

پیش‌بینی عناصر اقلیمی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک گرگان براساس سناریوهای RCP

کبری زارعی - دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی کشاورزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
حسین محمدی* - استاد اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران
سعید بازگیر - استادیار اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۲/۱۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۶/۱۱

چکیده

هدف از این پژوهش پیش‌بینی مقادیر عناصر اقلیمی دما و بارش ایستگاه سینوپتیک گرگان با مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و با استفاده از خروجی مدل تغییر اقلیم CanESM2 بر پایه سناریوهای تغییر اقلیم RCP 2.6, 4.5, 8.5 برای دوره‌های آینده ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰، و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ و نیز بررسی روند سالانه این تغییرات با استفاده از آزمون من-کندال است. نتایج خروجی مدل در دوره آینده نزدیک و میانی از ماه فوریه تا آگوست و در آینده دور از ماه دسامبر تا آگوست کاهش میزان بارش تا ۴۷،۱۵ میلی‌متر در ایستگاه سینوپتیک گرگان را نشان می‌دهد. همچنین، میزان دمای بیشینه از ۰،۴ تا ۱،۳۳ درجه سانتی‌گراد، دمای کمینه از ۰،۱۵ تا ۰،۸ درجه سانتی‌گراد و دمای میانگین بین ۰،۱۸ تا ۰،۸۹ درجه سانتی‌گراد در هر سه سناریو رو به افزایش خواهد بود. از نظر روند سالانه بارش در سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 معنادار و کاهشی و در مورد عنصرهای دما این روند معنادار و افزایشی خواهد بود.

واژگان کلیدی: بارش، تغییر اقلیم، دما، ریزمقیاس‌نمایی، سناریوهای RCP گرگان.

مقدمه

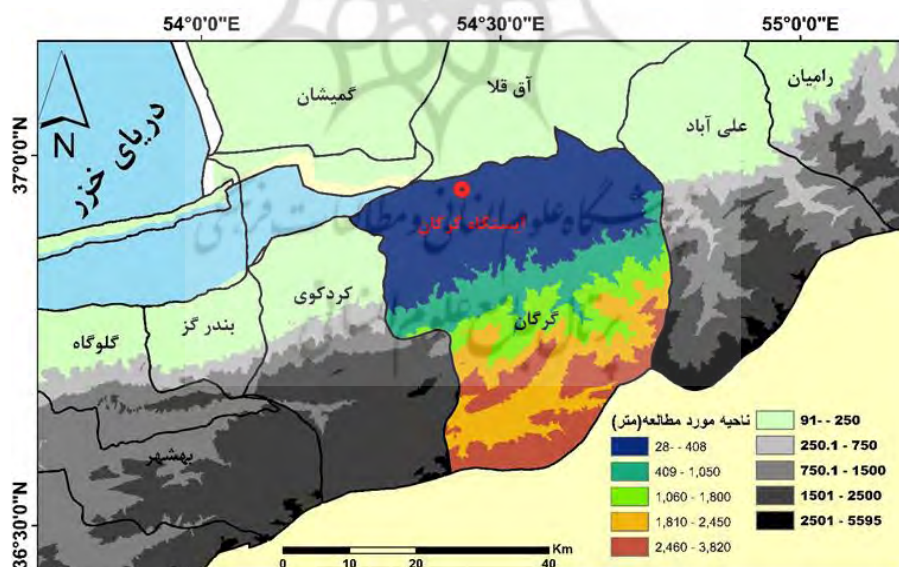
آب و هوای کره زمین در طول تاریخ همواره در حال تغییر بوده، اما با شروع انقلاب صنعتی و استفاده مداخله‌گرانه انسان در طبیعت در سال‌های اخیر شرایط ویژه‌ای برای افزایش دما و در نتیجه آن دگرگونی اقلیم فراهم شده است. طبق گزارش‌های چهارم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC)، این افزایش دما به صورت متوسط در طی صد سال گذشته (۱۹۰۶-۲۰۰۷) به میزان 0.74 ± 0.18 درجه سانتی‌گراد (IPCC, 2007) و طبق گزارش پنجم در طی سی سال اخیر (۱۸۰۰-۲۰۱۲) 0.85 درجه سانتی‌گراد بوده است (IPCC, 2013). پدیده گرمایش جهانی و در نتیجه آن تغییر اقلیم به دلیل اثرهای زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بنابراین، پیش‌بینی بلندمدت متغیرهای اقلیمی برای اطلاع از میزان تغییرات آنها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به منظور تعدیل اثرهای سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از مجامع علمی جهانی قرار گرفته است. بر همین اساس، مدل‌های گردش عمومی جو توسعه یافته‌اند (کویان و همکاران، ۲۰۰۴). از آنجا که در این مدل‌ها شبیه‌سازی عنصرهای اقلیمی در مقیاس بزرگ مکانی و زمانی انجام می‌شود، برای استفاده این عنصرهای شبیه‌سازی شده در مقیاس‌های کوچک‌تر، می‌بایست خروجی این مدل‌ها با تکنیک‌های مختلف کوچک‌مقیاس شوند (صمدی و همکاران، ۱۳۸۶). به همین منظور، دانشمندان

روش‌های متعددی ابداع کرده‌اند که به مجموع این روش‌ها ریزمقیاس‌نمایی^۱ می‌گویند (فانگ و همکاران، ۲۰۱۱). این روش‌ها به‌طور کلی به دو دسته دینامیکی و آماری تقسیم می‌شوند. از مدل‌هایی که برای ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی استفاده می‌شود می‌توان به MM5، Regcm3 و PRECIS اشاره کرد. انواع مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری نیز عبارت‌اند از CLIGEN، LARS WG، ASD، USCLIMATE و SDSM. روش آماری ریزمقیاس‌کردن در مقایسه با روش‌های دینامیکی، به‌ویژه در مواقعی که هزینه کمتر و ارزیابی سریع‌تر عوامل مؤثر بر تغییرات آب و هوایی مورد نیاز باشد، از مزیت‌ها و قابلیت‌های بیشتری برخوردار است، از جمله این مدل‌ها مدل SDSM است (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۶). ویلی و همکاران (۲۰۰۲) و لوپز و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند مدل SDSM مدلی با خطای بسیار پایین برای شبیه‌سازی و ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم به‌ویژه دما است. از جمله مطالعاتی که در زمینه برآورد پارامترهای اقلیمی با استفاده از این مدل ریزمقیاس‌نمایی انجام گرفته می‌توان به موارد ذیل اشاره کرد: سجادخان و همکاران (۲۰۰۶)، لیو و همکاران (۲۰۱۱)، صمدی و همکاران (۲۰۱۱)، آردلت و همکاران (۲۰۱۳)، محمود و بابل (۲۰۱۴)، تاو و همکاران (۲۰۱۵)، ماندال و همکاران (۲۰۱۶)، کندو و همکاران (۲۰۱۷)، کوهی و همکاران (۱۳۹۱)، علیجانی و همکاران (۱۳۹۱). باهک (۱۳۹۲) با بررسی احتمال تغییر اقلیم در استان کرمان به این نتیجه رسید که مقدار بارش در منطقه مورد مطالعه در حال کاهش و میانگین حداقل و حداکثرهای دما رو به افزایش است. آبکار و همکاران (۱۳۹۳) نیز با استفاده از مدل‌های اقلیمی HADCM3 و CGCM به بررسی تغییرات عنصرهای دما و بارش در ایستگاه همدیدی شهر کرمان پرداختند و نتایج مدل HADCM3 را مناسب‌تر ارزیابی کردند. پهلوان و زهرایی (۱۳۹۳) با شبیه‌سازی داده‌های بارش در ایستگاه سد لتیان با مدل‌های SDSM و LARS-WG به این نتیجه رسیدند که در دوره اخیر شدت بارش‌های حدی افزایش یافته است و این روند می‌تواند در بیست سال آینده نیز تداوم داشته باشد. طایی سمیری و همکاران (۱۳۹۳) در حوضه آبخیز بار نیشابور به بررسی وضعیت دما و بارش در سال‌های آبی پرداختند. نتایج حاکی از افزایش میانگین دما، متوسط دمای بیشینه و کمینه، و نیز کاهش بارش در دوره‌های آبی است. رضایی و همکاران (۱۳۹۳) با شبیه‌سازی داده‌های دما در ایستگاه‌های بم و کرمان به این نتیجه رسیدند که دما در همه ماه‌های سال برای هر دو ایستگاه در حال افزایش است. خسروانیان و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل LARS به بررسی پیش‌بینی پارامترهای بارش و میانگین دما در حوضه قره‌سو استان گلستان پرداختند و مقدار این عناصر اقلیمی را برای سال‌های آبی افزایشی برآورد کردند. مطالعه رضایی زمان و افروزی (۱۳۹۴) در ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات با استفاده از مدل SDSM و کاربرد خروجی‌های دما و بارش آن در مدل SWAT در حوضه سیمینه‌رود حاکی از افزایش متوسط تنش آبی و دمایی و کاهش عملکرد محصولات است. آفاخانی افشار و همکاران (۱۳۹۵) نیز به ارزیابی تغییر مؤلفه‌های اقلیمی در حوضه کشف‌رود و آروین و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی این مؤلفه‌ها در استان چهارمحال و بختیاری پرداختند. سلاجقه و همکاران (۱۳۹۵) با تولید داده‌های بارش و دما با مدل SDSM در ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه به این نتیجه رسیدند که بر پایه سناریوی A2 مقدار بارش سالانه در دوره‌های ۲۰۱۵-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۶۵ نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد و دمای متوسط کمینه و بیشینه نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. قاسمی‌فر و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از خروجی‌های مدل Hadcm3 به بررسی تغییرات دمایی ایستگاه‌های سواحل جنوبی دریای خزر پرداختند و افزایش دما را در بیشتر ماه‌های سال برای ایستگاه سینوپتیک گرگان پیش‌بینی کردند. نتایج حاصل از پژوهش عجم‌زاده و ملاتی‌نیا (۱۳۹۵) در

ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه فیروزآباد استان فارس نیز افزایش دمای حداکثر و حداقل و افزایش میزان بارش به میزان ۲ تا ۱۲ درصد را نشان می‌دهد. بابائیان و همکاران (۱۳۹۵) در پژوهش خود میانگین دما را برای ایستگاه گرگان در هر سه دوره آینده افزایشی برآورد کردند. در بیشتر مطالعات انجام‌شده در رابطه با بررسی پدیده تغییر اقلیم عمدتاً براساس مدل‌های گزارش چهارم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, ۲۰۰۷) انجام پذیرفته است؛ درحالی‌که اخیراً بسیاری از پژوهشگران در سراسر جهان از جمله ایران با استفاده از گزارش ارزیابی پنجم (IPCC, ۲۰۱۳) به بررسی تغییرات اقلیم تحت سناریوهای جدید انتشار در مناطق مختلف پرداخته‌اند؛ به‌طوری‌که با بهره‌گیری از آنها می‌توان به درک بهتری از این مناطق در دوره‌های زمانی آتی نسبت به مدل‌های پیشین هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (گزارش سوم و چهارم) جهت مدیریت صحیح‌تر و برنامه‌ریزی دقیق‌تر رسید. از آنجا که تاکنون پژوهشی در رابطه با ریزمقیاس‌نمایی عناصر اقلیمی دما (میانگین، بیشینه، و کمینه) و بارش در رابطه با استان گلستان براساس گزارش پنجم IPCC انجام نگرفته است، در این مقاله دو هدف اصلی بررسی شد: هدف اول شبیه‌سازی ماهانه پارامترهای دما و بارش ایستگاه سینوپتیک گرگان با مدل SDSM و تحت سناریوهای جدید انتشار (RCP) است و هدف دوم بررسی روند سالانه پارامترهای شبیه‌سازی‌شده با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال در طی دوره‌های آتی.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه شهرستان گرگان است. از آنجا که برای بررسی وضعیت تغییر اقلیم یک منطقه به داده‌های اقلیمی حداقل سی سال نیاز است، از تنها ایستگاه سینوپتیک منطقه با این ویژگی یعنی ایستگاه سینوپتیک گرگان برای مطالعه استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت این ایستگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نقشه موقعیت ایستگاه سینوپتیک گرگان

هدف از پژوهش حاضر شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی بارش و دما (دماهای بیشینه، کمینه، و میانگین) ایستگاه سینوپتیک گرگان در سه بازه زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۹)، و آینده دور (۲۰۷۰-۲۰۹۹) است. برای نیل به

این هدف از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM و جدیدترین سناریوهای انتشار استفاده شد. این سناریوها شامل RCP 2.6 (که طبق آن واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳.۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲.۶ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد)، RCP 4.6 (که در آن واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴.۵ وات بر متر مربع ثابت می‌ماند)، و RCP 8.5 (که واداشت تابشی به میزان ۸.۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت دی اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm^۲ می‌رسد و همچنان روند افزایش خواهد داشت) است (زو و همکاران، ۲۰۱۲). در تحقیق پیش رو نخست داده‌های روزانه پارامترهای بارش و دما در دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۰ از سازمان هواشناسی تهیه و مرتب شد. سپس، با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM این پارامترهای اقلیمی در مقیاس ماهانه شبیه‌سازی و با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) مقایسه شد. در مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی از سه نوع داده استفاده می‌شود: داده‌های مشاهداتی روزانه (پیش‌بینی‌شونده)، داده‌های پیش‌بینی‌کننده مشاهداتی (NCEP)، و نیز داده‌های پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس حاصل از مدل‌های گردش عمومی جو (CanESM2) که مشخصات آن در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱. مشخصات مدل CanESM2 (آروا و همکاران، ۲۰۱۱)

نام مدل	قدرت تفکیک اتمسفری (درجه) (طول * عرض)	قدرت تفکیک افقانی (درجه) (طول * عرض)	گروه مؤسس	دوره شبیه‌سازی تاریخی / آینده	سناریوهای شبیه‌سازی
Canesm2	2.81 × 2.81 ^۱	1.41 × .94 ^۲	CCCMA کانادا	۱۸۵۰-۲۰۰۵ ۲۰۰۶-۲۱۰۰/	RCP _s 2.6, 4.5, 8.5

مراحل کار با این مدل به‌طور خلاصه به شرح زیر است: ۱. آماده‌سازی داده‌های پیش‌بینی‌شونده و پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس؛ ۲. کنترل کیفیت داده‌ها و تبدیل داده‌ها (برای داده‌های بارش)؛ ۳. انتخاب بهترین عنصرهای پیش‌بینی‌کننده؛ ۴. کالیبره کردن مدل؛ ۵. تولید مولد هواشناسی با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های مشاهداتی؛ ۶. آنالیز آماری؛ ۷. خروجی گرافیکی مدل؛ ۸. تولید سناریوهای اقلیمی با استفاده از پیش‌بینی‌کننده‌های اقلیمی مدل.

آماده‌سازی داده‌های پیش‌بینی‌شونده و پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس: در این مرحله داده‌های سری زمانی روزانه برای عنصرهای اقلیمی (بارش، دمای میانگین، دمای کمینه، و دمای بیشینه) ایستگاه گرگان برای دوره آماری ۱۹۸۱-۲۰۱۰ در فایل Notepad مرتب شد و از آدرس <http://www.cccsn.ec.gc.ca/?page=dst-> داده‌های پیش‌بینی‌کننده بزرگ‌مقیاس NCEP و CanESM2 با توجه به مختصات منطقه مورد مطالعه در شبکه مشبک جهانی موجود در سایت CCSN تهیه شد.

انتخاب بهترین عنصرهای پیش‌بینی‌کننده (غربالگری): در این مرحله با انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌های گوناگون و بررسی میزان همبستگی آن‌ها با عنصرهای مورد نظر به‌صورت حذف مرحله به مرحله و نمودار پراکنش آنها، مناسب‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌هایی که قوی‌ترین ارتباط معنی‌دار بین پیش‌بینی‌شونده و پیش‌بینی‌کننده را داشتند انتخاب شدند. در ادامه برای اطمینان از دقت عملکرد مدل و مقایسه نتایج واسنجی و داده‌های پایه از روابط آماری R^2 ، $PBIAS$ ، $RMSE$ ، و R^2 استفاده شد. این معیارها براساس رابطه‌های ۱ تا ۳ محاسبه می‌شوند.

1. Representative Concentration Pathways

2. Part Per Million

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 * \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (3)$$

در این رابطه‌ها، O_i داده‌های مشاهداتی، E_i داده‌های برآوردشده، و \bar{x} و \bar{y} میانگین داده‌های مشاهداتی و برآوردشده است. RMSE معرف دقت در بسیاری از روش‌های آماری است. هر چه این مقادیر به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بالای مدل است. PBIAS میزان تمایل مدل در بیش‌برآورد (مقادیر مثبت) یا کم‌برآورد (مقادیر منفی) را نشان می‌دهد و R^2 بیان‌کننده ارتباط داده‌های مشاهداتی و محاسباتی است. دامنه این پارامتر بین ۰ تا ۱ است. هر چه این مقدار به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده ارتباط قوی بین دو گروه است (موریاتی و همکاران، ۲۰۰۷). در انتهای پژوهش روند سالانه پارامترهای اقلیمی برآوردشده بارش و دمای ایستگاه گرگان در دوره‌های آینده (۲۰۱۱-۲۱۰۰) با آزمون ناپارامتریک من-کندال و شیب سن با استفاده از برنامه MAKESENS در صفحه گسترده اکسل بررسی شد. در نهایت، نتایج حاصل از ارزیابی آماره‌های مختلف به صورت نمودارها و جدول‌ها نمایش داده شد.

یافته‌های پژوهش

اعتبارسنجی مدل SDSM

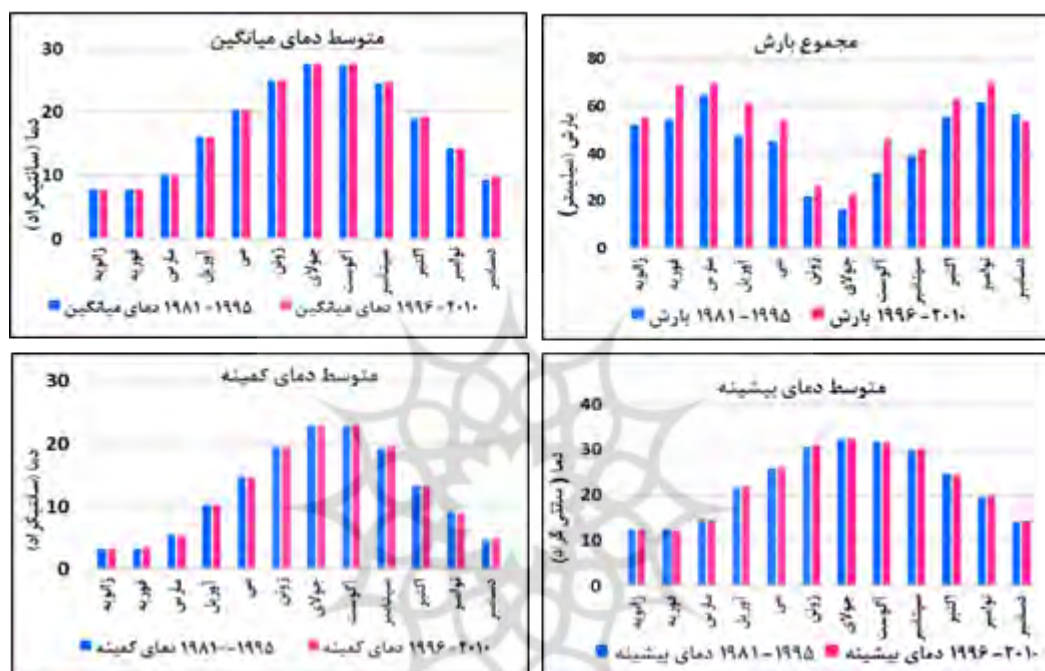
جدول ۲ مناسب‌ترین پیش‌بینی‌کننده‌هایی را که بیشترین میزان همبستگی با عنصرهای مورد نظر را داشتند نشان می‌دهد. همان‌طور که از نتایج مندرج در جدول برمی‌آید، بیشترین میزان همبستگی پیش‌بینی‌کننده‌های NCEP با عنصر بارش را ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال و میانگین دما در ارتفاع دومتری از سطح زمین به خود اختصاص داده‌اند. در رابطه با پارامترهای مختلف دما، این پیش‌بینی‌کننده‌ها شامل ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و میانگین دما در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین است. همچنین، ذکر این نکته لازم است که میزان این همبستگی در رابطه با عنصرهای دما قوی‌تر از بارش است؛ به این دلیل که بارش یک عنصر شرطی و گسسته است و تحت تأثیر عوامل زیادی قرار دارد. بنابراین، میزان همبستگی آن با عنصرهای جوی سطح بالای جو نسبت به دما کمتر است که این میزان همبستگی با نتایج پژوهش‌های طایی سمیرمی و همکاران (۱۳۹۳) و سلاجقه و همکاران (۱۳۹۵) مطابقت دارد.

جدول ۲. پیش‌بینی‌کننده‌های منتخب برای کوچک‌مقیاس کردن آماری دما و بارش روزانه ایستگاه گرگان

دمای متوسط		دمای کمینه		دمای بیشینه		بارش	
پیش‌بینی‌کننده منتخب	P-Value	پیش‌بینی‌کننده منتخب	P-Value	پیش‌بینی‌کننده منتخب	P-Value	پیش‌بینی‌کننده منتخب	P-Value
Ncep500	۰/۰۰	Ncep500	۰/۰۰	Ncep500	۰/۰۰	Ncep500	۰/۰۲
tem..Ncep	۰/۰۰	Nceptem	۰/۰۰	Nceptem	۰/۰۰	Nceptem.	-۰/۰۶

پس از انتخاب بهترین پیش‌بینی‌کننده‌ها، دوره زمانی ۱۹۸۱-۲۰۱۰ به‌عنوان دوره پایه انتخاب و نیمی از داده‌های این دوره زمانی یعنی از سال‌های ۱۹۸۱-۱۹۹۵ برای واسنجی مدل در نظر گرفته شد. نتایج این واسنجی به شکل نمودار در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودارها مشخص است، اختلاف چندانی بین مقادیر داده‌های پایه و مقادیر برآورده شده توسط مدل وجود ندارد.

در ادامه برای اطمینان از دقت عملکرد مدل و مقایسه نتایج واسنجی و داده‌های پایه از روابط آماری RMSE، PBIAS، و R^2 استفاده شد. نتایج حاصل از این دقت‌سنجی در جدول ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲. مقایسه مقادیر عنصرهای بارش و دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در مرحله واسنجی

جدول ۳. مقدار شاخص‌های ارزیابی مدل پیش‌بینی‌کننده NCEP در ایستگاه گرگان

معیارهای آماری	بارش	دمای بیشینه	دمای کمینه	دمای میانگین
RMSE	۸٫۵	۰٫۲۴	۰٫۱۶	۰٫۱۸
PBIAS	-۱۵٫۴	-۰٫۰۲	-۰٫۱۸	-۰٫۵۸
R^2	۰٫۸۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۹

با توجه به نتایج شکل ۲ و جدول ۳، مشخص شد که داده‌های شبیه‌سازی شده توسط عنصرهای پیش‌بینی‌کننده منتخب با داده‌های مشاهداتی در طول دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) تطابق خوبی دارند که در این میان تطابق دمای کمینه با RMSE به میزان ۰٫۱۶ و R^2 به میزان ۰٫۹۹ بیشتر از سایر پارامترهاست. بر این اساس، مشخص شد که عنصرهای پیش‌بینی‌کننده منتخب از کارایی مناسب و قابل قبولی جهت شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی مورد نظر برای دوره‌های آتی برخوردارند.

شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی ایستگاه گرگان از سال ۲۰۱۱ تا ۲۱۰۰

در این بخش پس از ارزیابی دقت مدل، به شبیه‌سازی عنصرهای اقلیمی دما و بارش برای سه دوره سی‌ساله در قرن ۲۱

براساس مدل جهانی CanESM2، تحت سه سناریوی RCP 2.6، RCP 4.5، و RCP 8.5 برای ایستگاه گرگان اقدام شد و تغییرات مقادیر شبیه‌سازی‌شده در سناریوهای مختلف نسبت به دوره پایه بررسی شد.

بررسی تغییرات بارش

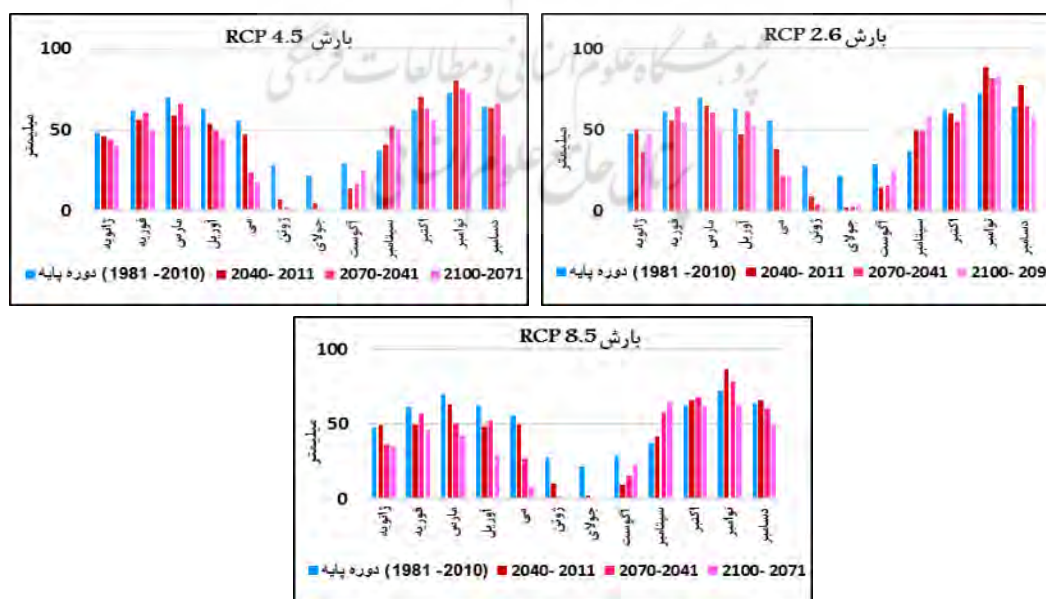
سناریوی RCP 2.6: همان‌طور که در شکل ۳ و جدول ۴ مشخص است، در دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰) بارش ماهانه ایستگاه گرگان در ماه‌های سپتامبر، نوامبر، دسامبر، و ژانویه نسبت به دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰) افزایش خواهد یافت و در بقیه ماه‌ها این مقدار رو به کاهش خواهد رفت. بیشترین افزایش مربوط به ماه نوامبر و به میزان ۱۶,۲۲ میلی‌متر معادل ۲۲,۳ درصد و بیشترین کاهش بارش در ماه ژوئیه به میزان ۱۹,۱ میلی‌متر معادل با ۸۹,۱ درصد است. میانگین کل بارش ماهانه ایستگاه گرگان در آینده نزدیک نسبت به دوره پایه به میزان ۸,۹ درصد کاهش خواهد داشت. در دوره آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) نیز در ماه‌های سپتامبر، نوامبر، دسامبر، و فوریه میانگین بارش افزایش خواهد یافت که بیشترین مقدار این افزایش مربوط به ماه سپتامبر به میزان ۱۲ میلی‌متر است. در بقیه ماه‌ها میانگین بارش نسبت به دوره پایه کاهش می‌یابد. این کاهش بارندگی در ماه می به بیشترین مقدار خود یعنی ۳۳,۹ میلی‌متر می‌رسد. در این دوره مقدار بارش در مقایسه با دوره پایه به میزان ۷,۸ میلی‌متر یعنی حدود ۱۵,۳ درصد کاهش خواهد یافت. در دوره آتی سوم، یعنی آینده دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) ماه‌های سپتامبر، اکتبر، و نوامبر شاهد افزایش مقدار بارش ماهانه خواهند بود. در سایر ماه‌ها میزان بارش نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. همانند دوره میانی بیشترین افزایش مربوط به ماه سپتامبر به میزان ۲۱ میلی‌متر و بیشترین کاهش مربوط به ماه می با مقدار ۳۴ میلی‌متر است. در دوره آینده دور میانگین بارش ماهانه نسبت به دوره پایه ۱۴,۸ درصد کاهش خواهد یافت. به‌عنوان نتیجه‌گیری کلی، می‌توان گفت طبق برآورد مدل تحت سناریوی RCP 2.6 شاهد افزایش بارش‌های پاییزه خواهیم بود و در بقیه ماه‌ها بارش کاهش خواهد یافت و میزان این کاهش در ماه‌های آوریل تا اگوست دارای بیشترین مقدار است و این به معنای کاهش بارش‌های بهاری است. میانگین بارش در هر سه دوره نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت و مقدار این کاهش در دوره آینده میانی بیشتر از دو دوره دیگر خواهد بود.

سناریوی RCP 4.5: طبق شکل ۳ و نتایج مندرج در جدول ۴، در دوره آتی اول در سه ماه سپتامبر، اکتبر، و نوامبر مقدار میانگین بارش ماهانه نسبت به دوره پایه افزایش یافته که بیشترین این مقدار در ماه اکتبر با مقدار ۸,۰۳ میلی‌متر معادل ۱۲,۹ درصد است. از ماه دسامبر تا اگوست مقدار بارش کاهش می‌یابد. بیشترین میزان این کاهش به ماه ژوئن با مقدار ۲۰,۹ میلی‌متر اختصاص دارد. به‌طور کلی، در این دوره با کاهش ۱۱,۶ درصدی بارش مواجه خواهیم شد. آینده میانی: در این دوره از اواخر فصل تابستان تا انتهای پاییز، یعنی از ماه سپتامبر تا دسامبر، میانگین ماهانه بارش افزایش می‌یابد و از ژانویه تا اگوست (از ابتدای زمستان تا اواسط تابستان) با کاهش بارش مواجهیم. بیشترین میزان افزایش بارش مربوط به ماه سپتامبر با ۱۵,۹ میلی‌متر و بیشترین کاهش مربوط به ماه می با میزان ۳۱,۸ میلی‌متر است. در این دوره به‌طور میانگین در کل دوره بارش با میزان ۷,۶ میلی‌متر یعنی ۱۴,۹ درصد کاهش خواهد یافت. آینده دور: در این دوره ماه سپتامبر با ۱۳ میلی‌متر و نوامبر با ۰,۵ میلی‌متر افزایش بارش دارد و در بقیه ماه‌ها بارش کاهش می‌یابد که بیشینه این کاهش در ماه می با میزان ۳۸,۲ میلی‌متر معادل ۶۸,۷ درصد مشاهده می‌شود و در کل دوره شاهد کاهش ۲۵,۳ درصدی بارش هستیم. در یک نتیجه‌گیری کلی، می‌توان گفت که در این سناریو نیز شاهد افزایش بارش در فصل پاییز و کاهش آن در بقیه فصول به‌ویژه از اواسط بهار تا اواسط تابستان می‌باشیم. همچنین، هرچه از ابتدای دوره به انتهای دوره یعنی تا پایان قرن ۲۱ نزدیک شویم میزان بارش کاهش می‌یابد و در انتهای دوره به بیشترین مقدار خود می‌رسد.

سناریوی RCP 8.5: طبق نمودارهای شکل ۳ و جدول ۴، در این سناریو و در دوره آتی اول بارش ایستگاه مورد مطالعه در مقایسه با دوره پایه از اواخر تابستان تا اوایل زمستان یعنی از ماه سپتامبر تا ژانویه افزایش و در بقیه ماهها کاهش پیدا می‌کند. بیشترین افزایش مربوط به ماه نوامبر با ۱۳٫۹ میلی‌متر و بیشترین مقدار کاهش در ماه آگوست با ۲۰ میلی‌متر است. در کل دوره بارش میانگین ماهانه ۱۱٫۵ درصد کاهش خواهد داشت. در دوره بعد یعنی آینده میانی، در سه ماه سپتامبر، اکتبر، و نوامبر میزان بارش اندکی افزایش می‌یابد که بیشترین مقدار افزایش مربوط به ماه سپتامبر با ۲۱٫۳ میلی‌متر یعنی ۵۷٫۷ درصد است. اما در بقیه ماهها شاهد کاهش بارش در مقایسه با دوره پایه هستیم. در ماه می این کاهش به بیشینه مقدار خود یعنی ۴۸ میلی‌متر معادل ۵۱٫۹ درصد می‌رسد. در دوره میانی میانگین بارش نسبت به میانگین دوره پایه با میزان ۱۷٫۱ درصد کاهش برآورد می‌شود. در نهایت در دوره آینده دور به جز در ماه سپتامبر، که میزان بارش به میزان ۲۷٫۴ میلی‌متر نسبت به دوره پایه بیشتر برآورد شده است، در بقیه ماهها میزان بارش کمتر برآورد شده؛ به طوری که در ماه می به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۷٫۱ میلی‌متر می‌رسد. در کل دوره با کاهش ۳۰٫۸ درصدی بارش مواجهیم که نسبت به دو دوره قبل بیشتر است. به عنوان یک نتیجه‌گیری کلی از این سناریو می‌توان گفت که هر چه از ابتدای دوره به سمت انتهای دوره برویم بر تعداد ماههای با کاهش بارش افزوده می‌شود و همچنین میانگین بارش نسبت به دوره پایه کمتر و کمتر می‌شود و این برآورد در صورت تداوم روند گرمایشی زمین دور از انتظار نیست.

جدول ۴. تغییرات بارش (میلی‌متر) در ایستگاه گرگان تحت سه سناریو و در سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

دوره آتی		۲۰۷۱-۲۱۰۰			۲۰۷۰-۲۰۴۱			۲۰۱۱-۲۰۴۰		
سناریو	mean	min	max	mean	min	max	mean	min	max	
RCP 2.6	-۷٫۵	May	۲۰٫۹	Sep	-۷٫۸	May	-۳۳٫۹	Jul	۱۶٫۲	
RCP 4.5	-۱۲٫۹	May	۱۳	Sep	-۷٫۵	May	-۳۱٫۸	Jun	۸	
RCP 8.5	-۱۵٫۷	May	۲۷٫۴	Sep	-۸٫۷	May	-۲۸٫۸	Aug	۱۳٫۹	

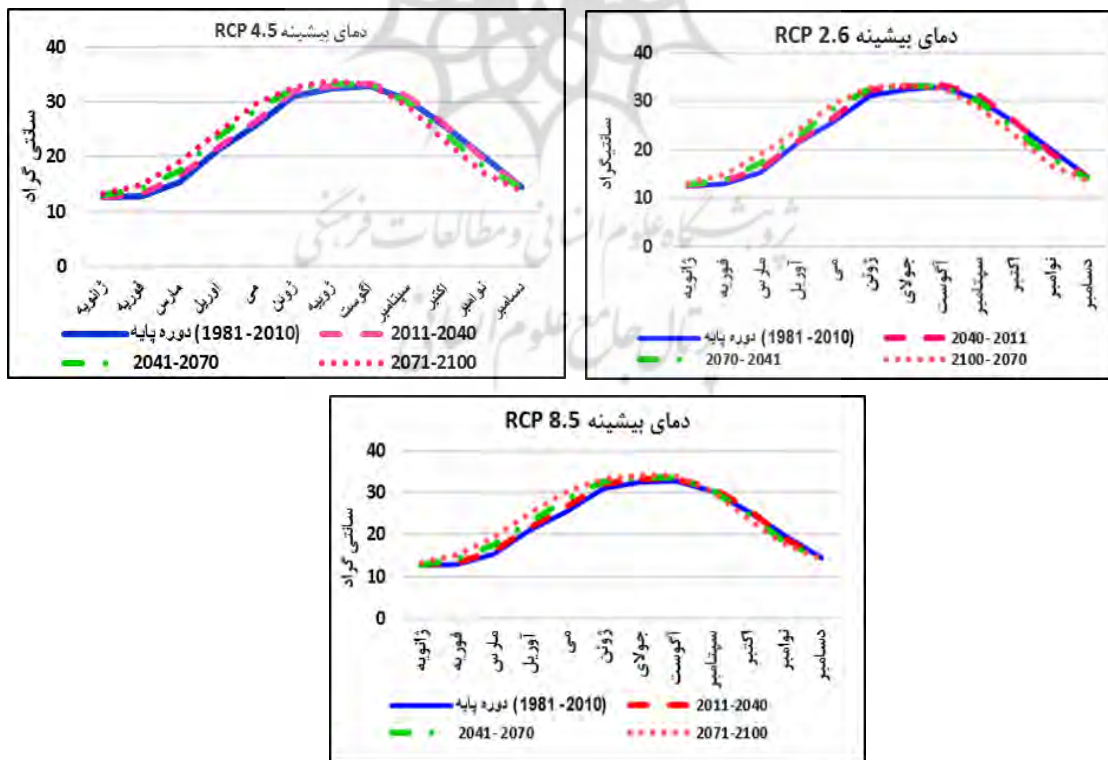


شکل ۳. مقایسه مقادیر مجموع بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سه سناریو و در سه دوره آتی

بررسی تغییرات دمای پیشینه: طبق برآورد مدل و نتایج مندرج در جدول ۵ و نمودارهای شکل ۴، دمای پیشینه ایستگاه گرگان به‌طور کلی در هر سه سناریو و هر سه دوره در ماه‌های سپتامبر تا دسامبر مقداری کاهش و در بقیه ماه‌ها به‌ویژه از ماه فوریه تا ژوئیه افزایش می‌یابد. بیشترین افزایش دما در ماه می رخ می‌دهد و میزان این افزایش از آینده نزدیک به سمت آینده دور و در سناریوی RCP 8.5 بیشتر می‌شود (۴٫۵۲ درجه سانتی‌گراد) و بیشترین کاهش دما در ماه نوامبر و مربوط به آینده دور و سناریوی RCP 8.5 با میزان ۲٫۴۸- درجه سانتی‌گراد است. متوسط ماهانه کل دوره در همه سناریوها افزایشی بین 0.4 تا ۱٫۳۳ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. میزان این افزایش از آینده نزدیک به سمت آینده دور بیشتر می‌شود.

جدول ۵. تغییرات دمای پیشینه (درجه سانتی‌گراد) در ایستگاه گرگان تحت سه سناریو و در سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

۲۰۱۱-۲۰۴۰			۲۰۷۰-۲۰۴۱			۲۰۷۱-۲۱۰۰			دوره آتی
max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	سناریو
Jun ۱٫۲	Nov -۰٫۵۶	۰٫۴۷	May ۲٫۶	Nov -۱٫۷۷	-۰٫۴۸	۳٫۷۹ May	Nov -۳٫۱۸	۰٫۵۵	RCP 2.6
Mar ۱٫۱۱	Nov -۰٫۳۸	۰٫۴۰	May ۲٫۱۹	Nov -۱٫۹۶	-۰٫۶۳	۴٫۰۹ May	Nov -2.93	۰٫۷۷	RCP 4.5
May ۰٫۹۳	Nov -۰٫۷۴	۰٫۴۵	May ۲٫۶۵	Nov -۱٫۸۳	-۰٫۷۳	۴٫۵۲ May	Nov -۲٫۴۸	1.33	RCP 8.5

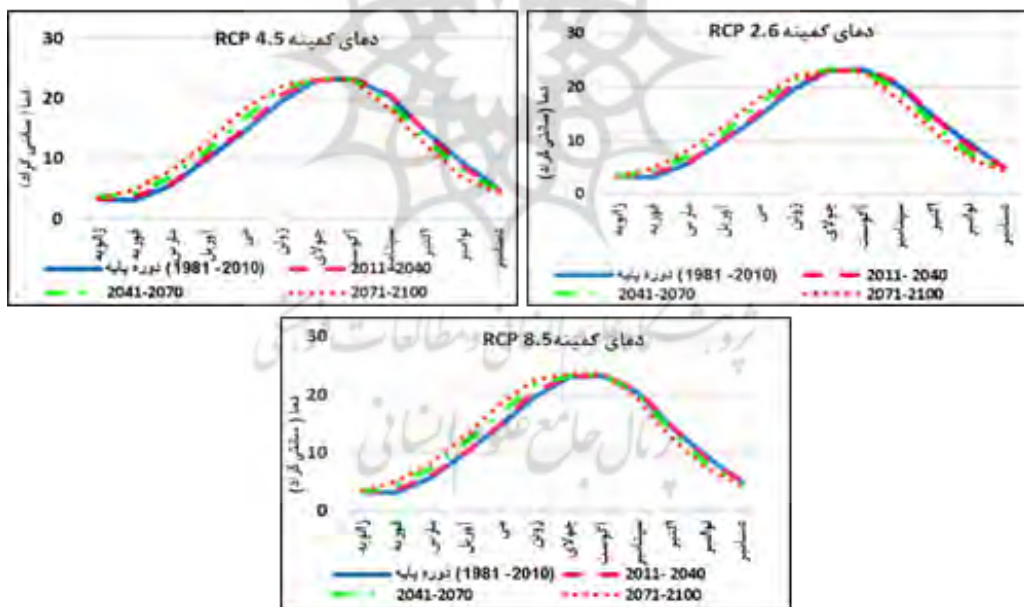


شکل ۴. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای پیشینه تحت سه سناریو و در سه دوره آتی

بررسی تغییرات دمای کمینه: همان‌طور که در جدول ۶ و شکل ۵ نشان داده شده است، روند کلی دمای کمینه شبیه‌سازی شده در هر سه سناریو همانند روند دمای کمینه دوره پایه است. بیشترین افزایش دما در آینده نزدیک هر سه سناریو در ماه ژوئن (۱،۰۳ تا ۱،۱۴ درجه سانتی‌گراد) و در آینده میانی و دور مربوط به ماه می (۲،۱۲ تا ۳،۷۷ درجه سانتی‌گراد) است. بیشترین کاهش دما هم به‌جز در دوره زمانی آینده دور سناریوی RCP 2.6 (ماه اکتبر با مقدار ۲،۷۶- درجه سانتی‌گراد) در بقیه موارد در ماه نوامبر (۰/۴۴ تا ۲،۵- درجه سانتی‌گراد) برآورد شده است. میانگین دمای کمینه از آینده نزدیک به سمت آینده دور افزایش یافته و در سناریوی RCP 8.5 بیش از دو سناریوی دیگر است. از نظر روند، به‌طور کلی از ماه سپتامبر تا دسامبر (از اواخر تابستان تا اواخر پاییز) دما روندی کاهشی و در سایر ماه‌ها افزایشی خواهد داشت.

جدول ۶. تغییرات دمای کمینه (درجه سانتی‌گراد) در ایستگاه گرگان تحت سه سناریو و در سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

۲۰۱۱-۲۰۴۰			۲۰۷۰-۲۰۴۱			۲۰۷۱-۲۱۰۰			دوره آتی
max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	سناریو
Jun. ۱،۰۳	Nov. -۰/۴۴	۰/۲۲	May ۲،۱۵	Nov -۱،۷۷	۰/۲۸	۳،۲۸ May.	Oct -۲،۷۶	۰/26	RCP 2.6
Jun. ۱،۱۴	Nov. -۰/۷	۰/۱۵	May ۲،۱۲	Nov -۱،۳۷	۰/۳۶	۳،۵۸ May.	Nov -۲،۵۰	۰/45	RCP 4.5
Jun. ۱،۰۳	Nov. -۰/۶۱	۰/۱۸	May ۲،۱۴	Nov -۱،۱۵	۰/۴۹	May. ۳،۷۷	Nov -۲،۱۹	0/85	RCP 8.5



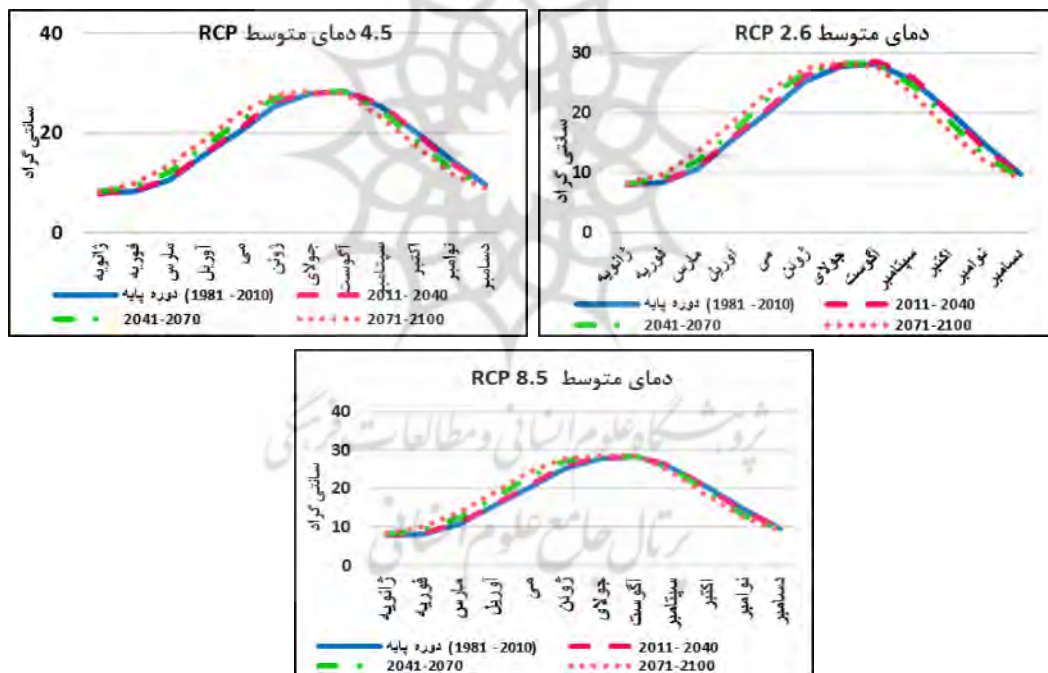
شکل ۵. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه دمای کمینه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سه سناریو و در سه دوره آتی

بررسی تغییرات دمای متوسط: طبق برآورد جدول ۷ و شکل ۶، دمای متوسط ایستگاه گرگان در هر سه سناریو از ماه ژانویه تا آگوست (از ابتدای زمستان تا ابتدای تابستان) افزایش و از ماه آگوست تا دسامبر (اواسط تابستان تا اواخر پاییز) کاهش می‌یابد. در دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ماه ژوئن نسبت به ماه‌های دیگر دارای بیشترین افزایش دما و ماه نوامبر دارای بیشترین میزان کاهش دما است. در دوره‌های آتی ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در هر سه سناریو نتایج

مشابه بوده؛ به طوری که بیشینه افزایش مربوط به ماه می و بیشینه کاهش مربوط به ماه نوامبر است. این مقادیر در آینده دور و سناریوی RCP 8.5 بیش از دوره میانی و سناریوی RCP 4.5 است. به طور کلی، میزان متوسط دما در هر سه سناریو و در هر سه دوره آینده افزایش خواهد یافت و مقدار این افزایش بین ۰/۱۸ تا ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد است و نکته قابل توجه اینکه هر چه به سمت سال‌های انتهایی قرن برویم دمای متوسط افزایش می‌یابد که با نتایج حاصل از تحقیق عزیزی آبادی فراهانی و همکاران (۱۳۹۵: ۷۴۴)، آقاخانی افشار و همکاران (۱۳۹۵: ۲۳۲)، احمدوند کهریزی و روحانی (۱۳۹۵: ۶۰۳)، و قاسمی فر و همکاران (۳۸: ۱۳۹۵) مطابقت دارد.

جدول ۷. تغییرات دمای متوسط در ایستگاه گرگان تحت سه سناریو و در سه دوره آتی در مقایسه با دوره پایه (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

دوره آتی			۲۰۷۰-۲۰۴۱			۲۰۷۱-۲۱۰۰			سناریو
max	min	mean	max	min	mean	max	min	mean	
Jun ۱	Nov -۰/۸	۰/۱۹	May ۲,۳۲	Nov -۱,۹۹	۰/۲۳	May ۳,۵۷	Oct -۳,۲۹	-۰/۳۳	RCP 2.6
Jun ۱,۲۲	Nov -۰/۶۹	۰/۱۸	May ۲,۱۹	Nov -۱,۷۸	۰/۳۶	May ۳,۶۵	Nov -۲,۸۴	-۰/۴۶	RCP 4.5
Jun ۰/۹۷	Nov -۰/۶۴	۰/۲۱	May ۲,۶۸	Nov -۱,۶۷	۰/۵۶	May ۰/۴	Nov -۲,۳۷	-۰/۸۹	RCP 8.5



شکل ۶. مقایسه مقادیر میانگین ماهانه دمای متوسط مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تحت سه سناریو و در سه دوره آتی

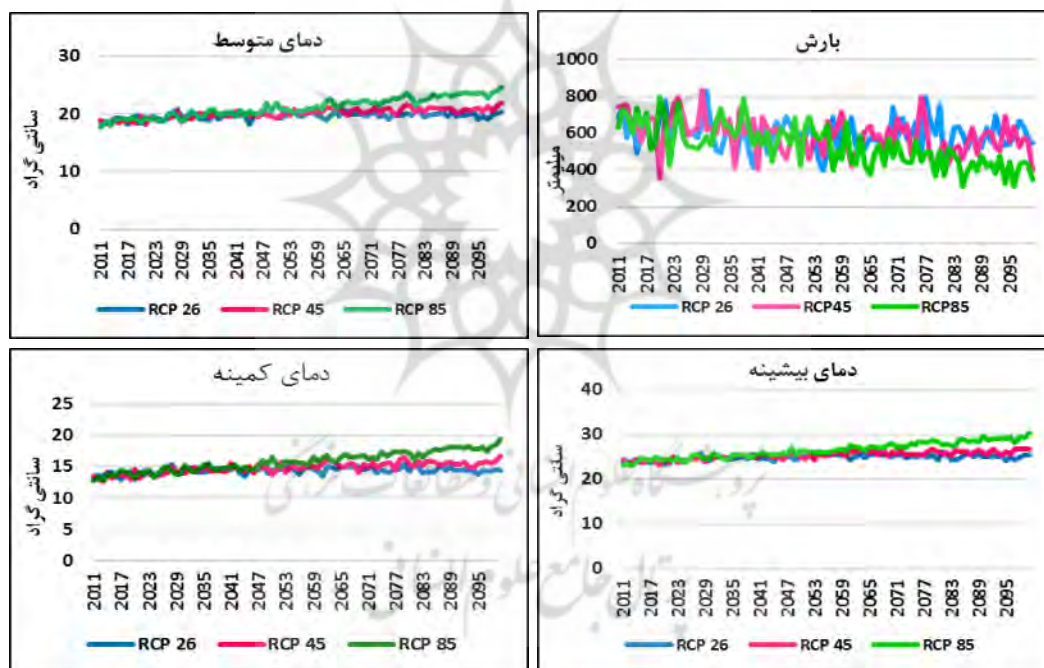
آزمون من- کندال

طبق نتایج حاصل از آزمون ناپارامتری من- کندال، که نتایج آن در جدول ۸ و شکل ۷ نشان داده شده است، روند بارش در سناریوی RCP 2.6 معنادار نیست، اما در RCP 4.5 و RCP 8.5 بارش دارای روند معنادار و منفی (کاهش) در سطح معناداری ۰/۰۱ است. مقدار این کاهش به ترتیب ۱۴۴ و ۲۸۶,۲ میلی‌متر در طی این دوره نودساله خواهد بود. رابطه با عنصر دما در هر سه عنصر دمای بیشینه، کمینه، و متوسط در همه سناریوها و در سطح ۱ درصد روند دما معنادار

و مثبت (افزایشی) است. در رابطه با دمای بیشینه طبق نتیجه به دست آمده از آماره شیب سن این افزایش در سناریوی RCP 2.6 و RCP 4.5 برابر با ۱,۰۸ و در سناریوی RCP 8.5 بیش از دو سناریوی دیگر و به میزان ۵,۸۵ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. در رابطه با دمای کمینه می‌توان گفت در سناریوی RCP 2.6 مقدار این افزایش ۰,۸۱ در RCP 4.5 به میزان ۲,۴۳ و در RCP 8.5 به مقدار ۵,۲۲ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. در دمای متوسط مقدار این افزایش به ترتیب ۰,۹ در سناریوی خوش‌بینانه RCP 2.6، ۲,۴۳ در سناریوی میانه RCP 4.5، و ۵,۵ درجه سانتی‌گراد در سناریوی بدبینانه RCP 8.5 خواهد بود.

جدول ۸. مقدار آماره من- کندال و شیب سن در سه سناریو و برای سه دوره آتی

RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 2.6			سناریو
β	sig	z	β	Sig.	z	β	Sig.	Z	آماره پارامتر
-۳/۱۸	***	-۷/۱۴	-۱/۶	***	-۴/۱۷	-۰/۴۰		-۱/۲۸	بارش
۰/۰۶۵	***	۱۱/۶۱	۰/۰۱۲	***	۴/۰۶	۰/۰۱۲	***	۴/۸۷	دمای بیشینه
۰/۰۵۸	***	۱۱/۶۴	۰/۰۲۷	***	۸/۷۴	۰/۰۹	***	۳/۹۵	دمای کمینه
۰/۰۶۱	***	۱۱/۵۴	۰/۰۲۷	***	۸/۷۷	۰/۱	***	۴/۹۱	دمای متوسط



شکل ۷. نمودار روند عنصرهای اقلیمی بارش و دما در طی سال‌های آتی ۲۰۱۱ تا ۲۱۰۰

بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی دما و بارش با استفاده از مدل چندگانه خط SDSM و مدل‌های گردش عمومی جو در شهر گرگان اقدام شد. از خروجی مدل CanESM2 تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 برای دوره‌های آتی در قرن ۲۱ شبیه‌سازی شد و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که داده‌های دما همبستگی بهتری با داده‌های مشاهدات (در مقایسه با داده‌های بارندگی) داشته‌اند؛ این بدان علت است که دما یک عنصر با توزیع احتمالی نرمال است و تغییرپذیری کمتری نسبت به عنصر بارش دارد. این در حالی است که بارش عنصری گسسته است

و تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. این نتایج با نتایج سجادخان و همکاران (۲۰۰۶)، باهک (۱۳۹۲)، طایی سمیرمی و همکاران (۱۳۹۳)، رضایی و همکاران (۱۳۹۳)، و سلاجقه و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد. همچنین، نتایج این تحقیق با نتایج محققانی چون لویز و همکاران (۲۰۰۸)، سجادخان و همکاران (۲۰۰۶)، عزیزی آبادی فراهانی و همکاران (۱۳۹۵)، و احمدوند کهریزی و روحانی (۱۳۹۵) در اینکه مدل SDSM توانایی مناسبی در کوچک‌مقیاس کردن داده‌های دما و بارش دارد همسوست. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مشخص شد که در طول قرن ۲۱ دما رو به افزایش و بارش رو به کاهش است. در ایستگاه گرگان در سه سناریو RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۷۱) و میانی (۲۰۷۰-۲۰۹۱) از ماه فوریه تا آگوست و در دوره آینده دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) از ماه دسامبر تا آگوست شاهد کاهش میزان بارش می‌باشیم. بیشترین کاهش بارش در دوره نزدیک در ماه‌های ژوئن، ژوئیه، و آگوست به میزان ۱۹،۱ و ۲۰،۹ و ۲۰ میلی‌متر است و در دوره میانی و دور در هر سه سناریو مربوط به ماه می از ۲۸،۸ تا ۴۷،۱۵ میلی‌متر است. به‌طورکلی، در همه سناریوها هر چه به سمت سال‌های انتهایی قرن ۲۱ برویم از میانگین بارش کاسته خواهد شد و این مقدار کاهش در سناریوی RCP 8.5 بیش از دو سناریوی دیگر است. این نتیجه منطبق بر نتایج حاصل از کار خورشیددوست و همکاران (۱۳۹۶) است. در رابطه با عنصرهای دما، می‌توان گفت که روند کلی عنصرهای دمایی در دوره‌های آبی همسو با روند این عنصرها در دوره پایه است، با این تفاوت که دما در زمستان و بهار تا اواسط تابستان اندکی افزایش یافته است، اما از اواخر تابستان تا اواخر پاییز کاهش خواهد یافت. در دوره آبی اول افزایش دما بیشتر در ماه ژوئن و در دوره‌های آینده میانی و دور در ماه می بیش از سایر ماه‌هاست. همچنین، هر چه از آینده نزدیک به سمت سال‌های انتهایی قرن برویم میزان افزایش دما بیشتر خواهد شد. این افزایش در سناریوی RCP 8.5 بیش از دو سناریوی دیگر است. این در حالی است که در رابطه با بارش به‌طورکلی عکس این حالت را شاهد هستیم. به عبارت دیگر، از اواخر تابستان تا اواخر پاییز، که شاهد کاهش دما هستیم، میزان بارش نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد و در بقیه ماه‌ها، که میزان دما افزایش می‌یابد، از مقدار بارش کاسته می‌شود و به این معنی است که در ایستگاه گرگان در دوره‌های آبی بارش بر روی بارش‌های پاییزه متمرکز خواهد بود. از نظر روند سالانه بارش در سناریوهای RCP 4.5 و RCP 8.5 معنادار و کاهشی و در مورد عنصرهای دمایی بیشینه و کمینه و متوسط معنادار افزایشی خواهد بود. همچنین، مقدار کاهش بارش و افزایش دما در سال‌های انتهایی قرن و در سناریوی RCP 8.5 بیش از سناریوهای RCP 2.6 و RCP 4.5 است. با توجه به نتیجه کلی برآمده از این تحقیق مبنی بر افزایش دما و کاهش بارش در فصول بهار و تابستان و افزایش بارش و سردتر شدن فصل پاییز، به‌نظر می‌رسد که در برنامه‌ریزی‌های منابع آب و به‌ویژه برنامه‌ریزی‌های مربوط به بخش کشاورزی این نکته باید مد نظر قرار گیرد تا اثرهای احتمالی منفی تغییر اقلیم در منطقه مورد نظر به‌حداقل برسد.

منابع

- آبکار، ع.ج.؛ حبیب‌نژاد، م.؛ سلیمانی، ک. و نقوی، ه. (۱۳۹۳). حساسیت مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM به داده‌های بازتحلیل‌شده در مناطق خشک، دو فصل‌نامه علمی- پژوهشی خشک بوم، ۴(۲): ۱۱-۲۷.
- آروین، ع.؛ قانقرمه، ع.؛ حاجی پور، د.؛ حیدری، م. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات برخی عناصر اقلیمی در استان چهارمحال و بختیاری، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶(۴۱): ۱۵۳-۱۷۶.
- آقاخانی افشار، ا.؛ حسن‌زاده، ی.؛ بسالت‌پور، ع. و پوررضا بیلندی، م. (۱۳۹۵). ارزیابی سالیانه مؤلفه‌های اقلیمی حوضه آبخیز کشف‌رود در دوره‌های آتی با استفاده از گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۶: ۲۱۷-۲۳۳.
- احمدوند کهریزی، م. و روحانی، ح. (۱۳۹۵). تأثیرات حفاظتی تغییر اقلیم بر اساس ریزمقیاس‌سازی دمای پیش‌بینی‌شده در قرن ۲۱ (مطالعه موردی: دو ایستگاه ارازکوسه و نوده در استان گلستان)، اکوهیدرولوژی، ۳(۴): ۵۹۷-۶۰۹.
- بابائیان، ا. و نجفی نیک، ز. (۱۳۸۶). مدل‌سازی اقلیم ایران در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۳۹، پروژه خاتمه‌یافته پژوهشکده اقلیم‌شناسی، ص ۵-۱۳.
- بابائیان، ا.؛ فهمی‌نژاد، ا.؛ باعقیده، م.؛ کریمیان، م.؛ مدیریان، ر. و بیاتانی، ف. (۱۳۹۶). چشم‌انداز اقلیم حوضه جنوبی دریای خزر تحت شرایط گرمایش جهانی - مطالعه موردی مدل گردش کلی Hadcm3، مخاطرات محیط طبیعی، ۴: ۱۷-۳۴.
- باهک، ب. (۱۳۹۲). بررسی احتمال تغییر اقلیم در استان کرمان با روش من- کندال (مطالعه موردی ایستگاه کرمان)، فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین، ۱۰(۳۹): ۶۵-۷۲.
- رضایی، م.؛ نهتانی، م.؛ آبکار، ع.؛ رضایی، م.؛ میرکازهی ریگی، م. (۱۳۹۳). پیش‌بینی پارامترهای (SDSM) بررسی کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری دمای در دو اقلیم خشک و فراخشک (مطالعه موردی: کرمان و بم)، پژوهش‌نامه مدیریت حوضه آبخیز، ۵(۱۰): ۸۳۶-۸۴۵.
- رضایی زمان، م. و افروزی، ع. (۱۳۹۴). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات و ارائه راهبرد تغییر الگوی کشت (مطالعه موردی: حوضه سیمینه‌رود)، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، ۴(۴): ۵۱-۶۴.
- سلاجقه، ع.؛ رفیعی ساردوئی، ا.؛ مقدم‌نیا، ع.؛ ملکیان، آ.؛ عراقی‌نژاد، ش.؛ خلیقی سیگارودی، ش. و صالح‌پور جم، ا. (۱۳۹۵). پیش‌بینی عنصرهای اقلیمی توسط مدل چندگانه خطی SDSM در دوره آینده بر پایه سناریو A2، مدیریت بیابان، ۷: ۱۲-۲۵.
- خسروانیان، ج.؛ اونق، م.؛ گودرزی، م. و حجازی، س.ا. (۱۳۹۴). کاربرد مدل LARS WG در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی حوضه قره‌سو استان گلستان، جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۳: ۹۳-۱۱۵.
- خورشیددوست، ع.م.؛ صراف، ب.؛ قرمزچشمه، ب. و جعفرزاده، ف. (۱۳۹۶). برآورد و تحلیل مقادیر آبی بارش‌های نواحی خزری با به‌کارگیری مدل‌های گردش عمومی جو، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۷(۴۷): ۲۱۳-۲۲۶.
- صمدی، ز.؛ مساح بوانی، ع. و مهدوی، م. (۱۳۸۶). بررسی تأثیر روش‌های کوچک‌مقیاس‌کردن رگرسیونی بر رژیم سیلاب رودخانه، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب.
- طایی سمیرمی، س.؛ مرادی، ح. و خداقلی، م. (۱۳۹۳). شبیه‌سازی و پیش‌بینی برخی از عنصرهای اقلیمی توسط مدل چندخطی SDSM و مدل‌های گردش عمومی جو (مطالعه موردی: حوضه آبخیز بار نیشابور)، فصل‌نامه انسان و محیط زیست، ۲۸: ۱-۱۵.

- عزیزی آبادی فراهانی، م.؛ بختیاری، ب.؛ قادری، ک. و رضاپور، م. (۱۳۹۵). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر منحنی‌های سختی-مدت-فراوانی خشک‌سالی حوضه آبریز قره‌سو با استفاده از توابع مفصل، *تحقیقات آب و خاک ایران*، ۴۷(۴): 754-743.
- علیزاده پهلوان، ح. و زهرایی، ب. (۱۳۹۳). ریزمقیاس‌نمایی آماری بارش با هدف ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رویدادهای حدی در نواحی شهری، *نخستین همایش و جشنواره تغییر اقلیم و راهی به سوی آینده پایدار*، سازمان محیط زیست.
- علیجانی، ب.؛ محمودی، پ. و چوگان، ع. (۱۳۹۱). بررسی روند تغییرات بارش‌های سالانه و فصلی ایران با استفاده از روش ناپارامتریک برآوردکننده شیب سن، *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۳(۹): ۲۳-۴۲.
- عجم‌زاده، ع. و ملائی‌نیا، م. (۱۳۹۵). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه فیروزآباد استان فارس با ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش جوی به‌وسیله نرم‌افزارهای SDSM و LARS-WG، *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۲(۱): ۹۵-۱۰۲.
- قاسمی‌فر، ا.؛ علیجانی، ب. و سلیقه، م. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات دما در سواحل جنوبی دریای خزر با استفاده از سه مدل LARSWG، SDSM، و مدل شبکه عصبی مصنوعی، *فصل‌نامه جغرافیای طبیعی*، ۹(۴۳): ۲۳-۴۱.
- کوهی، م.؛ موسوی بایگی، م.؛ فریدحسینی، ع.؛ ثنائی‌نژاد، س.ح. و جباری نوقابی، ه. (۱۳۹۱). ریزمقیاس‌نمایی آماری و ارائه سناریوهای آبی رویدادهای حدی بار در حوضه کشف‌رود، *نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۳(۱۲): ۵۳.
- Aghakhani Afshar, A.; Hassanzadeh, Y.; Besalatpour, A. and Pourreza Bilondi, M. (2016). Seasonal Changes of Precipitation and Temperature of Mountainous Watersheds in Future Periods with Approach of Fifth Report of Intergovernmental Panel on Climate Change (Case study: Kashafrood Watershed Basin), *Journal of Water and Soil*, 30(5): 217-233.
- Ahmadvand Kahrizi, M. and Rouhani, H. (2016). Assessing the conservation impacts of climate change based on temperature projected on 21 century (Case study: Arazkoseh and Nodeh stations), *Iranian journal of Ecohydrology*, 3(4): 597-609.
- Ajmezadeh, A. and Mullaei Niya, M. (2016). Assessment of Impact of Climate Change on Firoozabad River Runoff with Downscaling of Atmospheric Circulation Models Output by SDSM and LARS-WG Softwares, *Iran Water Resources Research*, 12(1): 95-102.
- Alijani, B.; Mahmoudi, P. and Choghane, A. (2012). Investigation of annual and seasonal rainfall variations in Iran using nonparametric method "Sense slope estimator", *Climate research*, 10(9): 42-23.
- Alizadeh Pahlavan, H. and Zohrai, B. (2014). The statistical method of rainfall measurement with the aim of assessing the effects of climate change on extreme events in urban areas, *The first conference and festival of climate change and a way towards a sustainable future*, The environmental organization.
- Arora, V.K.; Scinocca, J.F.; Boer, G.J.; Christian, J.R.; Denman, K.L.; Flato, G.M.; Kharin, V. V.; Lee, W.G. and Merryfield, W.J. (2011). Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, 38(5): 1-6.
- Artlert, K.; Chaleeraktragoon, Ch. and Nguyen, V. (2013). Modeling and analysis of rainfall processes in the context of climate change for Mekong, Chi, and Mun River Basins (Thailand), *Hydro-environment Research*, 7(1): 2-17.
- Arvin, A.; Ghangherme, A.; Hajipour, D. and Hidari, M. (2016). Investigating the Trend of Changes in some Climatic Elements in Chaharmahal and Bakhtiari Province, *Researches in Geographical Sciences*, 16(41): 153-176.

- Azizi Abadi Farahani, M.; Bakhtiari, B.; Ghaderi, K. and Rezapur, M. (2016). The Survey of Climate Change Impact on Drought Severity- Duration- Frequency Curves Using Copulas, *Iranian Journal of Water and Soil Research*, 47(4): 743-754.
- Babaeian, A.; Fahimi Nejad, A.; Baqideh, M.; Karimian, M.; Managers, R. and Bayatani, F. (1396). Climate Perspective of the Southern Caspian Basin under Global Warming Conditions - A Case Study of the Hadcm3 Overall Circulation Model. *Natural Environment Hazards*. No. 4, pp. 17-17.
- Babaeian, A. and Najafi Nik, Z. (1386). *Climate modeling in Iran during the period from 2010 to 2039*, The completed project of the Institute of Climatology, pp. 5-13.
- Bahak, B. (1392). Investigating the likelihood of climate change in Kerman province using the Mann-Kendall method (A case study of Kerman station), *Geographical Quarterly of the Territory*, Year 10, No. 39. pp. 72-65.
- Fung, F.; Lopez, A. and New, M. (2011). Modeling the impact of climate change on water resources, *Wiley-Blackwell*, N, ISBN: 9781405196710. PP. 43-62.
- Ghasemifar, A.; Alijani, B. and Salighe, M. (2016). Investigation of Climate Change on the Southern Coastal of the Caspian Sea Using SDSM, LARS-WG and Artificial Neural Network, *Journal of Physical Geography*, 10(43): 23-41.
- Intergovernment Panel on Climate Change (2007). Impact, adaption and Vulnerability of Climate Change, *Contribution of working group II to the Fourth Assessment report*, Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Intergovernment Panel on Climate Change (2013). The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Janabkar, A.; Habibnezhad, M.; Suleymani, K. and Naghavi, H. (2015). Sensitivity of the Statistical Downscaling Model (SDSM) to reanalysis data in arid areas, *Aride Biome*, 4(2): 11-27.
- Kendall, M.G. (1975). *Rank Correlation Methods*, Griffin, London.
- Khan, M.S.; Coulibaly, P. and Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods, *Journal of Hydrology*, 6: 357-382.
- Khorshid Dost, M.; Saraf, B.; Redfront, B. and Jafarzadeh, F. (2017). Estimation and Analysis of Caspian Region's Future Rainfalls by Using General Atmospheric Circulation Models, *Journal of Applied Geosciences Research*, 17(47): 213- 226.
- Khosraviyan, J.; Avagh, M.; Goodarzi, M. and Hejazi, SA. (2015). Application of the LARS WG Model in Forecasting of Meteorological Parameters of Gharehoo Basin of Golestan Province, *Geography and Planning*, 53: 93-115.
- Kohoi, M.; Mousavi Bayga, M.; Farideh Hosseini, A.; Sanaei Nejad, S.H. and Jabari Novuchebe, E. (2012). Tattistical Downscaling of Extremes of precipitation and construction of their future scenarios in the Kashfroud Basin, *Journal of Climate Research*, 3(12): 35-53.
- Kundu, S.; Khare, D. and Mondal, A. (2017). Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance, *Ecological Engineering*, eBook ISBN: 9780080532233 PP. 42-57.
- Liu, L.; Liu, Z.; Ren, X.; Fischer, T. and Xu, Y. (2011). Hydrological impacts of climate change in the Yellow River Basin for the 21st century using hydrological model and statistical downscaling model, *Quaternary International*, 5: 211-220.
- Liu, Z.; Xu, Z.; Charles, S.P.; Fu, G. and Liu, L. (2011). Evaluation of two statistical downscaling models for daily precipitation over an arid basin in China, *International Journal of Climatology*, 3: 2006-2020.

- Lopes, P.M.D.A.G. (2008). Assessment of climate change statistical downscaling methods: Application and comparison of two statistical methods to a single site in Lisbon (Doctoral dissertation, FCT-UNL).
- Mahmood, R. and Babel, M.S. (2014). Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin, *Weather and Climate Extremes*, 1: 56-66.
- Mondal, A.; Khare, D. and Kundu, S. (2016). Change in rainfall erosivity in the past and future due to climate change in the central part of India, *International Soil and Water Conservation Research*, 4: 186-194.
- Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D. and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *J. Amer. Soc. Agric. Biol. Engin.*, 50(3): 885-900.
- Qian, B.; Gameda, S.; Hayhoe, H.; De Jong, R. and Bootsma, A. (2004). Comparison of LARS-WG and AAFC-WG Stochastic Weather Generators for Diverse Canadian climates, *Climate Research*, 26(3): 175-191.
- Rezaei Zaman, M. and Afroozi, A. (2015). Evaluation of the climate change impacts on the crop yields and proposing the changing cropping pattern strategy (case study: Simineh Rood basin), *Journal of Water and Soil Conservation*, 4(4): 51-64.
- Rezaei, M.; Nectani, M.; Abkar, A.; Rezaei M. and Mirkazei Rigi, M. (2014). SDSM (Parameters Forecasting) An Analysis of the Effectiveness of Exponential Temperature Exponential Scale in Two Dry and Quaternary Climates (Case Study: Kerman and Bam), *Journal of Water Management*, 28(4): 36-845.
- Salajeghe, A.; Rafiei Sardouei, A.; Moghadamnia, A.; Malekian, A.; Araghinejad, S.; Khalighi Sigarodi, S. and Salehpour Jam, A. (2016). Forecasting climatic variables by SDSM multiple linear model in the upcoming period based on scenario A2, *Desert management*, 7: 12-25.
- Samadi, S.; Ehteramian, K. and Sarraf, B.S. (2011). SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 3: 741-749.
- Samadi, Z.; Mas'ban Bouani, A. and Mahdavi, M. (2007). Investigating the Effect of Small Regression Scale Methods on River Flooding, *Technical Workshop on Climate Change Impacts on Water Resources Management*.
- Tao, X.E.; Chen, H.; Xu, C.Y.; Hou, Y.K. and Jie, M.X. (2015). Analysis and prediction of reference evapotranspiration with climate change in Xiangjiang River Basin, China, *Water Science and Engineering*, 4: 273-281.
- Tayyi Semiromi, S.; Moradi, H. and Khodgoli, M. (2014). Simulation and prediction some of climate variable by using multi line SDSM and Global Circulation Models (Case study: Bar Watershed Nayshabour), *Journal of Human and Environment*, 28: 1-15.
- Wilby, R.L.; Dawson, C.W. and Barrow, E.M. (2002). SDSM—a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, 6: 145-157.
- Xu, C.H. and Xu, Y. (2012). The Projection of Temperature and Precipitation over China under RCP Scenarios using a CMIP5 Multi-Model Ensemble, *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 5(6): 527-533.