

پیش‌نگری و پهنه‌بندی فراسنج‌های اقلیمی حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی با استفاده از ریزگردانی خروجی مدل HadGEM2-ES

حسین بهزادی کریمی^۱، غلامعلی مظفری^{۲*}، احمد مزیدی^۳، کمال امیدوار^۲

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۵/۲۵ ، تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۸/۲۴

چکیده

گرماپیش جهانی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر و تغییرات به وقوع پیوسته در اقلیم، موجب تغییر در فراسنج‌های اقلیمی شده است. در این تحقیق، ابتدا داده‌های روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش طی دوره آماری ۱۹۹۶-۲۰۱۵ از هشت ایستگاه واقع در حوضه آبریز کارون اخذ شد. سپس داده‌های خروجی مدل HadGEM2-ES، تحت سناریوهای RCPs توسط مدل LARS-WG6 ریزمقیاس شدند و چشم‌انداز آتی تغییرات دما و بارش طی سه دوره ۲۰۲۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ و ۲۰۶۱-۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه، مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصله، تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸,۵)، در دوره آینده دور، دامنه تغییرات ماهانه دمای کمینه از ۰/۷ تا ۴/۵ و دمای بیشینه از ۰/۱- تا ۵/۳ درجه سلسیوس نوسان خواهد داشت. در نیمه پربارش سال، طی دوره ۲۰۶۱-۲۰۸۰، بیشترین مقدار کاهش بارندگی تحت سناریوی حد وسط (RCP۴,۵) در ماه مارس و بیشترین میزان افزایش بارش، براساس سناریو RCP۸,۵ در ماه نوامبر رخ خواهد داد. در هر سه دوره آتی و تحت هر سه الگوی انتشار، ناپهنجاری دمای کمینه و بیشینه در تمام فصول سال مثبت است؛ به طوری که در دوره آینده دور و تحت سناریو RCP۸,۵، بیشترین ناپهنجاری دمای کمینه و بیشینه، به ترتیب در تابستان برابر با ۴/۲ و در فصل بهار، ۴/۸ درجه سلسیوس خواهد بود. میانگین فصلی بارش حوضه نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش نزولات جوی در دوره آینده دور، تحت سناریو RCP۴,۵، در زمستان برابر با ۵۵/۱ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در دوره آینده نزدیک، تحت سناریو RCP۸,۵، در فصل پاییز و به مقدار ۲۱/۶ میلی‌متر رخ خواهد داد. در طول دوره ۲۰۲۱-۲۰۸۰، متوسط بلندمدت بارش سالانه بین ۱/۹ تا ۱۴/۶ درصد در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش و متوسط سالانه دمای کمینه بین ۱/۲ تا ۳/۴ و دمای بیشینه بین ۱/۳ تا ۳/۷ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. واکاوی توزیع مکانی فراسنج‌های دما و بارش سطح حوضه در دوره‌های آتی بیانگر آن است که قلمرو مناطق پربارش و سرد، محدودتر شده و بر پهنه مناطق کم بارش و گرم افزوده خواهد شد؛ لذا رخداد تغییر اقلیم آینده در منطقه مورد مطالعه، اثرات منفی زیادی بر روی جریان رودخانه کارون و در نتیجه کاهش منابع آب حوضه خواهد داشت.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، فراسنج‌های اقلیمی، مدل HadGEM2-ES، مدل LARS-WG6، حوضه آبریز

کارون

مقدمه

تغییر اقلیم یک پدیده پیچیده در مقیاس جهانی است و به مفهوم تغییر در پارامترهای اقلیمی یک منطقه نسبت به رفتار قابل انتظار از اطلاعات مشاهده شده آن منطقه در یک افق زمانی بلندمدت است (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۹۳). پس از وقوع انقلاب صنعتی، میزان تولید گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های انسانی به‌طور فزاینده‌ای افزایش یافته است که با تأثیرگذاری بر روی دمای جو کره زمین، سبب به هم خوردن ترازمندی انرژی در سطح جهانی و گرمایش جهانی و وقوع تغییر اقلیم شده است. گرمایش جهانی و ارتباط معنی‌دار تغییرات دما و بارش در نقاط مختلف دنیا با افزایش دمای کره زمین، به‌عنوان مهم‌ترین نمودهای تغییر اقلیم در قرن حاضر قابل توجه هستند (ایمانی پور و همکاران، ۱۳۹۷). براساس برونداد مدل‌های گردش کلی، تحت سناریوهای مختلف، متوسط دمای جهان طی دوره‌های ۱۹۹۰ تا ۲۱۰۰ بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد که این افزایش دما، همواره با تغییراتی در الگوهای مکانی و زمانی بارش همراه خواهد بود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۳). به‌منظور برآورد اثرات تغییر اقلیم به‌طور معمول از مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود. از بین مدل‌های اقلیمی مختلف ارائه شده، مدل‌های گردش عمومی (GCM)^۱ از کاربرد گسترده‌تری برخوردار هستند. این مدل‌ها، سه‌بعدی بوده و قادر به پیش‌بینی تحولات زمانی و مکانی جو می‌باشند (هوردین و همکاران، ۲۰۰۶). با توجه به اینکه توان تفکیک مکانی خروجی‌های این مدل‌ها، بسیار کم است؛ برای قابل استفاده کردن این خروجی‌ها، نیاز به استفاده از روش‌های ریزمقیاس نمایی^۲ است. ریزمقیاس نمایی را می‌توان به دو روش ریزمقیاس نمایی آماری^۳ و دینامیکی^۴ انجام داد (هیویتسون و کرین، ۱۹۹۶). در ریزمقیاس نمایی آماری می‌توان از روش‌های متداول آماری مانند رگرسیون و همچنین مدل‌های مولد داده‌های هواشناسی

استفاده کرد (ویچرت و بورگی، ۱۹۹۸). در روش ریزمقیاس نمایی دینامیکی، معادلات حاکم بر بسته‌ها در شبکه‌های ریزتری از شبکه مدل گردش عمومی جو، با استفاده از روش‌های آنالیز عددی از قبیل تفاضل محدود، حل می‌شوند که در صورت استفاده از این روش می‌توان بر محدودیت دوم مدل‌های گردش عمومی جو یعنی ساده‌سازی فرآیندهای جوی نیز فائق آمد (هالتینر و ویلیامز، ۱۹۸۰؛ ویلی و هریس، ۲۰۰۶). استفاده از انواع مدل‌های ریزمقیاس گردانی آماری مانند ASD^۵، CLIM-GEN^۶، LARS-WG^۷ و SDSM^۸ برای مدل‌سازی رفتار اقلیم در نقاط مختلف جهان، خصوصاً در مواقعی که هزینه کم‌تر و ارزیابی سریع‌تر عوامل مؤثر بر تغییرات اقلیمی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است. (مک کی و همکاران، ۱۹۹۵). پیش‌بینی‌های اقلیم آینده توسط مدل‌های اقلیمی مبتنی بر این است که در آینده، چه مقدار گازهای گلخانه‌ای توسط عوامل انسانی وارد اتمسفر زمین خواهد شد و در پی آن، چه تغییراتی در سیستم اقلیمی کره زمین به وجود خواهد آمد. برای بررسی این تغییرات، سناریوهای مختلفی در ارتباط با میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده است. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)^۹ در گزارش پنجم خود در سال ۲۰۱۰، سناریوهای جدیدی تحت عنوان RCP^{۱۰} را براساس میزان واداشت تابشی ارائه کرد. این سناریوهای پیشنهادی معرف مسیرهای جدیدی از سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و دارای چهار حالت مختلف شامل RCP۲.۶، RCP۴.۵، RCP۶ و RCP۸.۵ هستند (خارین و همکاران، ۲۰۱۳).

در زمینه اثرات تغییر اقلیم بر مقادیر فراسنج‌های اقلیمی مانند دما و بارش، مطالعات زیادی در داخل و خارج از کشور انجام شده است. کلینگ و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی تغییرات پارامترهای هیدرواقلمی در حوضه آبریز

5- Automated Regression-Based Statistical Downscaling Tool

6- Climatic Data Generator

7- Long Ashton Research Station-Weather Generator

8- Statistical Down-Scaling Model

9- Intergovernmental Panel on Climate Change

10- Representative Concentration Pathways

1- Global Circulation Model

2- Downscaling

3- Statistical downscaling

4- Dynamical downscaling

نمایی شد. نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات بارش در فصول بهار و زمستان و بیشترین تغییرات مربوط به دما در فصول تابستان و بهار رخ می‌دهد. لطفی و همکاران (۱۳۹۹) به پیش‌بینی تغییرات بارش در غرب کشور پرداختند. بدین منظور از داده‌های مدل $CanESM2^{14}$ تحت سه سناریوی $RCP2.6$ ، $RCP4.5$ و $RCP8.5$ با کاربست مدل ریزمقیاس‌گردانی $SDSM$ بهره‌گرفته شد و تغییرات بارش دوره (۲۰۲۱-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه موردبررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصله، انتظار می‌رود میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه بین ۰/۰۵ تا ۱۵ درصد به‌طور متوسط در سطح منطقه مورد مطالعه افزایش یابد و بیشترین تغییرات مربوط به نواحی شمالی و شرقی و کمترین تغییرات نیز مربوط به نواحی جنوبی منطقه مورد مطالعه خواهد بود. فاخرنسب و همکاران (۱۳۹۹) در پژوهشی، چشم‌انداز آتی تغییرات دما و بارش در استان کهگیلویه و بویراحمد را موردبررسی قرار دادند. در این راستا، از خروجی مدل شبیه‌سازی‌کننده گردش کلی جو $MIROC5$ تحت سناریوهای $RCP8.5$ و $RCP4.5$ به‌صورت داده ریزمقیاس‌شده بهره‌گیری شد. بررسی نتایج شبیه‌سازی دوره آینده در قالب سناریوهای واداشتی حد بالا و حد وسط نشان از افزایش دمای کمینه و دمای بیشینه هوا در منطقه پژوهش در دوره آینده نسبت به دوره مبنا است. متغیر بارش نیز در دوره آینده در مقایسه با دوره مبنا با کاهش شدید و قابل‌ملاحظه‌ای به‌خصوص در ماه‌های مرطوب سال مواجه خواهد شد. بابائیان و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی با استفاده از مقیاس‌گاهی ترکیبی دینامیکی-آماری و با به‌کارگیری داده‌های شرایط مرزی مدل گردش کلی $CanESM$ از سری مدل‌های $CMIP5$ به پیش‌بینی متغیرهای بارش و دما در منطقه شرق کشور پرداختند. نتایج این تحقیق در مورد دما برای دوره آینده نزدیک حاکی از افزایش سالانه $4/2$ درجه‌ای در سناریوی $RCP4.5$ و $5/5$ درجه سلسیوس در سناریوی $RCP8.5$ می‌باشد. در دوره آینده دور، نتایج نشان دادند که دمای سالانه $5/2$ درجه

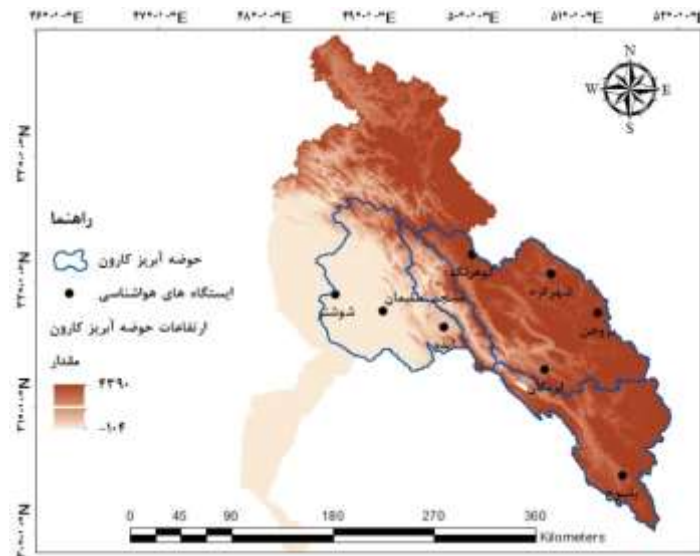
دانوب، تحت تأثیر سناریوهای تغییر اقلیم پرداختند. آن‌ها در این تحقیق از ۲۱ مدل GCM تحت سناریوی $A1B$ و مدل بارش رواناب HBV استفاده کردند. در تحقیق ایشان، همه مدل‌ها، افزایش ۲ تا ۵ درجه سلسیوس دما را تا پایان قرن ۲۱ نشان دادند. همچنین اکثر مدل‌ها، افزایش بارش و کاهش ۵ تا ۳۰ درصدی رواناب را برای سال‌های آتی پیش‌بینی کردند. اوه و همکاران (۲۰۱۴)، تغییرات مکانی و زمانی بارندگی را در محدوده آسیای شرقی از پروژه $CORDEX^{11}$ برای دوره حاضر (۱۹۸۶ تا ۲۰۰۵) و آینده (۲۰۳۱ تا ۲۰۵۰) با استفاده از مدل $RegCM4^{12}$ و تحت سناریوهای $RCP8.5$ و $RCP4.5$ بررسی کردند. به‌طورکلی نتایج نشان‌دهنده کارایی قابل‌قبول مدل است؛ اما درعین‌حال نتایج نسبتاً ضعیف‌تر پیش‌بینی مقدار بارش در تابستان نسبت به زمستان طی دوره پایه است. دیمیری و همکاران (۲۰۱۸)، به ارزیابی تغییرات احتمالی دمای کمینه و دمای بیشینه، تحت سناریوهای مختلف در هیمالیا پرداختند. براساس نتایج حاصله، دمای کمینه و دمای بیشینه در این منطقه بین $0/54$ تا $0/23$ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش و رژیم‌های هیدرولوژی آینده در حوضه آبریز رودخانه یانگ تسه در کشور چین پرداختند. نتایج آن‌ها بیانگر آن است که بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه (۱۹۶۱-۱۹۹۰) مقداری افزایش یابد، درحالی‌که دما به میزان قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت؛ بنابراین، خطر خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره آتی به میزان قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. نوری و ایلدرومی (۱۳۹۴) در پژوهشی به پیش‌بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش در منطقه حفاظت‌شده لشکر در ملایر استان همدان طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۹ پرداختند. در این راستا، داده‌های $HadCM3^{13}$ با استفاده از مدل $LARS-WG$ و تحت سه سناریوی $A1B$ ، $A2$ ، $B1$ و ریزمقیاس

11-COordinated Regional climate Downscaling EXperiment

12- Regional Circulation Model- Version 4

13- Hadley Center Climate Model- Version 3

14- Canadian Earth System Model (second generation)



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های همدید واقع در حوضه آبریز کارون

(۲۰۴۰-۲۰۲۱)، آینده میانه (۲۰۶۰-۲۰۴۱) و دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) در سطح حوضه آبریز کارون پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش تحت عنوان حوضه آبریز کارون (شامل زیر حوضه‌های آبریز کارون بالا، کارون وسط، کارون پایین و خراسان) محدود به مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۷ دقیقه و ۵۵ ثانیه تا ۵۲ درجه و ۰۴ دقیقه و ۵۰ ثانیه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۱۵ دقیقه و ۲۲ ثانیه تا ۳۲ درجه و ۴۹ دقیقه و ۳۵ ثانیه عرض شمالی می‌باشد. مساحت حوضه آبریز کارون ۳۸۱۰۴ کیلومترمربع بوده که در حدود ۵۷ درصد از سطح حوضه آبریز کارون بزرگ را شامل می‌شود (شکل ۱). با توجه به مساحت حوضه، ۸ ایستگاه به دلیل پراکنش مناسب آن‌ها نسبت به هم و وجود داده‌های تاریخی هواشناسی معتبر و کافی، انتخاب شدند. متغیرهای اقلیمی مورد بررسی شامل آمار روزانه فراسنج‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در طول دوره آماری پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۶) است. در بین ایستگاه‌های مورد بررسی، ایستگاه کوه‌رنگ با ارتفاع ۲۲۸۵ متر و ایستگاه شوشتر با ارتفاع ۶۷ متر از سطح دریا دارای بیشترین و کمترین ارتفاع در سطح حوضه

سلسیوس در سناریوی RCP۴.۵ و ۸/۹ درجه سلسیوس در سناریوی RCP۸.۵ افزایش می‌یابد و تغییرات بارش شرق کشور در آینده نزدیک، بین ۱۱- تا ۱۵- درصد و در دوره آینده دور، بین ۸- تا ۱۴۹+ درصد نسبت به دوره دیدبانی خواهد بود.

به دلیل گستردگی ایران در عرض‌های جغرافیایی مختلف و در نتیجه برخورداری از تنوع اقلیمی و قرارگیری آن در کمربند گرم و خشک جهان، این کشور را متأثر از مسئله گرمایش جهانی و تغییر اقلیم قرار داده است؛ لذا بررسی اثرات احتمالی تغییر اقلیم در حوضه‌های آبریز کشور که نقش قابل توجهی در تأمین منابع آب قابل دسترس و نیز توسعه بخش کشاورزی دارد؛ امری ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، به پیش‌بینی و پهنه‌بندی متغیرهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه و مقدار بارش در ارتباط با تغییر اقلیم، با به‌کارگیری مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG۶ و خروجی مدل گردش عمومی HadGEM۲-ES^{۱۵} که یکی از مدل‌های جفت شده^{۱۶} CMIP۵ است و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP۲.۶ (خوش‌بینانه)، RCP۴.۵ (حد وسط) و RCP۸.۵ (بدبینانه) برای سه دوره زمانی آینده نزدیک

15- Hadley centre global environment model- version 2
16- Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های همدید مورد مطالعه

نام اختصاری حوضه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی		عرض جغرافیایی		ارتفاع از سطح دريا		میانگین سالانه بارش (mm)	میانگین سالانه دما (°C)
		درجه دقیقه	درجه	درجه دقیقه	درجه	m(m(
کارون بالا	شهرکرد	۵۱	۵۰	۱۷	۳۲	۲۰۴۸	۱۱/۴	۳۳۱	
کارون بالا	بروجن	۱۸	۵۱	۵۹	۳۱	۲۲۶۰	۱۰/۷	۲۱۹/۷	
کارون بالا	کوه‌رنگ	۰۶	۵۰	۲۵	۳۲	۲۲۸۵	۹/۳	۱۳۲۶/۲	
کارون بالا	لردگان	۴۹	۵۰	۳۱	۳۱	۱۵۸۰	۱۵/۳	۵۱۶/۱	
ياسوج (خرسان)	ياسوج	۳۴	۵۱	۴۱	۳۰	۱۸۳۱	۱۵/۲	۷۳۲/۵	
کارون پایین	شوشتر	۵۰	۴۸	۰۳	۳۲	۶۷	۲۶/۳	۲۵۸/۴	
کارون پایین	مسجد سلیمان	۱۷	۴۹	۵۶	۳۱	۳۲۰	۲۵/۳	۳۶۵/۵	
کارون پایین	ن ایذه	۵۲	۴۹	۵۰	۳۱	۸۲۷	۲۰/۸	۵۶۹/۶	

می‌باشند. جدول (۱)، مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

در این مطالعه، روش تحقیق به این صورت است که ابتدا مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های همدید واقع در حوضه آبریز کارون شامل دمای کمینه، دمای بیشینه و مقدار بارش روزانه در دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۶ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. سعی بر آن بود که این ایستگاه‌ها در سطح حوضه پراکنده بوده و از توزیع مکانی مناسبی برخوردار باشند. پس از کنترل کیفی داده‌ها (تصادفی بودن، نرمال بودن و همگنی داده‌ها) و آشکارسازی روند سری سالانه فراسنج‌های مذکور طی دوره پایه که با استفاده از آزمون روند من-کندال^{۱۷} و آماره شیب سن^{۱۸}، انجام گرفت؛ داده‌های اقلیمی مورد بررسی توسط مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG^۶ برای دوره پایه شبیه‌سازی و پس از صحت‌سنجی مدل با کمک شاخص‌های خطاسنجی (RMSE، MSE، MAE و R^2)، داده‌های دما و بارش در بازه‌های زمانی ماهانه، فصلی و سالانه، برای سه دوره زمانی آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱)، با استفاده از خروجی مدل جفت شده جوی-اقیانوسی HadGEM2-ES و تحت

سناریوهای انتشار RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵ تولید شد. به‌منظور نمایش بهتر وضعیت فراسنج‌های اقلیمی در منطقه مورد مطالعه، نقشه‌های پهنه‌بندی متوسط تغییرات سالانه متغیرهای مذکور طی دوره‌های آتی در محیط ArcGIS نسخه ۱۰/۷ تهیه گردید. در پایان، جهت نمایش عدم قطعیت فراسنج‌های مورد مطالعه، از نمودار جعبه‌ای ۲۰ ساله در دوره‌های آینده و تحت سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه استفاده شد.

الف - تحلیل روند با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر شیب سن

آزمون ناپارامتری من-کندال (MK) برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۰). در این آزمون، H_0 نشان‌دهنده عدم وجود روند و H_1 وجود روند را در سری زمانی داده‌ها نشان می‌دهد (گوچیچ و تراژکوویچ، ۲۰۱۳). آماره استاندارد Z در آزمون من-کندال از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک پیروی می‌کند و برای اندازه‌گیری روند استفاده می‌شود. در آزمون MK، مقدار مثبت Z، نشان‌دهنده روند صعودی

17- Mann-Kendall

18- Sens estimator of slope

(۱۹۹۷) استفاده شده است.

ج - مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG۶

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌های تصادفی آب و هوایی است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، دماهای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. مبنای مدل LARS-WG برای مدل‌سازی، طول دوره‌های خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش توزیع نیمه تجربی هست. در این مدل، سری‌های فوریه، دما را تخمین می‌زنند. دماهای کمینه و بیشینه روزانه به صورت فرآیندهای تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که وابسته به وضعیت تر یا خشک بودن روز موردنظر هستند؛ مدل‌سازی می‌شوند. سری فوریه، مرتبه سوم برای شبیه‌سازی میانگین دمای فصلی به کار می‌رود. مقادیر باقی‌مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار مشاهداتی به دست می‌آیند، در تحلیل خودهمبستگی زمانی داده‌های کمینه و بیشینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. نسخه ۶ این مدل (LARS-WG۶) در سال ۲۰۱۸، جهت ریزمقیاس گردانی داده‌های گزارش پنجم (CIMP۵) به‌روز و منتشر گردید که در این پژوهش جهت ریزگردانی از داده‌های خروجی مدل جهانی HadGEM۲ تحت سه سناریوی واداشت تابشی (RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵) استفاده شد. مدل HadGEM۲ از نوع مدل‌های گردش عمومی جفت شده جوی-اقیانوسی است و در مرکز هادلی سازمان هواشناسی انگلیس طراحی و توسعه یافته است که دارای قدرت تفکیک مکانی ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی در ۱/۸۷۵ درجه طول جغرافیایی است و داده‌های آن، برای دوره پایه ۲۰۰۵-۱۸۵۰ و ۲۱۰۰-۲۰۰۶ برای دوره آینده، موجود است. روش کار به این صورت است که مدل، داده‌های دیده‌بانی شده دوره پایه را دریافت نموده، با بررسی آن‌ها، مشخصه‌های آماری داده‌ها استخراج می‌شوند؛ سپس به‌منظور صحت‌سنجی و اطمینان از توانمندی مدل، برای دوره آماری پایه، مدل را اجرا نموده تا یک سری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجدداً ایجاد

است؛ درحالی‌که مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی است. باید توجه داشت که در این آزمون عدم پذیرش H_0 به این معنا نیست که روند در سری زمانی وجود ندارد؛ در حقیقت نشان می‌دهد که شواهد موجود برای نتیجه‌گیری عدم وجود روند در سری زمانی کافی نیست. همچنین جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سن (Sen) استفاده شد (سن، ۱۹۶۸). تخمین گر شیب سن با استفاده از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌ای یک سری زمانی، یک شیب میانه را برای سری زمانی داده‌ها محاسبه می‌کند. در روش سن، برای هر دو جفت داده متوالی، یک شیب محاسبه می‌شود. شیب‌های محاسبه‌شده، تشکیل یک سری زمانی می‌دهند که میانه آن‌ها، شیب‌خط روند را نشان می‌دهد. در این پژوهش، برای انجام آزمون‌های روندیابی از نرم‌افزار MAKESENS۲.۰ تحت نرم‌افزار Excel که توسط سالمی و همکاران (۲۰۰۲) به‌منظور کشف و برآورد روند در سری‌های زمانی بارندگی و آلودگی جو در مؤسسه هواشناسی فنلاند توسعه یافته است؛ استفاده گردید.

ب - مدل‌های گردش عمومی (GCM)

در خصوص مدل‌سازی اقلیمی دوره‌های آینده، روش‌های مختلفی وجود دارد که جامع‌ترین این روش‌ها، مدل‌های گردش عمومی (GCM) هستند. مدل‌های GCM، می‌توانند برای شبیه‌سازی جو-اقیانوس با مقیاس‌های گوناگون به کار گرفته شوند. یکی از چالش‌های مهم در مطالعات مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو، بزرگ‌مقیاس بودن مکانی متغیرهای شبیه‌سازی شده است؛ بنابراین خروجی‌های حاصل از این مدل‌ها در مقیاس ایستگاهی و حتی حوضه آبخیز قابل‌استفاده نیستند؛ لذا باید خروجی‌های این مدل‌ها، ریزمقیاس شوند. ریزمقیاس‌نمایی داده‌های حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو معمولاً به دو روش آماری و دینامیکی صورت می‌گیرد. در این تحقیق، برای ریزمقیاس گردانی مدل‌های گردش عمومی، از مولد آب و هوایی LARS-WG ابداع‌شده توسط راسکو و همکاران (۱۹۹۱) و سمنوف و بارو

مورد مطالعه

به‌منظور آشکارسازی روند در سری‌های مشاهداتی کمینه دما، بیشینه دما و بارش سالانه، آزمون تعیین روند مَن-کندال با استفاده از نرم‌افزار MAKESENS۲.۰ به اجرا درآمد. این آزمون برای سری زمانی ۲۰ ساله دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۶)، برای ایستگاه‌های همدیدی یاسوج، ایذه، بروجن، شهرکرد، شوشتر، کوهرنگ، لردگان و مسجدسلیمان صورت گرفت؛ که نتایج حاصل از آن در جدول (۲) آمده است. براساس نتایج حاصله، روند دمای کمینه سالانه در تمامی ایستگاه‌های واقع در حوضه آبریز کارون به‌جز ایستگاه بروجن (۰/۰۳-، افزایشی است و این روند افزایشی در ایستگاه ایذه در سطح ۹۵٪ و در ایستگاه‌های شوشتر و مسجدسلیمان در سطح ۹۹٪ سطح معنی‌دار شده است. دمای بیشینه در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، دارای روند افزایشی است و این روند افزایشی در ایستگاه‌های بروجن و شوشتر در سطح ۹۵٪ و در ایستگاه‌های ایذه و مسجدسلیمان در سطح ۹۹٪ معنی‌دار می‌باشد. در دوره ۲۰ سال پایه، روند سالانه سری مشاهداتی بارش در ایستگاه‌های یاسوج، بروجن و شهرکرد، افزایشی و در ایستگاه‌های ایذه، شوشتر، کوهرنگ و مسجدسلیمان، دارای روند کاهشی و در ایستگاه لردگان، بدون روند می‌باشد؛ اما روند کاهشی و افزایشی بارش در هیچ‌کدام از ایستگاه‌ها، معنی‌دار نمی‌باشد. در سطح حوضه نیز متوسط سالانه دمای کمینه و دمای بیشینه، دارای روند افزایشی و مقدار بارش دارای روند کاهشی است.

۲- نتایج ارزیابی عملکرد مدل *LARS-WG6* در شبیه‌سازی تغییرات فراسنج‌های اقلیمی

به‌طور کلی توانایی مدل مولد داده‌های آب و هوایی اثر مستقیمی بر روی ارزیابی تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه دارد؛ لذا به‌منظور کالیبره کردن و اطمینان از صحت مدل *LARS-WG6*، ابتدا مدل برای دوره آماری پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۶) اجرا گردید؛ سپس خروجی‌های مدل که شامل میانگین ماهانه دمای کمینه، دمای بیشینه و

شود؛ سپس این خروجی‌ها، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها، با مشخصات آماری مشاهداتی مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و داده‌های بازتولیدی، نشان می‌دهد که می‌توان از مدل *Lars-WG* به‌منظور ریزمقیاس کاهی (در مقیاس ایستگاهی) خروجی مدل‌های اقلیمی *GCM* و برآورد تغییرات فراسنج‌های دما و بارش برای دوره آتی استفاده کرد. (آقاشاهی و همکاران، ۱۳۹۱).

د - معیارهای ارزیابی کارایی مدل

در این پژوهش، جهت بررسی عملکرد مدل *LARS-WG6* از شاخص‌های ضریب تبیین $(R^2)^{19}$ ، میانگین مربعات خطا^{۲۰} (*MSE*)، مجذور میانگین مربعات خطا^{۲۱} (*RMSE*) و میانگین مطلق خطا^{۲۲} (*MAE*) استفاده شد؛ که روابط مربوط به آن‌ها در ادامه آورده شده است.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q^o)^2} \quad (1)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2}{n} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^o - Q_i^m)^2}{n}} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Q_i^o - Q_i^m|}{n} \quad (4)$$

در این روابط، Q_i^o داده‌های مشاهداتی، Q_i^m داده‌های شبیه‌سازی شده و n تعداد داده‌هاست.

نتایج و بحث

۱- تحلیل روند سالانه فراسنج‌های اقلیمی در ایستگاه‌های

19 19- Coefficient of Determination
20 20- Mean Squared Error
21 21- Root Mean Square Error
22 22- Mean Absolute Error

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل روند سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۲۰۱۵-۱۹۹۶)

ایستگاه				آماره	فراسنج
شهرکرد	بروجن	ایذه	ياسوج		
۰/۵۵	-۰/۰۳	۲/۴۳*	۰/۲۳	من کندال	دمای کمینه (°C)
۰/۰۲۷	-۰/۰۰۳	۰/۰۵۰	۰/۰۰۸	شیب سن روند	
افزایشی	کاهشی	افزایشی	افزایشی	من کندال	دمای بیشینه (°C)
۱/۲۰	۲/۱۷*	۲/۹۵**	۰/۷۵	شیب سن روند	
۰/۰۳۹	۰/۰۶۵	۰/۰۷۹	۰/۰۲۷	من کندال	بارش (mm)
افزایشی	افزایشی	افزایشی	افزایشی	شیب سن روند	
۰/۰۳	۰/۲۹	-۰/۵۵	۰/۷۲	من کندال	بارش (mm)
۰/۴۱۹	۰/۶۳۰	-۲/۹۲۲	۶/۹۱۰	شیب سن روند	
افزایشی	افزایشی	کاهشی	افزایشی	روند	

ایستگاه				آماره	فراسنج
مسجد سلیمان	لردگان	کوه رنگ	شوشتر		
۳/۵۴**	۰/۶۸	۰/۵۵	۳/۲۱**	من کندال	دمای کمینه (°C)
۰/۰۷۲	۰/۰۲۶	۰/۰۲۷	۰/۰۸۸	شیب سن روند	
افزایشی	افزایشی	افزایشی	افزایشی	من کندال	دمای بیشینه (°C)
۲/۸۲**	۱/۴۶	۱/۵۹	۲/۴۳*	شیب سن روند	
۰/۰۸۲	۰/۰۴۸	۰/۰۳۹	۰/۰۸۰	من کندال	بارش (mm)
افزایشی	افزایشی	افزایشی	افزایشی	شیب سن روند	
-۰/۴۲	۰/۰۰	-۰/۷۵	-۱/۰۱	من کندال	بارش (mm)
-۰/۹۶۰	۰/۰۰	-۷/۳۵۱	-۲/۴۰۸	شیب سن روند	
کاهشی	بدون روند	کاهشی	کاهشی	روند	

فراسنج			آماره	نام ایستگاه
بارش (mm)	دمای بیشینه (°C)	دمای کمینه (°C)		
-۰/۲۹	۱/۹۸*	۱/۳۳	من کندال	حوضه آبریز کارون
-۱/۰۳۸	۰/۰۵۴	۰/۰۳۹	شیب سن روند	
کاهشی	افزایشی	افزایشی	روند	

* در سطح ۰/۰۵ معنی دار می باشد. ** در سطح ۰/۰۱ معنی دار می باشد.
** در سطح ۰/۰۱ معنی دار می باشد.

برای فراسنج های مورد بررسی با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد؛ بنابراین عملکرد مدل LARS-WG۶ برای شبیه سازی داده های مورد بررسی در ایستگاه های مورد مطالعه، مناسب و قابل قبول است.

شکل ۲، نشان می دهد که میانگین مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده و همچنین انحراف معیار دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش به هم نزدیک بوده و اختلاف چندانی با یکدیگر ندارند که حاکی از عملکرد مناسب

بارش و انحراف معیار آنها می باشد با داده های مشاهداتی و همچنین با استفاده از آزمون t مقایسه گردید؛ که نتایج حاصل از آنها در جدول ۳ و شکل ۲ آورده شده است. در آزمون آماری t، هنگامی که مقدار P-Value بزرگ تر از ۰/۰۵ به دست آید، عملکرد مدل در سطح معنی داری ۵ درصد قابل قبول است (سمنوف و استراتونوویچ، ۲۰۱۰). نتایج آزمون t بیانگر آن است که اختلاف معنی داری بین مقادیر مدل سازی شده و مقادیر مشاهداتی آنها

جدول ۳. نتایج آزمون t (P-Value) برای میانگین ماهانه مقادیر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سطح اطمینان ۹۵٪.

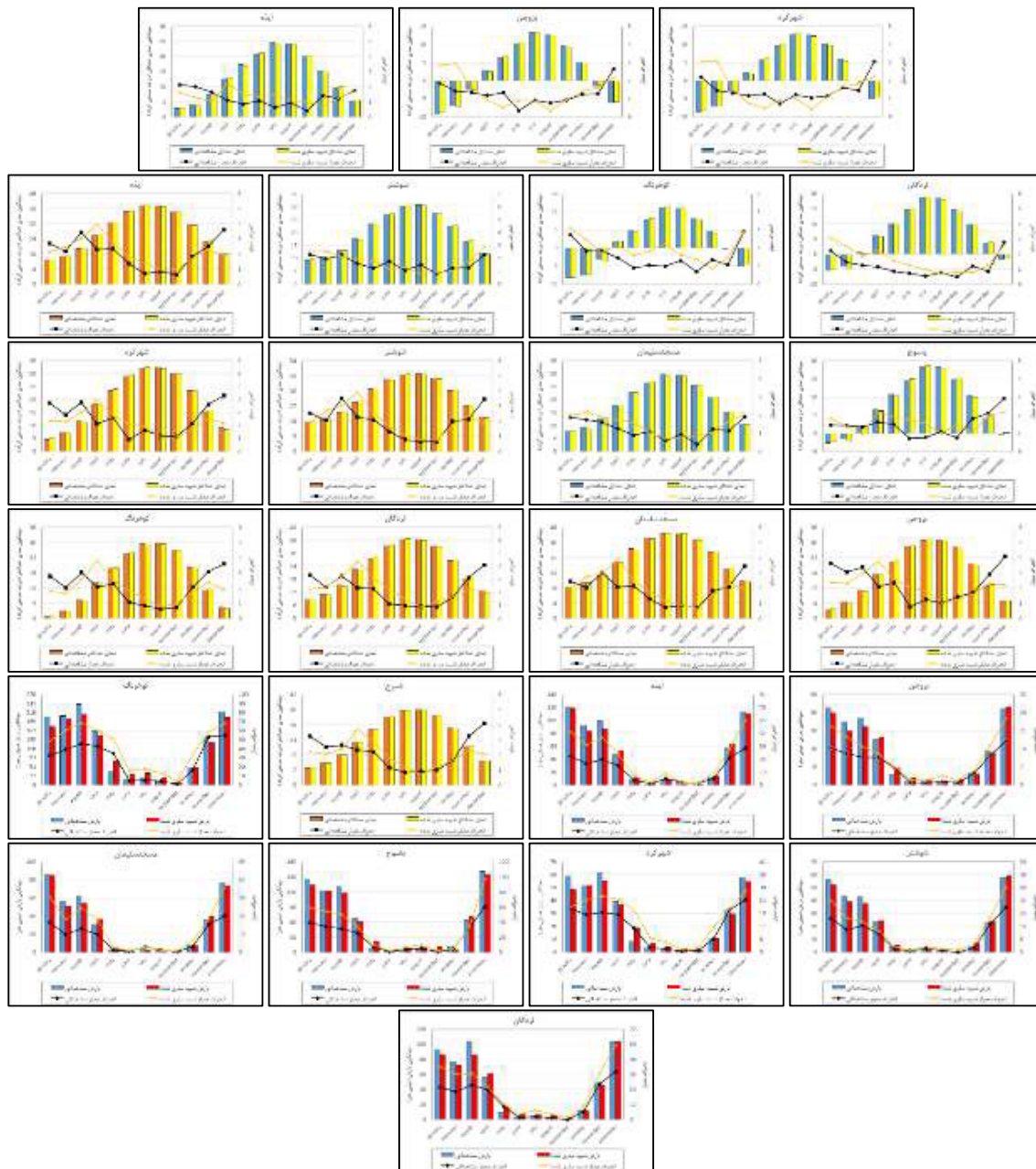
ایستگاه‌های هواشناسی	P-Value	ماه (میلادی)											
		january	february	march	april	may	june	july	august	september	october	november	december
ياسوج	دمای کمینه	۰/۶۴۷	۰/۷۲۱	۰/۸۵۴	۰/۸۹۷	۰/۷۹۶	۰/۳۹۱	۰/۵۴۷	۰/۶۳۵	۰/۳۹۴	۰/۶۴۱	۰/۷۷۹	
	دمای بیشینه	۰/۸۴۱	۰/۵۲۷	۰/۸۹۴	۰/۸۸۴	۰/۸۶۱	۰/۶۹۳	۰/۸۱۵	۰/۴۳۶	۰/۷۲۵	۰/۷۷۷	۰/۸۲۹	
	بارش	۰/۸۱۷	۰/۸۲۷	۰/۸۷۱	۰/۷۷۳	۰/۳۲۶	۰/۲۰۳	۰/۸۵۵	۰/۶۱۰	۰/۳۵۴	۰/۲۶۴	۰/۶۱۱	۰/۹۲۸
لردگان	دمای کمینه	۰/۹۰۷	۰/۶۳۵	۰/۶۸۵	۰/۷۹۱	۰/۸۲۶	۰/۵۴۷	۰/۹۰۸	۰/۷۶۶	۰/۸۲۷	۰/۷۲۴	۰/۹۱۰	
	دمای بیشینه	۰/۷۰۷	۰/۸۵۴	۰/۸۲۸	۰/۷۴۹	۰/۸۰۰	۰/۴۸۹	۰/۶۹۴	۰/۶۸۳	۰/۷۹۴	۰/۹۱۱	۰/۶۸۱	
	بارش	۰/۸۵۸	۰/۹۲۲	۰/۴۴۸	۰/۵۰۷	۰/۷۳۷	۰/۸۷۱	۰/۲۰۱	۰/۵۸۰	۰/۹۵۰	۰/۵۱۷	۰/۸۱۶	
شهرکرد	دمای کمینه	۰/۷۶۳	۰/۹۱۴	۰/۸۵۷	۰/۷۲۰	۰/۷۲۴	۰/۵۸۷	۰/۸۷۴	۰/۶۹۱	۰/۵۱۴	۰/۷۵۴	۰/۸۱۴	
	دمای بیشینه	۰/۷۳۶	۰/۸۱۵	۰/۷۳۴	۰/۸۱۰	۰/۸۴۸	۰/۵۲۶	۰/۸۴۵	۰/۵۲۵	۰/۵۰۸	۰/۹۰۶	۰/۶۱۸	
	بارش	۰/۴۵۶	۰/۷۰۷	۰/۸۸۴	۰/۸۲۱	۰/۸۵۴	۰/۸۷۴	۰/۴۴۱	۰/۷۷۲	۰/۳۵۳	۰/۴۱۵	۰/۹۲۴	
بروجن	دمای کمینه	۰/۷۵۳	۰/۸۶۱	۰/۸۳۱	۰/۶۶۵	۰/۸۲۸	۰/۵۵۱	۰/۸۷۳	۰/۵۸۰	۰/۶۰۱	۰/۷۷۸	۰/۸۰۷	
	دمای بیشینه	۰/۷۴۲	۰/۷۷۰	۰/۷۵۳	۰/۸۴۲	۰/۷۸۸	۰/۶۲۶	۰/۸۱۴	۰/۵۵۴	۰/۷۳۱	۰/۸۶۲	۰/۷۴۶	
	بارش	۰/۹۱۰	۰/۶۲۷	۰/۸۴۵	۰/۵۵۴	۰/۳۸۵	۰/۸۷۶	۰/۳۳۸	۰/۸۶۳	۰/۷۱۳	۰/۶۱۳	۰/۷۰۶	
کوه‌رنگ	دمای کمینه	۰/۹۱۲	۰/۹۱۴	۰/۵۸۰	۰/۷۴۸	۰/۸۲۳	۰/۶۷۱	۰/۹۱۳	۰/۶۹۸	۰/۸۰۶	۰/۶۴۰	۰/۸۲۸	
	دمای بیشینه	۰/۶۷۷	۰/۷۸۲	۰/۷۸۳	۰/۷۸۴	۰/۸۷۷	۰/۶۵۶	۰/۸۷۲	۰/۶۳۵	۰/۲۴۸	۰/۸۷۷	۰/۷۰۵	
	بارش	۰/۵۴۳	۰/۷۶۹	۰/۸۸۲	۰/۹۳۸	۰/۸۰۹	۰/۶۹۹	۰/۴۸۳	۰/۴۱۵	۰/۴۳۴	۰/۳۶۷	۰/۹۳۹	
مسجدسلیمان	دمای کمینه	۰/۸۹۶	۰/۸۶۱	۰/۷۹۳	۰/۶۰۲	۰/۶۴۰	۰/۴۱۴	۰/۶۳۰	۰/۸۶۵	۰/۷۷۶	۰/۶۸۲	۰/۸۶۴	
	دمای بیشینه	۰/۸۸۲	۰/۸۶۲	۰/۷۵۷	۰/۸۴۸	۰/۷۳۴	۰/۷۹۷	۰/۸۰۰	۰/۷۱۹	۰/۵۰۶	۰/۸۳۲	۰/۷۶۶	
	بارش	۰/۹۳۱	۰/۶۷۹	۰/۶۹۶	۰/۵۹۳	۰/۳۶۹	۰/۵۷۵	۰/۷۲۶	۰/۶۹۶	۰/۲۰۶	۰/۹۲۶	۰/۸۶۴	
ایذه	دمای کمینه	۰/۷۹۹	۰/۸۳۸	۰/۷۱۷	۰/۸۲۹	۰/۶۳۸	۰/۵۴۹	۰/۷۷۶	۰/۷۱۷	۰/۷۱۹	۰/۹۰۱	۰/۸۹۰	
	دمای بیشینه	۰/۸۷۳	۰/۸۸۰	۰/۷۹۱	۰/۹۲۰	۰/۶۷۹	۰/۸۱۲	۰/۹۰۹	۰/۸۶۶	۰/۲۳۴	۰/۸۵۳	۰/۷۷۵	
	بارش	۰/۹۰۵	۰/۶۷۲	۰/۷۱۶	۰/۷۰۴	۰/۴۳۷	۰/۶۱۱	۰/۹۵۰	۰/۱۰۱	۰/۴۶۹	۰/۶۸۲	۰/۸۹۴	
شوشتر	دمای کمینه	۰/۸۱۶	۰/۶۸۸	۰/۹۲۱	۰/۷۵۹	۰/۶۳۰	۰/۵۰۲	۰/۵۰۳	۰/۷۳۲	۰/۶۲۰	۰/۶۸۲	۰/۷۶۷	
	دمای بیشینه	۰/۸۵۰	۰/۶۸۹	۰/۸۴۰	۰/۷۰۶	۰/۷۳۰	۰/۸۲۴	۰/۵۴۰	۰/۷۲۴	۰/۱۰۶۲	۰/۷۱۸	۰/۷۶۰	
	بارش	۰/۷۲۱	۰/۶۶۱	۰/۶۳۰	۰/۹۲۲	۰/۳۵۵	۰/۷۱۰	۰/۸۷۴	۰/۵۰۲	۰/۲۰۳	۰/۳۲۹	۰/۸۰۱	

تعیین در فراسنج‌های دمای کمینه و دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها، بین ۰/۹۸ تا ۰/۹۹ و برای بارش نیز از ۰/۸۷ در ایستگاه‌های یاسوج و شوشتر تا ۰/۹۶ در ایستگاه شهرکرد متغیر می‌باشد؛ بنابراین، مدل LARS-WG۶، در شبیه‌سازی داده‌های دما از دقت مناسب‌تری نسبت به شبیه‌سازی داده‌های بارش برخوردار است.

۳- پیش‌نگری دمای کمینه، بیشینه و بارش در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPS در شکل (۳)، مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) و تحت الگوهای مختلف واداشت تابشی، با استفاده از مدل ریزمقیاس گردانی LARS-WG۶ و خروجی مدل

مدل LARS-WG۶ جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی فراسنج‌های مذکور در منطقه مورد مطالعه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین تطابق و کمترین انحراف معیار مربوط به ماه‌های گرم و کم بارش است؛ به‌طوری‌که با افزایش تغییرات بارش در ماه‌های سرد سال، دقت مدل در شبیه‌سازی کاهش می‌یابد. همچنین مدل، در ایستگاه‌های شوشتر، مسجدسلیمان و ایذه واقع در غرب حوضه از عملکرد مناسب‌تری نسبت به سایر ایستگاه‌ها، برخوردار است.

همچنین جهت اطمینان از صحت سنجی مدل، از شاخص‌های خطاسنجی MAE، MSE، RMSE و R^2 نیز استفاده شد جدول (۴). نتایج حاصل نشان داد که مدل لارس در شبیه‌سازی داده‌های مذکور در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه، دقت زیادی دارد. مقدار ضریب



شکل ۲. مقایسه میانگین و انحراف معیار دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

تحت سناریو RCP۴.۵ در ماه ژوئن مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین میزان افزایش دمای بیشینه در ماه می و تحت سناریوهای RCP۴.۵ و RCP۸.۵، به ترتیب به مقدار ۳/۲ و ۲/۹ درجه سلسیوس رخ می‌دهد. کمترین مقدار افزایش دمای کمینه و بیشینه، به ترتیب در ماه‌های ژانویه و دسامبر و تحت سناریو RCP۴.۵

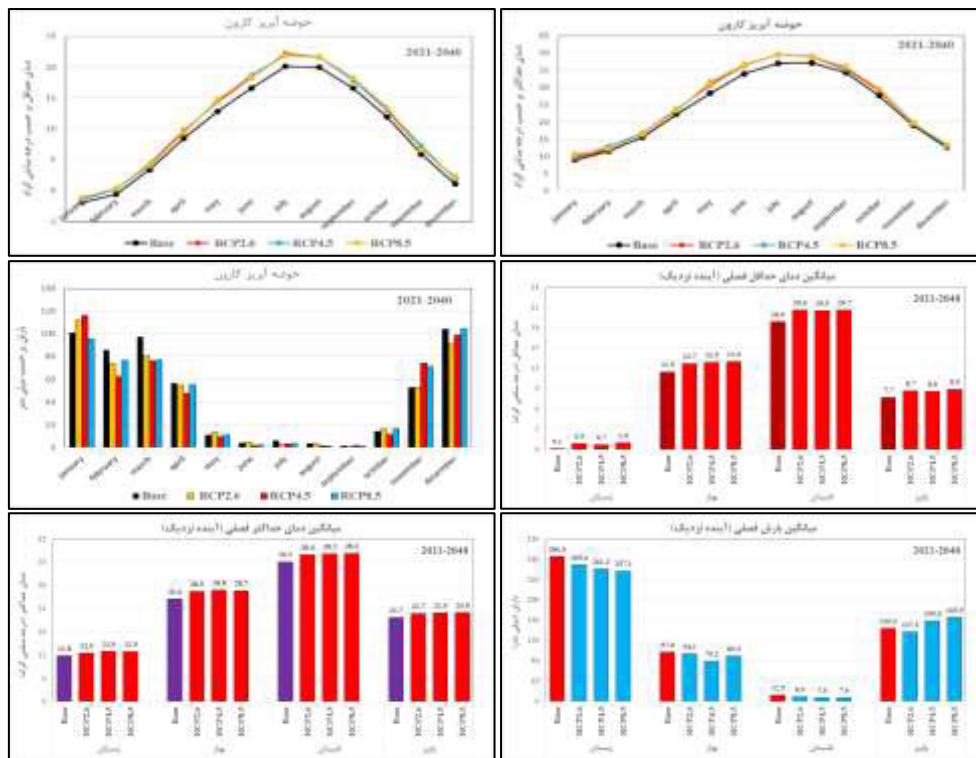
جهانی HadGEM۲-ES نسبت به دوره پایه، آورده شده است. مطابق نتایج حاصله، میانگین دمای کمینه و دمای بیشینه ماهانه حوضه در دوره ۲۰ ساله آینده نزدیک و براساس هر سه سناریو، در همه ماه‌ها افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش دمای کمینه (برابر با ۲/۱ °C)، تحت سناریو RCP۲.۶ در ماه جولای و

جدول ۴. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG6 با استفاده از معیارهای خطاسنجی

ایستگاه‌های هواشناسی	فراسنج	شاخص			
		R ²	RMSE	MSE	MAE
ياسوج	(°C) دمای کمینه	۰/۹۹	۰/۰۶۶	۰/۰۰۴	۰/۰۵۴
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۲۰۷	۰/۰۴۳	۰/۱۶۷
	(mm) بارش	۰/۸۷	۲/۸۳۹	۸/۰۶۰	۲/۱۱۲
لردگان	(°C) دمای کمینه	۰/۹۸	۰/۱۷۵	۰/۰۳۱	۰/۱۴۷
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۰۷۹	۰/۰۰۶	۰/۰۶۷
	(mm) بارش	۰/۸۸	۰/۹۲۱	۰/۸۴۸	۰/۷۰۳
شهرکرد	(°C) دمای کمینه	۰/۹۸	۰/۱۵۲	۰/۰۲۳	۰/۱۳۱
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۱۵۸	۰/۰۲۵	۰/۱۳۴
	(mm) بارش	۰/۹۶	۰/۵۶۰	۰/۳۱۴	۰/۴۰۸
بروجن	(°C) دمای کمینه	۰/۹۸	۰/۱۳۵	۰/۰۱۸	۰/۱۰۸
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۱۹۷	۰/۰۳۹	۰/۱۶۴
	(mm) بارش	۰/۹۱	۰/۶۰۴	۰/۳۶۴	۰/۴۸۸
کوه‌رنگ	(°C) دمای کمینه	۰/۹۸	۰/۱۳۲	۰/۰۱۷	۰/۱۱۳
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۲۳۵	۰/۰۵۵	۰/۱۹۵
	(mm) بارش	۰/۹۵	۲/۰۵۸	۴/۲۳۷	۱/۶۷۴
مسجد سلیمان	(°C) دمای کمینه	۰/۹۹	۰/۰۸۴	۰/۰۰۷	۰/۰۷۱
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۱۳۶	۰/۰۱۹	۰/۱۱۶
	(mm) بارش	۰/۹۲	۰/۶۸۳	۰/۴۶۷	۰/۵۴۲
ایذه	(°C) دمای کمینه	۰/۹۹	۰/۰۹۳	۰/۰۰۹	۰/۰۷۴
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۱۸۸	۰/۰۳۵	۰/۱۵۴
	(mm) بارش	۰/۹۱	۱/۱۵۵	۱/۳۳۵	۱/۰۰۲
شوشتر	(°C) دمای کمینه	۰/۹۹	۰/۱۰۷	۰/۰۱۱	۰/۰۸۹
	(°C) دمای بیشینه	۰/۹۹	۰/۱۴۵	۰/۰۲۱	۰/۱۲۰
	(mm) بارش	۰/۸۷	۰/۹۶۸	۰/۹۳۸	۰/۸۳۸

همان‌طور که مشاهده می‌شود از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰، ناپهنجاری دمای کمینه و دمای بیشینه در تمام فصول سال مثبت است؛ به‌طوری‌که کمترین ناپهنجاری دمای کمینه و دمای بیشینه در فصل زمستان و به ترتیب تحت سناریوهای RCP۴.۵ و RCP۲.۶، برابر با ۰/۶ و ۰/۷ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین، بیشترین ناپهنجاری دمای کمینه در فصل تابستان و تحت سناریو RCP۸.۵، به مقدار ۱/۸ و بیشترین ناپهنجاری دمای بیشینه در فصل بهار و تحت سناریو RCP۴.۵ به مقدار ۲/۲ درجه سلسیوس رخ خواهد داد. میانگین فصلی بارش حوضه آبریز کارون در دوره پایه نشان می‌دهد که بیشترین

رخ خواهد داد؛ بنابراین در دوره آینده نزدیک، دامنه تغییرات دمای کمینه ماهانه از ۰/۴ تا ۲/۱ و دمای بیشینه ماهانه از ۰/۳ تا ۳/۲ درجه سلسیوس در هر سه سناریو، متغیر است. بارش ماهانه در این دوره، تحت سناریوهای موردبررسی، در اکثر ماه‌های سال به‌غیر از نوامبر و ژانویه (به‌جز سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵)، کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در شش‌ماهه پربارش سال، بیشترین مقدار کاهش بارندگی، تحت سناریو RCP۴.۵، در ماه فوریه برابر با ۲۶/۹ درصد می‌باشد. همچنین، بیشترین میزان افزایش بارش، براساس الگوی واداشت تابشی حد وسط، در ماه نوامبر و به مقدار ۴۰/۶ درصد رخ می‌دهد.



شکل ۳. مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوهای مختلف RCPs

RCP۴.۵ و RCP۸.۵، میانگین تغییرات دمای کمینه به ترتیب برابر با ۱/۳، ۱/۲ و ۱/۴ و میانگین تغییرات دمای بیشینه برابر با ۱/۴، ۱/۶ و ۱/۶ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. از لحاظ ایستگاهی، بیشینه نابهنجاری دمای کمینه، براساس سناریوی خوش‌بینانه (RCP۲.۶) در ایستگاه لردگان و نیز براساس سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵) در ایستگاه‌های ایذه، شوشتر و یاسوج به مقدار ۱/۵ °C مشاهده می‌شود. همچنین، بیشینه نابهنجاری دمای بیشینه به مقدار ۱/۹ °C، براساس سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) در ایستگاه‌های ایذه، شوشتر و مسجدسلیمان رخ می‌دهد. در دوره آینده نزدیک، متوسط تغییرات بارندگی سالانه در سطح حوضه و تحت سناریوهای RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵ به ترتیب برابر با ۵/۶، ۶/۱ و ۳/۷ درصد نسبت به دوره پایه، کاهش می‌یابد. در این دوره و تحت هر سه سناریو، مقدار بارش سالانه در بعضی ایستگاه‌های مورد مطالعه، کاهش

درصد نزولات جوی به ترتیب مربوط به فصول زمستان، پاییز، بهار و تابستان با ۵۳، ۲۶/۷، ۱۸ و ۲/۳ درصد است. نمودار میانگین بارندگی فصلی نشان می‌دهد که در فصول زمستان، بهار و تابستان تحت هر سه سناریوی آینده و در فصل پاییز تحت سناریوی ۲/۶، مقدار بارش نسبت به دوره پایه، کاهش می‌یابد. بیشترین مقدار کاهش بارندگی در این دوره، تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، در فصل زمستان و به مقدار ۲۸/۹ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در فصل پاییز برابر با ۲۱/۶ میلی‌متر و تحت الگوی واداشت تابشی حد بالا رخ خواهد داد.

بررسی تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه و دمای بیشینه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نشان می‌دهد که میزان دما براساس هر سه سناریوی واداشت تابشی نسب به دوره پایه افزایش یافته است (جدول ۵). به طوری که در سطح حوضه آبریز کارون و تحت الگوهای انتشار RCP۲.۶،

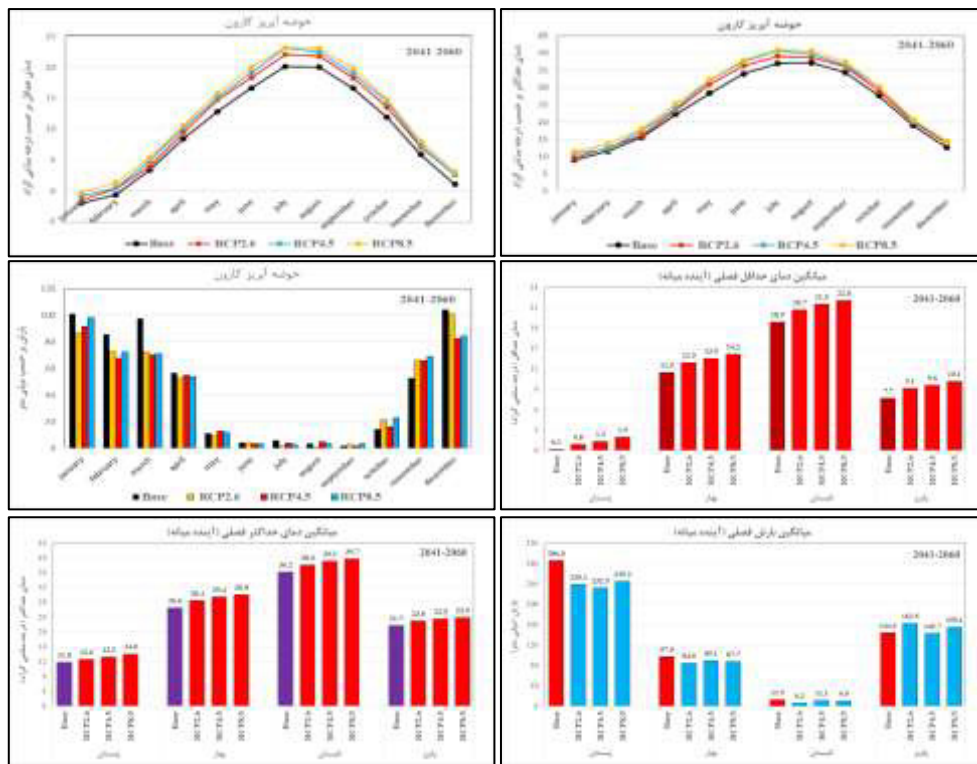
جدول ۵. تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده نزدیک و تحت سناریوهای RCPs نسبت به دوره پایه

بارش (mm)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین بارش سالانه - دوره پایه	۵۶۹/۶	۲۱۹/۷	۳۳۱	۲۵۸/۴	۱۳۲۶/۲	۵۱۶/۱	۳۶۵/۵	۷۳۲/۵	۵۳۹/۹
درصد تغییرات	۲/۳	-۶/۸	-۶/۳	-۳/۱	-۵/۲	-۸/۸	-۳/۹	-۱۰/۹	-۵/۶
بارش	-۱۷/۴	۱۲/۴	-۸/۵	۲/۸	-۱۰/۲	۱۱/۱	-۲۵/۶	۰/۱	-۶/۱
دوره آینده نزدیک	RCP8.5	-۰/۱	۲۹/۳	-۲۱/۲	۱۸/۷	-۱۷/۵	۴/۵	-۱۸/۷	-۲/۷
دمای کمینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای کمینه - دوره پایه	۱۳/۷	۲/۹	۳	۲۰	۲/۵	۷/۱	۱۹/۱	۸	۹/۵
تغییرات	۱/۲	۱/۱	۱/۱	۱/۱	۱/۴	۱/۵	۱/۲	۱/۴	۱/۳
دمای کمینه	۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۲	۱/۳	۱/۱	۱/۳	۱/۲
دوره آینده نزدیک	RCP8.5	۱/۵	۱/۲	۱/۲	۱/۵	۱/۲	۱/۳	۱/۵	۱/۴
دمای بیشینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای بیشینه - دوره پایه	۲۸	۱۸/۵	۱۹/۹	۳۲/۵	۱۶/۱	۲۳/۵	۳۱/۵	۲۲/۳	۲۴/۱
تغییرات	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۵	۱/۴	۱/۴	۱/۶	۱/۴	۱/۴
دمای بیشینه	۱/۹	۱/۶	۱/۶	۱/۹	۱/۵	۱/۳	۱/۹	۱/۶	۱/۶
دوره آینده نزدیک	RCP8.5	۱/۸	۱/۶	۱/۸	۱/۶	۱/۴	۱/۸	۱/۷	۱/۶

سه سناریوی مورد بررسی، در همه ماه‌ها، افزایش خواهد یافت. به طوری که بیشترین میزان افزایش دمای کمینه، تحت سناریو RCP۸.۵، به ترتیب در ماه‌های ژوئن، سپتامبر، آگوست و جولای به مقدار ۳/۴، ۳/۳، ۳/۱ و ۳ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین میزان افزایش دمای بیشینه، تحت الگوی واداشت تابشی حد بالا، به ترتیب در ماه‌های جولای، ژوئن و می به مقدار ۴، ۳/۹ و ۳/۹ درجه سلسیوس رخ خواهد داد. کمترین مقدار افزایش دمای کمینه و دمای بیشینه، تحت سناریوی واداشتی حد پایین (RCP۲.۶)، به ترتیب در ماه‌های ژانویه، مارس و فوریه مشاهده می‌شود؛ بنابراین در دوره ۲۰۴۱-۲۰۶۰، متوسط تغییرات دمای کمینه ماهانه از ۰/۵ تا ۳/۴ و دمای بیشینه ماهانه از ۰/۶ تا ۴ درجه سلسیوس در هر سه سناریو متغیر است. مقدار بارش ماهانه در طول این دوره و تحت سناریوهای مورد بررسی، در اکثر ماه‌های

و در برخی دیگر، افزایش خواهد یافت. از نظر ایستگاهی نیز، بیشترین درصد کاهش بارندگی، در ایستگاه مسجد سلیمان و تحت سناریو RCP۴.۵، به مقدار ۲۵/۶ درصد و بیشترین درصد افزایش بارش، تحت سناریو RCP۸.۵، در ایستگاه‌های بروجن و لردگان، به مقدار ۲۹/۳ و ۲۹/۱ درصد مشاهده می‌شود.

۴- پیش‌نگری دمای کمینه، بیشینه و بارش در دوره آینده میانه و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs شکل (۴)، مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره آینده میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs را نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. براساس نتایج حاصله، دمای کمینه و دمای بیشینه ماهانه در دوره بیست‌ساله آینده میانه و تحت هر



شکل ۴. مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره آینده میانه و تحت سناریوهای مختلف RCPs

و تابستان نسبت به دوره پایه ناچیز است. در فصل پاییز، تحت سناریوی ۴/۵، مقدار بارش، کاهش و در سناریوهای ۲/۶ و ۸/۵، افزایش خواهد یافت. بیشترین مقدار کاهش نزولات جوی، تحت سناریو RCP۴.۵، در فصل زمستان برابر با ۵۳/۵ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در فصل پاییز، به مقدار ۱۸/۱ میلی‌متر و تحت الگوی RCP۲.۶ رخ خواهد داد.

جدول (۶)، تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده ۲۰۴۱-۲۰۶۰ را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان دما براساس هر سه الگوی واداشت تابشی نسب به دوره پایه، افزایش خواهد یافت. به‌طوری‌که در سطح حوضه آبریز کارون و تحت سناریوهای انتشار RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵، میانگین تغییرات دمای کمینه به ترتیب برابر با ۱/۴، ۲ و ۲/۶ و میانگین تغییرات دمای بیشینه برابر با ۱/۴، ۲/۲ و ۲/۸ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه، افزایش خواهد یافت. از لحاظ

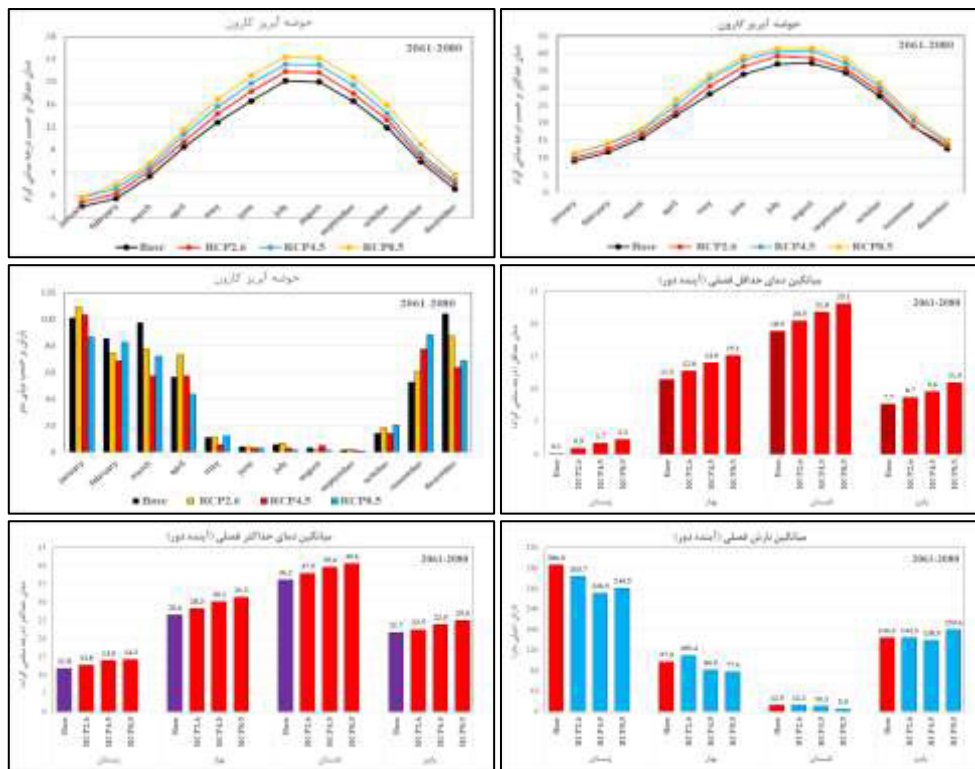
سال به‌غیر از اکتبر و نوامبر، کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در ۶ ماهه پربارش سال، بیشترین مقدار کاهش بارندگی، تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵)، در ماه مارس، برابر ۲۸٪ می‌باشد. همچنین، بیشترین میزان افزایش بارش براساس سناریو RCP۸.۵، در ماه نوامبر و به مقدار ۳۰/۸ درصد رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این دوره، نابهنجاری دمای کمینه و دمای بیشینه در تمام فصول سال، مثبت است؛ به‌طوری‌که کمترین نابهنجاری دمای کمینه و بیشینه به ترتیب برابر با ۰/۷ و ۰/۸ درجه سلسیوس در فصل زمستان و تحت سناریو RCP۲.۶ رخ می‌دهد. بیشترین نابهنجاری دمای کمینه در فصل تابستان و تحت سناریو RCP۸.۵، برابر با ۳/۱ و بیشترین نابهنجاری دمای بیشینه، تحت همین سناریو، در تابستان و به مقدار ۳/۶ درجه سلسیوس رخ خواهد داد. در این دوره و براساس سناریوهای مورد بررسی، مقدار بارش در فصول زمستان، بهار و تابستان، کاهش خواهد یافت؛ هرچند مقدار انحراف مقادیر بارندگی در فصول بهار

جدول ۶. تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده میانه و تحت سناریوهای RCPs نسبت به دوره پایه

بارش (mm)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین بارش سالانه - دوره پایه	۵۶۹/۶	۲۱۹/۷	۳۳۱	۲۵۸/۴	۱۳۲۶/۲	۵۱۶/۱	۳۶۵/۵	۷۳۲/۵	۵۳۹/۹
درصد تغییرات بارش	۱/۹	-۱۳/۱	-۶/۶	-۱۷/۹	-۷/۷	-۱۵/۸	۴/۷	-۱۷/۱	-۸/۸
RCP2.6									
RCP4.5	-۱۵/۶	-۷/۶	-۱۱/۴	-۱۶/۶	-۱۱/۴	-۹/۲	-۲۸/۱	-۳/۸	-۱۱/۹
RCP8.5	-۴/۳	-۶/۷	-۵/۸	-۱۸	-۶	-۱۰	-۷/۴	-۹/۸	-۷/۸
دمای کمینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای کمینه - دوره پایه	۱۳/۷	۲/۹	۳	۲۰	۲/۵	۷/۱	۱۹/۱	۸	۹/۵
تغییرات	۱/۳	۱/۷	۱/۶	۱/۳	۱/۲	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
RCP2.6									
RCP4.5	۲/۱	۲	۱/۹	۱/۶	۲	۲	۱/۶	۲/۲	۲
RCP8.5	۲/۸	۲/۵	۲/۵	۲/۴	۲/۵	۲/۳	۲/۳	۲/۸	۲/۶
دمای بیشینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای بیشینه - دوره پایه	۲۸	۱۸/۵	۱۹/۹	۳۲/۵	۱۶/۱	۲۳/۵	۳۱/۵	۲۲/۳	۲۴/۱
تغییرات	۱/۶	۱/۴	۱/۴	۱/۷	۱/۴	۱/۳	۱/۶	۱/۵	۱/۴
RCP2.6									
RCP4.5	۲/۴	۲/۲	۲/۲	۲/۴	۲/۲	۲/۲	۲/۴	۲/۳	۲/۲
RCP8.5	۳/۱	۲/۸	۲/۸	۳/۱	۲/۷	۲/۴	۳/۱	۳	۲/۸

۵- پیش‌نگری دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در دوره آینده دور و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره زمانی آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و تحت سناریوهای انتشار RCPs، نسبت به دوره پایه در شکل (۵) نشان داده شده است. براساس نتایج حاصله، دمای کمینه، دمای بیشینه ماهانه در دوره ۲۰ ساله آینده دور و تحت هر سه سناریوی مورد بررسی، در همه ماه‌ها افزایش خواهد یافت (به جز ماه نوامبر و تحت سناریوی ۲/۶ که مقدار دمای بیشینه کاهش یافته است)؛ به طوری که بیشترین میزان افزایش دمای کمینه، تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، به ترتیب در ۶ ماهه گرم سال (ژوئن، جولای، آگوست، سپتامبر، اکتبر و می) به مقدار ۴/۵، ۴/۲، ۴/۲، ۴/۲، ۴ و ۴ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین

ایستگاهی، بیشینه ناپهنجاری دمای کمینه، براساس سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، در دو ایستگاه ایذه و یاسوج (°C ۲/۸) مشاهده می‌شود. همچنین بیشینه ناپهنجاری دمای بیشینه، براساس سناریوی RCP۸.۵، در ایستگاه‌های ایذه، شوشتر و مسجدسلیمان (°C ۳/۱) رخ می‌دهد. در این دوره، متوسط تغییرات بارندگی سالانه در سطح حوضه و تحت سناریوهای RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵، به ترتیب برابر با ۸/۸، ۱۱/۹ و ۷/۸ درصد نسبت به دوره پایه، کاهش می‌یابد. بیشترین درصد کاهش بارندگی، در ایستگاه مسجدسلیمان و تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵)، به مقدار ۲۸/۱ درصد و پس از آن مربوط به ایستگاه شوشتر و تحت سناریوی RCP۸.۵، برابر با ۱.۸٪ می‌باشد. همچنین، بیشترین درصد افزایش بارش، تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP۲.۶)، مربوط به ایستگاه مسجدسلیمان، به مقدار ۴/۷ درصد مشاهده می‌شود.



شکل ۵. مقادیر متوسط بلندمدت ماهانه و فصلی دمای کمینه، بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره آینده دور و تحت سناریوهای مختلف RCPs

ماه نوامبر و بالعکس بیشترین مقدار کاهش مربوط به ماه‌های مارس و دسامبر است؛ لذا در نیمه پربارش سال، بیشترین مقدار کاهش نزولات جوی، تحت سناریوی انتشار RCP۴.۵، در ماه مارس برابر ۰.۴۱٪ و بیشترین میزان افزایش بارش براساس سناریوی RCP۸.۵، در ماه نوامبر و به مقدار ۶۶/۷ درصد رخ می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دوره آینده دور، ناپهنجاری دمای کمینه و دمای بیشینه در تمام فصول سال، مثبت است؛ به‌طوری‌که کمترین ناپهنجاری دمای کمینه برابر با ۰/۸ در فصل زمستان و تحت الگوی واداشت تابشی RCP۲.۶ و کمترین ناپهنجاری دمای بیشینه برابر با ۰/۸ در فصل پاییز و تحت همین سناریو رخ می‌دهد. بیشترین ناپهنجاری دمای کمینه در فصل تابستان، تحت سناریو RCP۸.۵، برابر با ۴/۲ °C و بیشترین ناپهنجاری دمای بیشینه، تحت همین الگوی واداشتی حد بالا، در فصل بهار و به مقدار ۴/۸ درجه سلسیوس رخ خواهد داد.

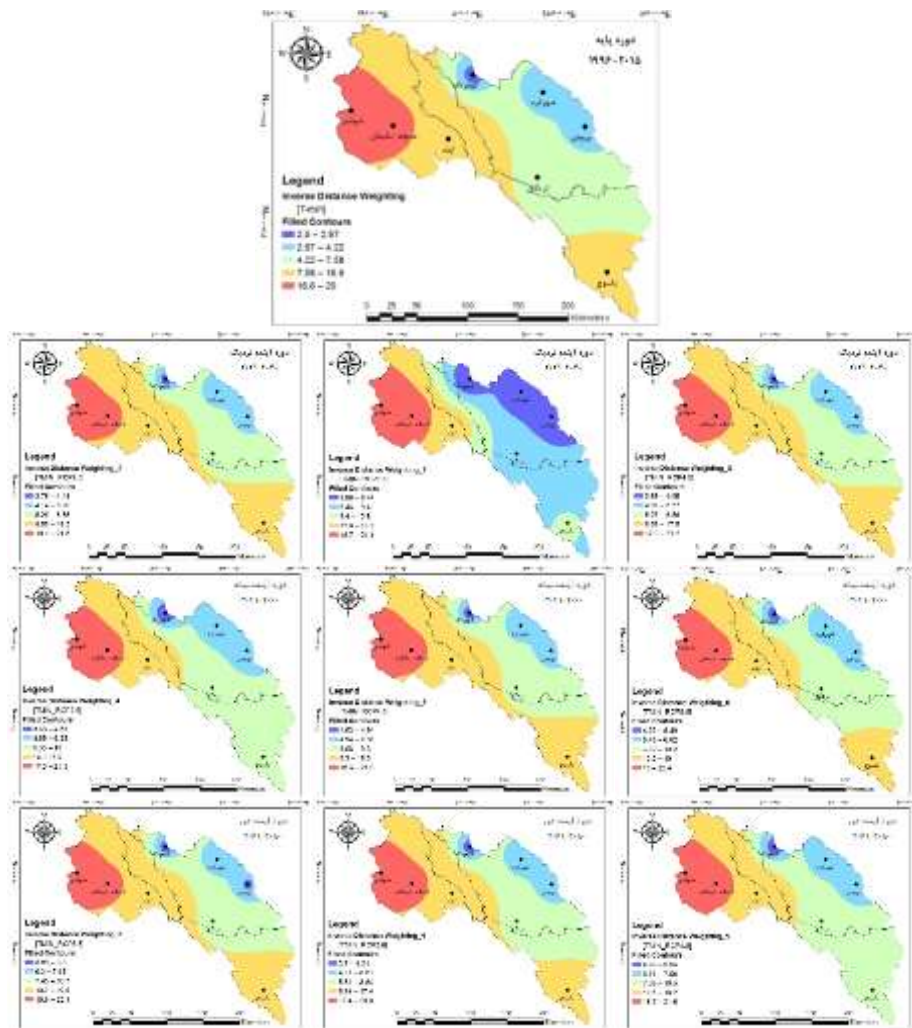
میزان افزایش دمای بیشینه، تحت سناریو RCP۸.۵، به ترتیب در ماه‌های می، ژوئن، جولای، آوریل، آگوست و سپتامبر به مقدار ۵/۳، ۵/۱، ۴/۵، ۴/۵، ۴/۳ و ۴/۲ و نیز در سناریو RCP۴.۵ و به ترتیب در ماه‌های می، ژوئن، جولای و آگوست به مقدار ۴/۴، ۴/۱، ۳/۶ و ۳/۵ درجه سلسیوس رخ خواهد داد. کمترین مقدار افزایش دمای کمینه و دمای بیشینه، تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP۲.۶)، در ماه‌های سرد سال (به ترتیب در نوامبر، ژانویه، فوریه و دسامبر) مشاهده می‌شود؛ بنابراین در مقیاس زمانی ماهانه، در دوره بیست‌ساله ۲۰۸۰-۲۰۶۱، دامنه تغییرات دمای کمینه از ۰/۷ تا ۴/۵ و دمای بیشینه از ۰/۱- تا ۵/۳ درجه سلسیوس در هر سه سناریو متغیر است. میزان بارش ماهانه در طول این دوره و تحت هر سه سناریوی انتشار، در بعضی از ماه‌های سال کاهش و در برخی دیگر، افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که در بین ماه‌های پربارش سال، بیشترین مقدار افزایش بارش مربوط به

جدول ۷. تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده دور و تحت سناریوهای RCPs نسبت به دوره پایه

بارش (mm)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین بارش سالانه - دوره پایه	۵۶۹/۶	۲۱۹/۷	۳۳۱	۲۵۸/۴	۱۳۲۶/۲	۵۱۶/۱	۳۶۵/۵	۷۳۲/۵	۵۳۹/۹
درصد تغییرات	-۲/۹	۲/۷	-۲/۵	۱/۶	۰/۵	۱/۵	-۱۰	-۵/۹	-۱/۹
بارش	-۲۱/۷	-۴/۶	-۸/۷	-۲۴	-۱۲/۴	-۵/۴	-۳۵/۸	-۱۱/۴	-۱۴/۶
دوره آینده دور	-۲۳/۷	-۸/۷	-۳/۳	-۲۴/۲	-۳/۷	-۱۲/۱	-۳۰/۳	-۱	-۱۰/۶
دمای کمینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای کمینه - دوره پایه	۱۳/۷	۲/۹	۳	۲۰	۲/۵	۷/۱	۱۹/۱	۸	۹/۵
تغییرات	۱/۲	۱/۳	۱/۳	۰/۸	۱/۲	۱/۴	۰/۹	۱/۳	۱/۲
دمای کمینه	۲/۳	۲/۶	۲/۵	۱/۶	۲/۴	۲/۴	۱/۸	۲/۴	۲/۳
دوره آینده دور	۳/۷	۳/۳	۳/۳	۱/۳	۳/۴	۳/۳	۳	۳/۶	۳/۴
دمای بیشینه (°C)									
ایستگاه‌های هواشناسی	ایذه	بروجن	شهرکرد	شوشتر	کوه‌رنگ	لردگان	مسجد سلیمان	ياسوج	حوضه آبریز
میانگین دمای بیشینه - دوره پایه	۲۸	۱۸/۵	۱۹/۹	۳۲/۵	۱۶/۱	۲۳/۵	۳۱/۵	۲۲/۳	۲۴/۱
تغییرات	۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱/۵	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۱/۳
دمای بیشینه	۳/۱	۲/۸	۲/۸	۳/۱	۲/۷	۲/۶	۳/۱	۲/۸	۲/۸
دوره آینده دور	۴	۳/۷	۳/۷	۴/۱	۳/۵	۳/۳	۴/۱	۳/۸	۳/۷

در این دوره و براساس هر سه سناریو، مقدار بارش در فصول زمستان و تابستان، کاهش خواهد یافت؛ هرچند مقدار انحراف مقادیر بارندگی در فصل کم بارش تابستان نسبت به دوره پایه ناچیز است. در فصل بهار، مقدار بارش تحت سناریو RCP۲.۶، افزایش و در سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵، کاهش خواهد یافت. در پاییز نیز مقدار بارندگی تحت سناریوی ۸/۵ افزایش، براساس سناریوی ۴/۵ کاهش و تحت سناریوی ۲/۶، تغییر نخواهد کرد. بیشترین مقدار کاهش نزولات جوی در فصل زمستان به مقدار ۵۵/۱ میلی‌متر، تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در فصل پاییز، برابر با ۱۵/۲ میلی‌متر و تحت سناریو RCP۸.۵ رخ خواهد داد. تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده دور

در این دوره و براساس هر سه سناریو، مقدار بارش در فصول زمستان و تابستان، کاهش خواهد یافت؛ هرچند مقدار انحراف مقادیر بارندگی در فصل کم بارش تابستان نسبت به دوره پایه ناچیز است. در فصل بهار، مقدار بارش تحت سناریو RCP۲.۶، افزایش و در سناریوهای ۴/۵ و ۸/۵، کاهش خواهد یافت. در پاییز نیز مقدار بارندگی تحت سناریوی ۸/۵ افزایش، براساس سناریوی ۴/۵ کاهش و تحت سناریوی ۲/۶، تغییر نخواهد کرد. بیشترین مقدار کاهش نزولات جوی در فصل زمستان به مقدار ۵۵/۱ میلی‌متر، تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در فصل پاییز، برابر با ۱۵/۲ میلی‌متر و تحت سناریو RCP۸.۵ رخ خواهد داد. تغییرات بلندمدت سالانه دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده دور



شکل ۶. پهنه‌بندی متوسط سالانه دمای کمینه پیش‌نگری شده حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی، براساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوهای RCPs

و ایزده واقع در غرب حوضه (به ترتیب برابر با ۴/۱، ۴/۱، ۴/۱ و ۴ درجه سلسیوس) رخ می‌دهد. در دوره آینده دور، متوسط تغییرات بارندگی سالانه در سطح حوضه و تحت سناریوهای RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵، به ترتیب برابر با ۱/۹، ۱۴/۶ و ۱۰/۶ درصد نسبت به دوره پایه، کاهش می‌یابد. در این دوره و تحت همه سناریوها، مقدار بارش سالانه در ایستگاه‌های مورد مطالعه (به جز ایستگاه‌های بروجن، شوشتر، کوه‌رنگ و لردگان و آن‌هم فقط تحت سناریوی RCP۲.۶) کاهش می‌یابد. بیشترین درصد کاهش بارندگی، در ایستگاه مسجدسلیمان، تحت سناریوهای RCP۴.۵ و RCP۸.۵ به ترتیب به مقدار

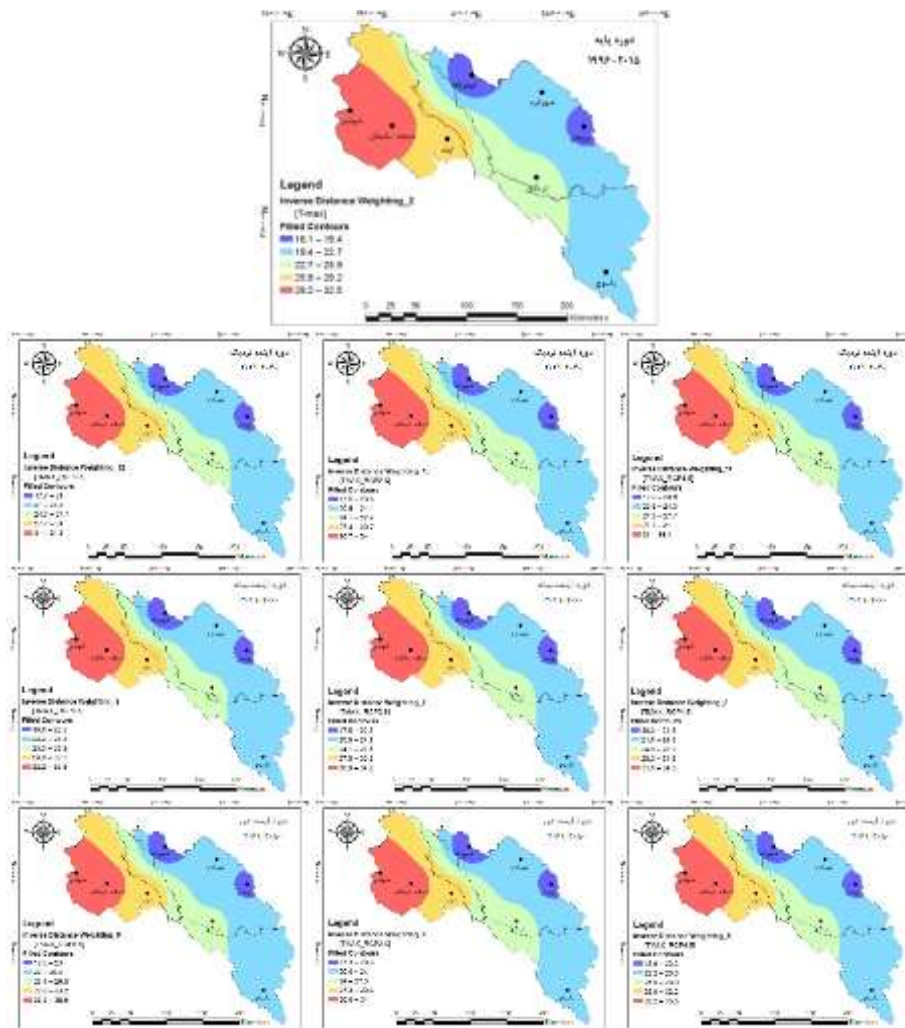
۳۵/۸ و ۳۰/۳ درصد و پس‌از آن، تحت همین دو سناریو، در ایستگاه شوشتر به ترتیب برابر با ۲۴/۲ و ۲۴ درصد مشاهده می‌شود. همچنین، بیشترین درصد افزایش بارش، تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP۲.۶)، مربوط به ایستگاه بروجن، به مقدار ۲/۷ درصد است که این مقدار تغییرات نسبت به دوره پایه، بسیار ناچیز می‌باشد.

۶- پهنه‌بندی دمای کمینه حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs شکل (۶)، توزیع مکانی متوسط سالانه دمای کمینه حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی، براساس خروجی

مدل HadGEM2-ES و تحت الگوهای واداشت تابشی RCPS که با استفاده از روش وزن دهی فاصله معکوس (IDW)^{۲۳} در محیط نرم‌افزار ArcGIS ۱۰.۷ ترسیم گردید را نشان می‌دهد. نتایج، بیانگر آن است که علاوه بر عرض جغرافیایی، عامل ارتفاع از سطح دریا نیز نقش بسیار مهمی در توزیع مکانی دمای سطح حوضه ایفا می‌کند. این شرایط در تعیین پهنه‌های دمایی منطقه مورد مطالعه با تبعیت از پیکره‌بندی ناهمواری‌ها، آشکار است. مطابق نتایج به‌دست‌آمده، میانگین سالانه دمای کمینه در دوره پایه از $2/5^{\circ}\text{C}$ در مناطق مرتفع (نواحی شمالی حوضه) تا 20°C در مناطق کم ارتفاع و پست (نواحی غربی حوضه) متغیر است. در دوره آینده نزدیک و براساس هر سه سناریو، کمینه دمای هوا افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، دمای کمینه بین $3/8$ تا $21/5$ درجه سلسیوس، متناسب با شرایط ارتفاعی منطقه، متغیر است. در دوره‌های آینده میانه و دور، به تدریج بر مقدار کمینه‌های دمای هوا افزوده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که شرایط دمایی، براساس الگوی واداشتی حد بالا (سناریوی ۸/۵) در دوره بیست‌ساله ۲۰۴۱-۲۰۶۰، بین ۵ تا $22/4$ درجه سلسیوس و در دوره بیست‌ساله ۲۰۶۱-۲۰۸۰، بین $5/9$ تا $23/1$ درجه سلسیوس از مناطق مرتفع و سردسیر به سمت مناطق کم ارتفاع و گرمسیر تغییر خواهد کرد. در الگوهای حد پایین و حد وسط (سناریوهای ۲/۶ و ۴/۵)، این تغییرات افزایشی در کمینه‌های دمای هوا با شدت پایین‌تری نسبت به الگوی حد بالا رخ خواهد داد؛ بنابراین تحت هر سه سناریوی مورد مطالعه، در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۲۱-۲۰۸۰)، متوسط دمای بیشینه سالانه در سطح حوضه نسبت به دوره پایه و شرایط کنونی، افزایش خواهد یافت. از نظر توزیع مکانی در دوره‌های زمانی آینده بر گستره پهنه‌های با دمای بالاتر افزوده خواهد شد.

۷- پهنه‌بندی دمای بیشینه حوضه آبریز کارون در دوره‌های آتی و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPS

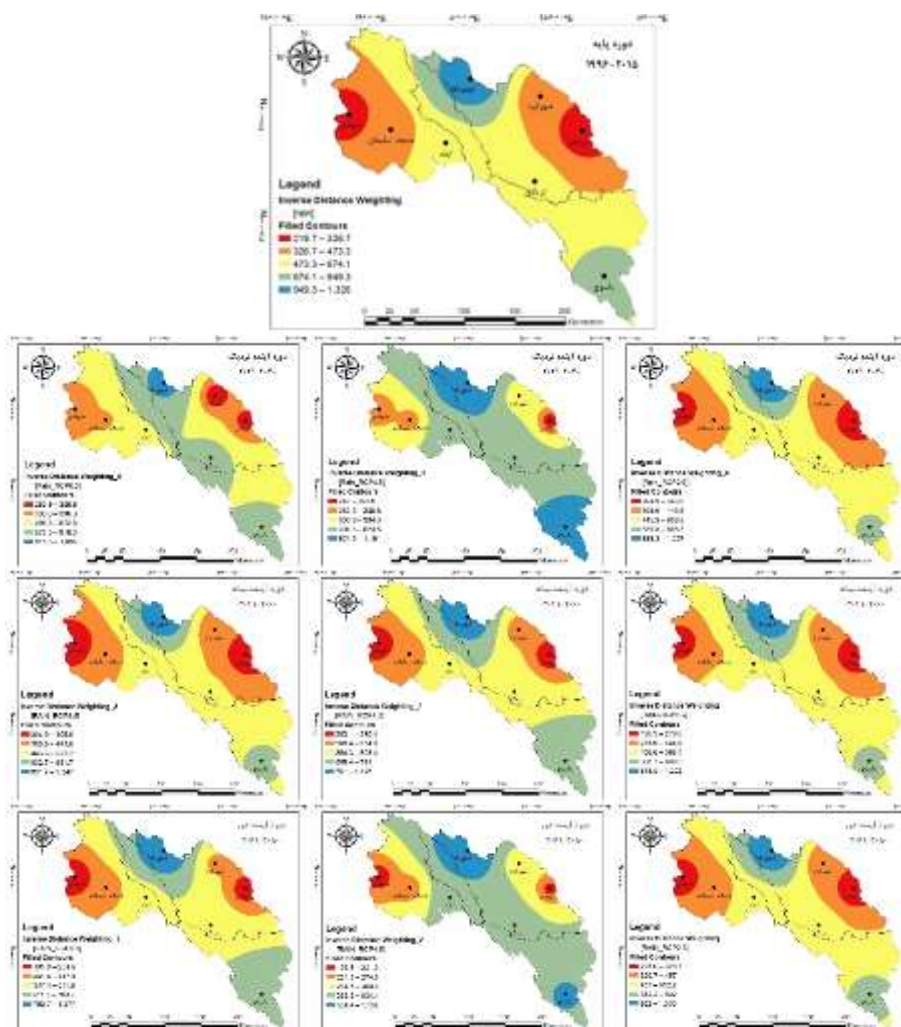
توزیع مکانی متوسط سالانه دمای بیشینه حوضه آبریز کارون در دوره‌های زمانی آینده، براساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوهای مختلف RCPS در شکل (۷) نشان داده شده است. عامل ارتفاع از سطح دریا در تعیین وضعیت دمایی و توزیع مکانی آن بسیار حائز اهمیت است. بررسی میانگین دمای بیشینه هوا در دوره پایه نشان می‌دهد که در سطح حوضه آبریز کارون، از مناطق مرتفع و کوهستانی شمال، شرق و جنوب به سمت مناطق کم ارتفاع داخلی و سرزمین‌های پست غربی، بر مقدار دماهای بیشینه افزوده می‌شود. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است در دوره پایه، خنک‌ترین دماهای بیشینه در نواحی مرتفع شمالی با میانگین $16/1$ تا $19/4$ درجه سلسیوس و گرم‌ترین دمای بیشینه هوا در مناطق پست غربی با طبقه دمایی $29/2$ - $32/5$ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. این شرایط در دوره‌های زمانی آینده، تحت شرایط تغییر اقلیم، به‌صورت انحراف افزایشی در مقدار بیشینه‌های دمای هوا و پهنه‌های دمایی رخ خواهد داد. براساس سناریوی حد بالا (RCP۸.۵)، در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، میانگین دمای حداکثر بین محدوده دمایی $17/7$ - $34/3$ ، در دوره آینده میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰)، بین محدوده دمایی $18/8$ - $35/6$ و در دوره آینده دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰)، بین محدوده دمایی $19/6$ - $36/6$ درجه سلسیوس خواهد رسید. در شش دهه آینده (۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰)، محدوده‌های دماهای گرم‌تر، گسترده‌تر از پهنه‌های خنک خواهد شد. این شرایط تغییر اقلیم در مناطق مرتفع و سرد از نظر کاهش سهم برف برای رودخانه‌های دائمی مانند کارون و خرسان که عمدتاً از کوه‌های زاگرس شمالی و جنوبی منطقه (محدوده زردکوه بختیاری و دنا) سرچشمه می‌گیرند، حائز اهمیت خواهد بود. همچنین ظهور تغییرات دمایی بین $1/2$ تا $3/5$ درجه سلسیوس در افق ۲۰۸۰ و به تبع آن جابجایی پهنه‌های دمایی می‌تواند پیامدهای جدی بر روی رویشگاه‌های طبیعی جنگل‌های بلوط زاگرس در مناطق شمالی، شرقی و جنوبی منطقه مورد مطالعه داشته باشد.



شکل ۷. پهنه‌بندی متوسط سالانه دمای بیشینه پیش‌نگری شده حوزه آبریز کارون در دوره‌های آبی، براساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوهای RCPs

۱- پهنه‌بندی بارش حوزه آبریز کارون در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs شکل (۸)، توزیع مکانی متوسط بارش سالانه حوزه آبریز کارون در دوره‌های آبی، براساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوهای مختلف انتشار را نشان می‌دهد. بررسی ارتباط عوامل مکانی، به‌ویژه عامل ارتفاع از سطح دریا با بارش در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که علاوه بر ارتفاع، عوامل مختلف دیگری مانند طول و عرض جغرافیایی، جهت ورود توده‌های هوا، فاصله از منبع رطوبتی خلیج فارس و نیز شیب و جهت ارتفاعات در توزیع مکانی بارش‌های حوزه تأثیرگذار است. همان‌طور

که ملاحظه می‌شود؛ بیشترین مقدار بارندگی در مناطق کوهستانی و مرتفع زاگرس رخ می‌دهد؛ به‌طوری‌که در دوره پایه، مقدار بارش سالانه از ۱۳۲۶ میلی‌متر در نواحی مرتفع شمالی (محدوده ایستگاه کوهرنگ) و نیز ۷۳۲/۵ میلی‌متر در مناطق کوهستانی جنوبی (محدوده ایستگاه یاسوج) تا ۲۱۹/۷ میلی‌متر در شرق حوزه (محدوده ایستگاه بروجن) و نیز ۲۵۸/۴ میلی‌متر در مناطق پست و هموار غربی (محدوده ایستگاه شوشتر) در نوسان است. براساس الگوی واداشتی حد بالا (RCP۸.۵)، مقدار بارندگی سالانه منطقه مورد مطالعه در دوره آینده نزدیک، در گستره بارشی ۱۰۹۴-۲۶۰/۹، در دوره آینده میانه، در



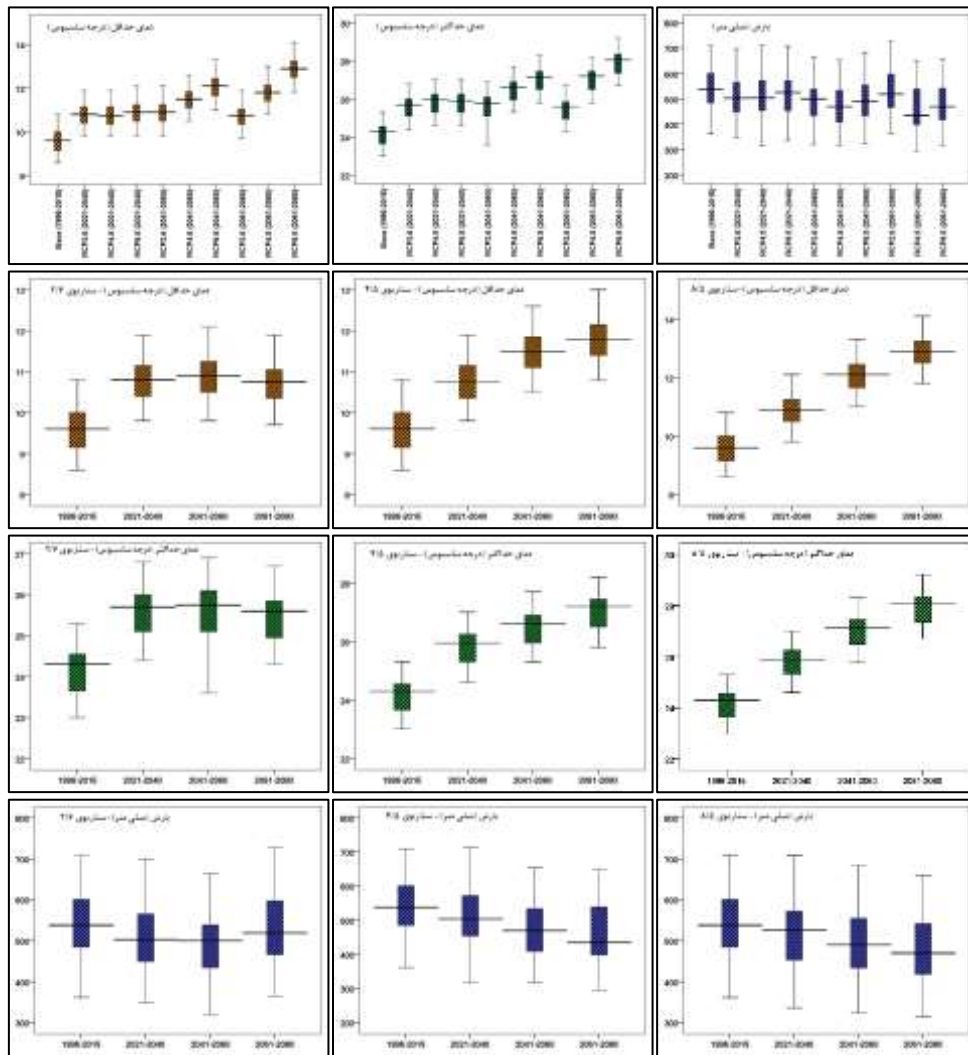
شکل ۸. پهنه‌بندی متوسط بارش سالانه پیش‌نگری شده حوضه آبریز کارون در دوره‌های آبی، براساس مدل HadGEM2-ES و تحت سناریوهای RCPS

اصلی رودخانه کارون از مناطق کوهستانی شمال حوضه می‌باشد؛ لذا کاهش بارندگی و افزایش دما در دوره‌های آینده، اثرات منفی زیادی بر روی جریان رودخانه کارون و در نتیجه کاهش منابع آب حوضه خواهد داشت.

۹- بررسی عدم قطعیت فراسنج‌های اقلیمی در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPS

در این پژوهش، به منظور نمایش عدم قطعیت فراسنج‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در منطقه مورد مطالعه از نمودار جعبه‌ای بیست‌ساله در دوره‌های زمانی آینده و تحت سناریوهای مختلف انتشار

محدوده بارشی ۱۲۴۷-۲۰۴/۹ و در دوره زمانی آینده دور، در دامنه بارشی ۱۲۷۷-۱۹۵/۸ میلی‌متری قرار می‌گیرد. در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۸۰-۲۰۲۱)، مقدار بارندگی سالانه از ۲۸/۸ میلی‌متر در نواحی کم بارش غرب حوضه تا ۲۳۲ میلی‌متر در مناطق پربارش شمالی، نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بررسی پهنه‌های بارشی حوضه آبریز کارون در دوره‌های آبی نشان داد که قلمرو مناطق پربارش، محدودتر شده و بر پهنه مناطق کم بارش افزوده خواهد شد. در واقع یکی از پیامدهای تغییر اقلیم از طریق کاهش بارندگی در مناطق پربارش زاگرس مرتفع رخ خواهد داد. با توجه به اینکه سرچشمه



شکل ۹. نمودار جعبه‌ای ۲۰ ساله فراسنج های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش حوضه آبریز کارون در دوره‌های آبی و تحت سناریوهای انتشار نسبت به دوره پایه

پارامتر دما در دوره‌های آینده دور و میانه و تحت سناریوهای مذکور زیاد می‌باشد. کمترین عدم قطعیت دمای کمینه و دمای بیشینه، مربوط به دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و تحت هر سه سناریوی واداشت تابشی و نیز تحت سناریوی خوش‌بینانه (RCP۲.۶) در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱ است و این موضوع، نشان‌دهنده آن است که تغییرات دما در دوره آینده نزدیک و نیز سناریوی ۲/۶ در دوره آینده دور، چندان زیاد نیست. کمترین عدم قطعیت فراسنج های دمای کمینه و دمای بیشینه، براساس الگوی ۲/۶ در دوره آینده دور و براساس الگوهای ۴/۵ و ۸/۵ در

نسبت به دوره پایه استفاده شد (شکل ۹). خروجی مدل HadGEM۲-ES، افزایش مقدار دمای کمینه و دمای بیشینه را برای هر سه دوره آبی و تحت هر سه سناریو، پیش‌بینی می‌کند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، بیشترین عدم قطعیت فراسنج های دمای کمینه دمای بیشینه، به ترتیب مربوط به دو دوره بیست‌ساله ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵) می‌باشد. پس‌از این سناریو، بیشترین عدم قطعیت این دو متغیر اقلیمی در الگوی واداشتی حد وسط (RCP۴.۵) مشاهده می‌شود؛ این بدان معناست که تغییرات اقلیمی

دوره آینده نزدیک مشاهده می‌شود. در نتیجه با توجه به فواصل خطوط میانه و عدم هم‌پوشانی فاصله میان چارکی، تفاوت دمای بیشینه و کمینه طی سه دوره آتی با دوره پایه، معنی‌دار می‌باشد.

همچنین مدل مورد استفاده، کاهش مقدار بارش را برای هر سه دوره آتی و تحت سناریوهای مختلف واداشت تابشی، نسبت به دوره پایه پیش‌بینی می‌کند. طبق نتایج حاصله، بیشترین عدم قطعیت متغیر بارش مربوط به دوره بیست‌ساله آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) می‌باشد. پس از آن، بیشترین تفاوت، در دوره آینده میانه (سناریوی ۴/۵) و آینده دور (سناریوی ۸/۵) مشاهده می‌شود؛ این بدان معناست که تغییرات اقلیمی در دوره‌های آینده میانه و دور و تحت سناریوهای مذکور نسبت به دوره پایه زیاد می‌باشد. همچنین، کمترین عدم قطعیت فراسنج بارش، مربوط به دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱)، تحت سناریو RCP۸.۵ و پس از آن در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱) و تحت سناریو RCP۲.۶ است. در مجموع، اثر تغییر اقلیم بر بارش در دوره آینده نزدیک نسبت به دوره‌های آینده میانه و دور کمتر است. براساس الگوی واداشتی ۲/۶، کمترین عدم قطعیت متغیر بارش، در دوره آینده دور و براساس الگوهای ۴/۵ و ۸/۵ در دوره آینده نزدیک مشاهده می‌شود. لذا براساس شکل ۹ و عدم تفاوت میانه‌ها و همپوشانی فاصله میان چارکی، مقادیر بارش سه دوره تفاوت معنی‌داری با دوره پایه ندارد.

جمع‌بندی

انتشار بیش‌ازحد گازهای گلخانه‌ای در دهه‌های اخیر و تغییرات به وقوع پیوسته در اقلیم، موجب تغییر در فراسنج‌های اقلیمی شده است؛ بنابراین در این پژوهش، اثرات احتمالی تغییر اقلیم بر مقادیر دما و بارش حوضه آبریز کارون، برای سه دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱) با استفاده از خروجی مدل HadGEM۲-ES و تحت الگوهای واداشت تابشی RCP۲.۶، RCP۴.۵ و RCP۸.۵ مورد بررسی قرار

گرفت. مطابق نتایج حاصله، دمای کمینه و دمای بیشینه ماهانه در دوره‌های آینده نزدیک، میانه و دور و براساس هر سه سناریوی واداشت تابشی، در همه ماه‌ها افزایش خواهد یافت (به جز ماه نوامبر و تحت سناریو RCP۲.۶ که مقدار دمای بیشینه کاهش یافته است). تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، در دوره آینده دور، دامنه تغییرات ماهانه دمای کمینه از ۰/۷ تا ۴/۵ و دمای بیشینه از ۰/۱- تا ۵/۳ درجه سلسیوس نوسان خواهد داشت. در شش‌ماهه پربارش سال، بیشترین مقدار کاهش بارندگی در دوره ۲۰۸۰-۲۰۶۱، تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) در ماه مارس برابر ۴۱ درصد و بیشترین میزان افزایش بارش، براساس سناریو RCP۸.۵، در ماه نوامبر، ۶۶/۷ درصد پیش‌بینی می‌شود. در هر سه دوره آتی و تحت هر سه الگوی انتشار، نابهنجاری دمای کمینه و دمای بیشینه در تمام فصول سال مثبت است؛ به طوری که در دوره آینده دور و تحت سناریو RCP۸.۵، بیشترین نابهنجاری دمای کمینه و بیشینه، به ترتیب در تابستان برابر با ۴/۲ و در فصل بهار، ۴/۸ درجه سلسیوس پیش‌بینی می‌شود. میانگین فصلی بارش حوضه نشان می‌دهد که بیشترین میزان کاهش نزولات جوی در دوره آینده دور، تحت سناریوی انتشار RCP۴.۵، در زمستان برابر با ۵۵/۱ میلی‌متر و بیشترین مقدار افزایش بارندگی در دوره آینده نزدیک، تحت سناریو RCP۸.۵، در پاییز و به مقدار ۲۱/۶ میلی‌متر پیش‌بینی می‌شود. در هر سه دوره آتی و تحت هر سه سناریوی مورد بررسی، متوسط بلندمدت سالانه دمای کمینه در سطح حوضه، بین ۱/۲ تا ۳/۴ و دمای بیشینه بین ۱/۳ تا ۳/۷ درجه سلسیوس در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همچنین، متوسط بلندمدت بارش سالانه در سطح حوضه، بین ۱/۹ تا ۱۴/۶ درصد (۱۰ تا ۷۸/۸ میلی‌متر) در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. توزیع مکانی متوسط سالانه دمای کمینه و دمای بیشینه حوضه آبریز کارون نشان می‌دهد که در هر سه دوره آتی و براساس هر سه سناریو، به تدریج بر مقدار کمینه‌ها و بیشینه‌های دمای هوا افزوده می‌شود؛ به طوری که

افشار و همکاران (۱۳۹۵) در حوضه آبخیز کشف رود، فتائی و همکاران (۱۳۹۶) در حوضه آبخیز دره رود ارس، کیا و کریمی (۱۳۹۹) در حوضه آبخیز هراز، سجادیان و فتاحی (۱۳۹۹) در حوضه آبریز سد درودزن و لطفی و همکاران (۱۴۰۰) در غرب کشور اشاره نمود.

با توجه به اینکه رودخانه کارون از مناطق کوهستانی شمال حوضه آبریز سرچشمه می‌گیرد؛ لذا، کاهش بارندگی و افزایش دما در دوره‌های آینده، اثرات منفی زیادی بر روی جریان رودخانه کارون و در نتیجه کاهش منابع آب حوضه خواهد داشت. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند در مطالعات مربوط به مدیریت منابع آب و حوضه‌های آبریز، برنامه‌ریزی‌های توسعه آبیاری، طراحی و مدیریت سامانه‌های آبیاری، زهکشی و آبخیزداری، ذخیره‌سازی آب‌های سطحی و مطالعات کشاورزی و زیست‌محیطی استفاده گردد؛ بنابراین مدیریت بهینه منابع آب جهت به حداقل رساندن اثرات ناشی از پدیده تغییر اقلیم، نه تنها در سطح حوضه آبریز کارون، بلکه در کل حوضه‌های آبریز کشور ضروری به نظر می‌رسد.

مراجع

- آقاخانی افشار، ا.ح.، حسن‌زاده، ی.، بالت پور، ع.ا.، پور رضا بیلندی، م.، ۱۳۹۵، تغییرات فصلی بارش و درجه حرارت حوضه آبخیز کشف رود در دوره‌های آبی با رویکرد مدل‌های گردش کلیسری CMIP۵. نشریه آب‌و خاک، ۳۰ (۵)، ۱۷۳۲-۱۷۱۸.
- آقاشاهی، م.، اردستانی، م.، نیک سخن، م.ح.، طهماسبی، ب.، ۱۳۹۱، معرفی و مقایسه مدل‌های LARS-WG و SDSM به منظور ریزمقیاس سازی پارامترهای زیست‌محیطی در مطالعات تغییر اقلیم، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط‌زیست، تهران، ۲۷ آبان ۱۳۹۱.
- اکبریان اقدام، ا.، احمدوند، ع.م.، علی‌محمدی، س.، ۱۳۹۴، تولید سناریوهای بلندمدت جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم و تحلیل آن‌ها (بررسی موردی: حوضه آبریز سد کارون ۴)، فصلنامه علوم محیطی، ۱۳ (۲)، ۲۳-۳۶.
- ایمانی پور، ح.، کاشکی، ع.، کریمی، م.، ۱۳۹۷، واکاوی تغییرات نیازهای درجه روز گرمایشی تحت شرایط تغییر اقلیم در استان خراسان جنوبی، مجله تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸ (۵۱)، ۱۹۹-۲۱۶.
- بابائیان، ا.، کریمیان، م.، مدیریان، ر.، فلاهرزی، ی.، کوهی، م.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری بارش و دمای شرق کشور با استفاده از مقیاس کاهی ترکیبی دینامیکی-آماری، فصل‌نامه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۵ (۵)، ۴۱-۵۸.
- پیرانی، م.، ذوالجودی، م.، فتاحی، ا.، مهسافر، ح.، ۱۳۹۱، شبیه‌سازی روند تغییرات دما و بارش در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کارون بزرگ، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۳ (۹)، ۸۳-۹۳.

تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵)، در دوره آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۶۱)، دمای کمینه بین محدوده دمایی ۵/۹ تا ۲۳/۱ و دمای بیشینه بین ۱۹/۶-۳۶/۶ درجه سلسیوس از مناطق مرتفع و سردسیر به سمت مناطق کم ارتفاع و گرمسیر تغییر خواهد کرد. در شرایط تغییر اقلیم آینده (۲۰۸۰-۲۰۲۱)، مقدار بارندگی سالانه از ۲۸/۸ میلی‌متر در نواحی کم بارش غرب حوضه تا ۲۳۲ میلی‌متر در مناطق پر بارش شمالی، نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. با توجه به نتایج به دست آمده، بیشترین عدم قطعیت فراسنج های دمای کمینه و دمای بیشینه، به ترتیب مربوط به دو دوره بیست‌ساله ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و تحت سناریوی بدبینانه (RCP۸.۵) و بیشترین عدم قطعیت متغیر بارش مربوط به دوره آینده دور و تحت سناریوی حد وسط (RCP۴.۵) می‌باشد. این بدان معناست که تغییرات اقلیمی فراسنج های دما و بارش در دوره آینده دور و تحت سناریوهای مذکور در مقایسه با دوره‌های آینده نزدیک و میانه بیشتر خواهد بود.

در خصوص بررسی اثرات تغییر اقلیم بر فراسنج های اقلیمی به‌ویژه دما و بارش، مطالعات مختلفی در منطقه مورد مطالعه و سطح کشور انجام گرفته است که با یافته‌های این تحقیق مطابقت دارد. پیرانی و همکاران (۱۳۹۱)، تغییرات بارش و دما را در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کارون طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ بررسی کردند. براساس خروجی مدل HadCM۳، مقدار دما ۱/۸ درجه سلسیوس و میزان بارش ۱۰ درصد نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. نتایج مطالعه اکبریان اقدام و همکاران (۱۳۹۴) در حوضه آبریز سد کارون ۴، نشان داد که در انتهای قرن حاضر، افزایش دما (۲۲/۶ درصد) و کاهش بارش (۱۷/۲ درصد) خواهد بود. کریمی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر دبی ماهانه رودخانه کارون اقدام کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در دوره ۲۰۷۰-۲۰۲۰ و تحت سناریوی A1B، میانگین دما به مقدار ۱/۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. از دیگر تحقیقات انجام شده، می‌توان به مطالعات آقاخانی

- Climate Research, 7, 85–95.
22. Hourdin, F., Musat, I., Bony, S., Braconnot, P., Codron, F., Dufresne, J.L. and Krinner, G., 2006, The LMDZ4 general circulation model: climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection, *Climate Dynamics*, 8(27), 787-813.
 23. Kharin, V.V., Zwiers, F.W., Zhang, X. and Wehner, M., 2013, Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble, *Climatic Change*, 119(2), 345-357.
 24. Kling, H., Fuchs, M. and Paulin, M., 2012, Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios, *J. Hydrol*, 424, 264–27.
 25. McKee T.B., Doesken N.J., and Kleist J. 1995. Drought Monitoring with Multiple Time. American Meteorological Society, Massachusetts, 233-236.
 26. Oh, S.G., Park, J.H., Lee, S.H. and Suh, M.S., 2014, Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios journal of Geophysical Research, *Atmospheres*, 119(6), 2913-2927.
 27. Racsco, P., Szeidl, L. and Semenov, M.A., 1991, Serial approach to local stochastic weather models, *Ecol Model*, 57, 41–27
 28. Salmi, T., Määttä, A., Anttila, P., Ruoho-Airola, T. and Amnell, T., 2002, Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates the Excel template application MAKESENS, Finnish Meteorological Institut.
 29. Semenov, M.A. and Barrow, EM., 1997, Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios, *Clim Change*, 35, 397– 414.
 30. Semenov, M.A. and Stratonovitch P., 2010, Use of multi-model ensembles from global climate model assessment of climate change impacts. *Climate Research*. 41: 1-14.
 31. Sen, P.K., 1968, Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
 32. Wang, Y., Yang, X., Zhang, M., Zhang, L., Yu, X., Ren, L., Liu, Y., Jiang, S.H., and Yuan, F., 2019, Projected Effects of Climate Change on Future Hydrological Regimes in the Upper Yangtze River Basin, China, *Advances in Meteorology*, 1-14, <https://doi.org/10.1155/2019/1545746>
 33. Weichert, A. and Burger, G., 1998, Linear versus nonlinear techniques in downscaling, *Climate Research*, 10, 83–93.
 34. Wilby R.L., and Harris I. 2006. A frame work for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River
 7. سجادیان، س.، فتاحی، م.، ۱۳۹۹، بررسی اثر تغییر مقیاس زمانی داده‌های حوضه آبریز سد درودزن بر مدل تغییر اقلیم LARS-WG6. *نشریه مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۱۰ (۳۹)، ۱-۱۷.
 ۸. علیزاده، ا.، سیاری، ن.، حسامی کرمانی، م.ر.، بنایان اول، م.، فریدحسینی، ع.، ۱۳۸۹، بررسی پتانسیل تغییر اقلیم بر منابع و مصارف آب کشاورزی (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کشف رود)، *نشریه آب‌و‌خاک*، ۲۴ (۴)، ۸۳۵-۸۱۵.
 ۹. فاخرنسب، ا.، علیجانی، بهلول، ۱۳۹۹، آشکارسازی تغییرات دمای هوا و بارش در استان کهگیلویه و بویراحمد تحت شرایط تغییر اقلیم با استفاده از مدل MIROC، *فصل‌نامه جغرافیای طبیعی*، ۱۲ (۵۰)، ۳۵-۱۵.
 ۱۰. فتائی، ا.، عزیزی، ع.، صفویان، ت.، ایمانی، ع.ا.، اوجاقی، ا.، فرهادی، ح.، ۱۳۹۶، پیش‌بینی تغییرات برخی متغیرهای اقلیمی حوضه آبخیز دره رود ارس طی دهه‌های آتی با استفاده از مدل‌های تغییر اقلیم، *فصل‌نامه پژوهشی زمین‌شناسی محیط‌زیست*، ۱۱ (۳۹)، ۱-۱۳.
 ۱۱. کارآموز، محمد.، عراقی نژاد، شهاب.، ۱۳۹۳، هیدرولوژی پیشرفته، انتشارات دانشگاه امیرکبیر.
 ۱۲. کریمی، م.، سروسنجان، ر.، صوری، ر.، ۱۳۹۹، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر دبی ماهانه رودخانه کارون با به‌کارگیری مدل‌های چندگانه خطی، *نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲ (۱)، ۵۶-۴۴.
 ۱۳. کیا، ع.، کریمی، و.، ۱۳۹۹، بررسی پارامترهای دما و بارندگی حوضه آبخیز هراز تحت تأثیر تغییر اقلیم، *مجله مخاطرات محیط طبیعی*، ۹ (۲۶)، ۱۶۰-۱۴۵.
 ۱۴. لطفی، م.، کمالی، غ.ع.، مشکوتی، ا.ح.، ورشایان، و.، ۱۳۹۹، پیش‌نگری تغییرات بارش در غرب کشور با استفاده از مدل ریزمقیاس گردانی SDSM و سناریوهای واداشت تابشی، *نشریه هواشناسی و علوم جو*، ۳ (۱)، ۴۴-۳۳.
 ۱۵. لطفی، م.، کمالی، غ.ع.، مشکوتی، ا.ح.، ورشایان، وحید.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دماهای بیشینه با استفاده از مدل‌های جهانی اقلیم تحت سناریوهای RCP و ریزمقیاس گردانی مدل‌های LARS-WG و SDSM در غرب کشور، *فصل‌نامه جغرافیای طبیعی*، ۱۳ (۵۱)، ۱۳۰-۱۱۵.
 ۱۶. محمدی، ا.، یزدان پناه، ح.، محمدی، ف.، ۱۳۹۳، بررسی رخدادهای تغییر اقلیم و تأثیر آن بر زمان کاشت و طول دوره رشد گندم دوروم (دیم) مطالعه موردی: ایستگاه سرارود کرمانشاه. *نشریه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۶ (۲)، ۲۴۶-۲۳۱.
 ۱۷. نوری، ح.، ایلدرومی، ع.، ۱۳۹۴، پیش‌بینی تغییرات فصلی پارامترهای اقلیمی مناطق حفاظت‌شده در سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۳۹ با مدل HadCM3 (مطالعه موردی در استان همدان)، *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۶۰ (۴)، ۹۶-۸۱.
 18. Dimri., A.P., Kumar, D., Choudhary, A. and Maharana, P., 2018, Future changes over the Himalayas, Maximum and minimum temperature, *Global and Planetary Change*, 162, 212-234.
 19. Gocic, M., and Trajkovic, S., 2013, Analysis Mann-Kendall and of changes in meteorological variables usin Sen's slope estimator statistical tests in Serbia, *Global and Planetary Change* 100, 172–182.
 20. Haltiner, G. and Williams, R., 1980, Numerical Prediction and Dynamic Meteorology, John Wiley & Sons, 115-120.
 21. Hewitson, B.C. and Crane, R.G., 1996, Climate downscaling, *Techniques and application*,

Niitsoo, A., 2000, Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. Atmosphere – Ocean, 38(3): 395-429.

Thames, UK. Water Resources Research , 42, 121- 134.
35. Zhang, X., Vincent, L.A., Hogg, W.D. and

Projection and zoning of climatic parameters of Karun catchment in future periods using downscaling of HadGEM2-ES model

Hossein Behzadi Karimi¹, Gholam Ali Mozafari^{2*}, Ahmad Mazidi³, Kamal Omidvar²

¹ Ph.D. Student of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

² Professor of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

³ Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

*Corresponding Author Email: gmozafari@yazd.ac.ir

Received: 15 August 2020, accepted: 14 November 2020

ABSTRACT

Global warming due to rising greenhouse gas concentrations in recent decades and the ongoing changes in climate have led to changes in climate parameters. In this study, first, daily data on minimum temperature, maximum temperature and precipitation during the statistical period of 1996-2015 were collected from eight stations located in Karun catchment area. Then, the output data of HadGEM2-ES general circulation model were micro-scaled by LARS-WG6 model under the emission scenarios of RCPs to investigate the prospect for precipitation and temperature change in the next three time periods (2021-2040, 2041-2060 and 2061-2080) compared to the base period. According to the results, under the pessimistic scenario (RCP8.5), in the distant future, the range of monthly temperature changes will fluctuate from a minimum of 0.7 to 4.5 and a maximum temperature of -0.1 to 5.3 °C. During the rainy half of the year, during the period 2061-2080, the highest amount of precipitation will occur under the Medium Scenario (RCP4.5) in March and the highest amount of precipitation will occur under the RCP8.5 scenario in November. In all three future periods and under all three emission patterns, the minimum and maximum temperature anomalies are positive in all seasons; In the distant future and under the RCP8.5 scenario, the maximum anomalies of minimum and maximum temperatures are predicted to be 4.2 in summer and 4.8 °C in spring, respectively. The seasonal average of the basin shows that the highest amount of rainfall decrease in the distant future period, under RCP4.5 scenario, in winter is equal to 55.1 mm and the greatest increase in rainfall in the near future, under the RCP8.5 scenario, will occur in the fall at 21.6 mm. During the period 2021-2080, the long-term average annual rainfall will decrease between 1.9 to 14.6% in future periods compared to the base period. The average annual temperature rises between a minimum of 1.2 to 3.4 and a maximum of between 1.3 and 3.7 °C. Analysis of the spatial distribution of temperature and precipitation variables in the basin in future periods indicates that the territory of rainy and cold regions will be more limited and the area of low rainfall and warm regions will be increased; Therefore, the occurrence of future climate change in the study area will have many negative effects on the Karun River flow and thus reduce the water resources of the basin.

Keywords: Climate change, Climatic parameters, HadGEM2-ES model, LARS-WG6 model, Karun catchment basin.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Behzadi Karimi, H.; Mozafari, Gh.A.; Mazidi, A.; Omidvar, K. (2021). Projection and zoning of climatic parameters of Karun catchment in future periods using downscaling of HadGEM2-ES model. *J. Meteorol. Atmos. Sci.*, 3(4): 349-374

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

