | ۲/۲۵ | ۱/۵۷ | ۲/۳۴ | ۲/۰۷ | ۱/۷۶ | ۱/۷۸ | زمستان | |
| ۱/۷۳ | ۱/۷۳ | ۱/۷۷ | ۱/۵۹ | ۲/۴۰ | ۲/۰۰ | ۲/۶۶ | ۲/۳۲ | ۱/۷۶ | ۱/۷۶ | سالانه | |
| -۱/۲/۸ | -۱/۵/۷ | -۰/۰۱ | -۲/۷/۸ | -۰/۶۰ | ۱/۹/۲۱ | -۲/۳/۶ | -۲/۸/۹ | ۵/۶۱ | ۰/۹۱ | بهار | بارش |
| ۱/۷/۴۱ | ۲/۱/۷ | ۵/۴/۰۸ | ۲/۸/۳۳ | ۱/۸/۴۱ | ۶/۶/۲۳ | ۱/۳/۱۳ | ۱۰/۸/۶ | ۲/۶/۵/۵ | ۲/۶/۰/۱ | تابستان | |
| ۲/۶/۴۸ | -۴/۴/۷ | ۶/۹/۵۹ | ۲/۱/۷/۸ | -۱/۳/۱/۸ | -۲/۱/۶ | -۱/۷/۹ | -۲/۷/۴ | -۲/۲/۴ | ۲/۰/۰ | پاییز | |
| ۲/۵/۹۸ | ۱/۸/۷۳ | -۸/۴/۳ | -۰/۸/۱ | -۱/۲/۵ | ۴/۳/۱/۷ | -۸/۱/۸ | ۲/۷/۰/۷ | -۱/۸/۴ | -۱/۹/۷ | زمستان | |
| ۹/۷/۷ | ۱/۲/۴ | -۰/۵/۶ | -۰/۲/۳ | -۴/۹/۰ | ۳/۰/۴/۵ | -۱/۳/۴ | ۲/۲/۱ | -۵/۴/۰ | -۶/۹/۵ | سالانه | |



شکل ۴. مقادیر بارندگی در دوره بازگشت‌های مختلف تحت تأثیر دو سناریوی RCP8.5 و RCP4.5

بحث و نتیجه‌گیری

روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری به منظور پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش به دلیل اهمیت این فاکتورها در برنامه‌ریزی و مدیریت محیطی کاربرد وسیعی دارند. در مطالعه حاضر از مدل‌های قابل دسترس در نرم‌افزار LARS-WG6 شامل EC-EARTH، GFDL-CM، سناریوی اقلیمی RCP4.5 و RCP8.5 برای پیش‌بینی دما و بارش شهرستان کرمان طی دوره زمانی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ استفاده شد. همچنین، برای قابلیت ارزیابی مدل‌های گزارش پنجم از شاخص‌های آماری R^2 ، MSE، RMSE و MAD بهره گرفته شد. در نهایت، برای برآورد حداکثر بارش با دوره بازگشت‌های مختلف طی دوره پایه (۱۹۶۱-۲۰۱۰) و آینده (۲۰۲۰-۲۰۵۰) از توزیع گامبل در نرم‌افزار SDSM4.2 استفاده شد. نتایج ارزیابی قابلیت این مدل‌ها بیانگر آن است که به علت آنکه مؤلفه دما در قیاس با پارامتر بارش توزیع دمایی یکسانی طی سال دارد، بنابراین در کلاس ارزیابی خیلی مناسب و مناسب قرار می‌گیرند. اما کلاس ارزیابی مدل‌ها برای پارامتر بارش در کلاس متوسط و مناسب طبقه‌بندی شدند. همچنین، مدل‌های EC-EARTH، HadGEM2-ES، MPI-ESM-MR دارای بیشترین ضریب همبستگی به ترتیب در مؤلفه‌های دمای کمینه (۰/۸۷) و ماکزیمم (۰/۹۸) و بارش (۰/۸۲) هستند که با نتایج خسرویان و همکاران [۲۵]، که در بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM بیان داشتند که معیارهای آماری مانند میانگین خطای مطلق و مجذور میانگین مربعات خطا نشان می‌دهد که مدل کارایی بیشتر و دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی دما دارد، مطابق است. نتایج نشان داد هر ۵ مدل در زمینه پیش‌بینی دمای شهرستان کرمان پاسخ یکسانی در زمینه افزایش حداکثری دمای مینیمم و ماکزیمم نشان داده‌اند، به گونه‌ای که دمای حداقل دارای حداکثر افزایش دما به میزان ۲/۰۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی RCP4.5 در مدل EC-EARTH رخ داده است. همچنین، حداکثر افزایش دمای مینیمم در مدل‌های GFDL-CM، MPI-ESM-MR و MIROC5.HadGEM2-ES به ترتیب به میزان ۳/۵۶، ۲/۷۳، ۲/۳۳ و ۲/۳۰ در ماه سپتامبر صورت گرفته است. همچنین، دمای ماکزیمم در سناریوی RCP4.5 در ماه‌های می، سپتامبر و جولای به ترتیب در

مدل‌های EC-EARTH، GFDL-CM، HadGEM2-ES و MIROC5.HadGEM2-ES حداکثر افزایش را به میزان ۲/۲۰، ۲/۸۲، ۲/۴۶، ۱/۹۸ و ۲/۳۸ درجه سانتی‌گراد نشان داده است. اما در زمینه پیش‌بینی بارش نتایج متفاوتی را ارائه کرده‌اند که با نتایج عباسی و همکاران [۲۶] در ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش ایران در دهه‌های آینده بیان کردند که نتایج مدل HadCM2 نشان‌دهنده کاهش بارش‌های ایران تا دهه ۲۱۰۰ به میزان ۲/۵ درصد است، در حالی که برای دوره مشابه در مدل ECHAM4 بارش‌های کشورمان به میزان ۱۹/۸ درصد افزایش یافته است. همچنین، با نتایج پژوهش قضاوی و همکاران [۲۷] در بررسی تأثیرات اقلیمی آینده بر تغییرات دبی رودخانه‌های هروچای اردبیل با استفاده از مدل SWAT و LARS-WG که بیانگر افزایش دما در فصول سرد بود و نیز با نتایج پژوهش جهانگیر و همکاران [۲۸] در پیش‌بینی پارامتر دمایی در ایستگاه لار که بیان کردند افزایش دمای کمینه و بیشینه در دهه ۲۰۲۰ به ترتیب بین ۱/۱۲ تا ۱/۲۹ و ۱/۰۲ تا ۲/۳۰ درجه سانتی‌گراد و میزان این افزایش در دهه ۲۰۵۰ به ترتیب بین ۱/۴۷ تا ۲/۳۵ و ۲/۶۱ تا ۴/۱۳ درجه سانتی‌گراد است، مطابقت دارد. در ضمن، نتایج مربوط به پنج مدل یادشده نشان می‌دهد بارش‌های حداکثری در تمامی مدل‌ها به جز مدل MPI-ESM-MR با میزان بارش بیشتری اتفاق خواهد افتاد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش دوره بازگشت، مقادیر حداکثر بارش محتمل طبق دو سناریوی RCP45 و RCP85 افزایش داشته است، در حالی که افزایش بارش حدی برای سناریوی RCP8.5 شدیدتر بوده است. با توجه به خشک و نیمه‌خشک بودن شهر کرمان و با توجه به بارش‌های پراکنده و رگباری، پیش‌بینی تغییرات پارامترهای دما و بارش می‌تواند ما را از وقوع سیل‌های مخرب که در فصل بدون رویش در این شهرستان رخ می‌دهد، آگاه کند. همچنین، مطلع بودن از میزان تغییرات دمایی، می‌تواند ما را به کشت گونه‌های با نیاز آبی کم و استفاده از سیستم آبیاری مناسب، متناسب با گونه مد نظر سوق دهد.

منابع

- [1]. Dosio A. Projection of temperature and heat waves for Africa with an ensemble of CORDEX Regional Climate Models. *Climate Dynamics*. 2017 Jul 1; 49(1-2):493-519.

- [2]. Nicholls N, Seneviratne S, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C, Zhang X. Changes in Climate Extremes and their Impacts on the 1 Natural Physical Environment 2. In Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation 2012 (pp. 109-230). Cambridge University Press Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- [3]. Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 2013 Sep; 1535.
- [4]. Zheng H, Chiew FH, Charles S, Podger G. Future climate and runoff projections across South Asia from CMIP5 global climate models and hydrological modelling. Journal of Hydrology: Regional Studies. 2018 Aug 1; 18:92-109.
- [5]. Dong TY, Dong WJ, Guo Y, Chou JM, Yang SL, Tian D, Yan DD. Future temperature changes over the critical Belt and Road region based on CMIP5 models. Advances in Climate Change Research. 2018 Mar 1; 9(1):57-65.
- [6]. Wu J, Xu Y, Gao XJ. Projected changes in mean and extreme climates over Hindu Kush Himalayan region by 21 CMIP5 models. Advances in Climate Change Research. 2017 Sep 1; 8(3):176-84.
- [7]. Shiferaw A, Tadesse T, Rowe C, Oglesby R. Precipitation extremes in dynamically downscaled climate scenarios over the Greater Horn of Africa. Atmosphere. 2018 Mar; 9(3):112.
- [8]. Timbal B, Fernandez E, Li Z. Generalization of a statistical downscaling model to provide local climate change projections for Australia. Environmental Modelling & Software. 2009 Mar 1; 24(3):341-58.
- [9]. Yang W, Andréasson J, Phil Graham L, Olsson J, Rosberg J, Wetterhall F. Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies. Hydrology Research. 2010 Jun; 41(3-4):211-29.
- [10]. Shagega FP, Munishi SE, Kongo VM. Prediction of future climate in Ngerengere river catchment, Tanzania. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C. 2019 Aug 1; 112:200-9.
- [11]. Gaitán E, Monjo R, Pórtoles J, Pino-Otín MR. Projection of temperatures and heat and cold waves for Aragón (Spain) using a two-step statistical downscaling of CMIP5 model outputs. Science of the Total Environment. 2019 Feb 10; 650:2778-95.
- [12]. Zhang H, Wang B, Li Liu D, Zhang M, Feng P, Cheng L, Yu Q, Eamus D. Impacts of future climate change on water resource availability of eastern Australia: A case study of the Manning River basin. Journal of hydrology. 2019 Jun 1; 573:49-59.
- [13]. Sadidi, J, Jafari Godneh M, Sajedi Hosseini H, Hamzadehzadeh G. Investigation of Trend and Forecasting of Climate Change (Temperature Component) in Arid and Semi-Arid Areas (Case Study: Kerman Province). 14th Iranian Geographical Society Congress, Tehran, Iran Geographical Association. 2019. [Persian].
- [14]. Sobhani B, Mohammadi M, Taymouri M. Prediction of droughts in Zanjan province during the period 2050-2011 using statistical exponential exponential model (LARS-WG). Geographical Studies of Arid Regions. 2017; 7(28): 59-42. [Persian].
- [15]. Karimi M, Nabizadeh A. Evaluation of Climate Change Impacts on Climate Parameters of Lake Urmia Watershed during 2040-2011 Using LARS-WG Model. Journal of Geography and Planning. 2018; 22(65): 285-267. [Persian].
- [16]. Moss RH, Edmonds JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, Van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. Nature. 2010 Feb; 463(7282):747-56.
- [17]. Watanabe M, Suzuki T, O'ishi R, Komuro Y, Watanabe S, Emori S, Takemura T, Chikira M, Ogura T, Sekiguchi M, Takata K. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. Journal of Climate. 2010 Dec; 23(23):6312-35.
- [18]. Dunne JP, John JG, Adcroft AJ, Griffies SM, Hallberg RW, Shevliakova E, Stouffer RJ, Cooke W, Dunne KA, Harrison MJ, Krasting JP. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. Journal of climate. 2012 Oct; 25(19):6646-65.
- [19]. Collins WJ, Bellouin N, Doutriaux-Boucher M, Gedney N, Hinton T, Jones CD, Liddicoat S, Martin G, O'Connor F, Rae J, Senior C. Evaluation of the HadGEM2 model. Hadley Centre Technical Note HCTN 74, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK. 2008.
- [20]. Raddatz TJ, Reick CH, Knorr W, Kattge J, Roeckner E, Schnur R, Schnitzler KG, Wetzell P, Jungclaus J. Will the tropical land biosphere dominate the climate-carbon cycle feedback during the twenty-first century?. Climate Dynamics. 2007 Nov 1; 29(6):565-74.

- [21]. Babaei Fini A, Qasemi A, Fatahi A. Investigating the Impact of Climate Change on the Trend of Iran Earth's Limit Rainfall Profiles. *Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards*. 2014; 1(3): 103-85. [Persian].
- [22]. Mohammadloo M, Tahmasebipour N. Assessing the Impacts of Climate Change on Climate Classifications in Parts of Northwestern Iran. *Rainwater Surface Systems*. 2018; 5(17): 46-35. [Persian].
- [23]. Frich P, Alexander LV, Della-Marta P, Gleason B, Haylock M, Klein-Tank A, Peterson T, Plummer N. Global changes in climatic extremes during the second half of the 20th century. Report of WMO CCL/CLIVER working group on climate change. 2000.
- [24]. Rao AR, Srinivas VV. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology*. 2006 Mar 1; 318(1-4): 37-56.
- [25]. Khosravian M, Fallah Ghalahari Gh, Entezari A, Sarvestani R. Investigation of the Performance of SDSM Statistical Exponential Model in Predicting Temperature Parameters in Three Different Climates (Case Study: Mashhad, Shiraz and Ramsar). *Journal of Geographical Sciences*. 2018; 29: 164-148. [Persian].
- [26]. Abbasi F, Babaian A, Habibi M, Goli Mokhtari L, Melbousi SH, Askari SH. Assessing the Impact of Climate Change on Iran's Temperature and Precipitation in the Next Decades, Using the MAGICC-SCENGEN Model. *Natural Geography Research*. 2010; 72: 109-91. [Persian].
- [27]. Ghazavi R, Nadimi M, Omidvar A, Imani R. Investigation of Future Climate Impacts on Discharge Changes in Ardabil Harochai Rivers Using SWAT and LARS-WG Model. *Hydrogeomorphology*. 2018; 15: 74-55. [Persian].
- [28]. Jahangir M, Sadatinejad S.J, Haghghi P. Predicting of Temperature Parameters under the CanEMS2 Model (Case Study: Lar Synoptic Station). *Journal of Extension and Development of Watershed Management*. 2018; 6(22): 45-53. [Persian].