

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه هواشناسی یزد

حسن فتحی‌زاد^{۱*}، محسن توکلی^۲، محمدعلی حکیم‌زاده اردکانی^۱، روح‌اله تقی‌زاده مهرجردی^۳،
حمید سودایی‌زاده^۱

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۹/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۳/۲۴)

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی روند تغییرات سالانه فراسنج‌های هواشناسی ایستگاه یزد شامل حداقل و حداکثر میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش (۲۰۰۵-۱۹۶۱) و همچنین میانگین سالانه پیش‌بینی شده این فراسنج‌ها در سه دوره سی ساله آینده ۲۰۴۰، ۲۰۷۰ و ۲۱۰۰ توسط مدل SDSM تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5، A2 و B2 است. در این پژوهش، با استفاده از ضریب تعیین و شاخص‌های MAE، RMSE، R2 اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل SDSM در مقایسه با داده‌های مشاهده شده موجود در دوره پایه شده است. کمترین مقدار R2 در واسنجی و اعتبارسنجی بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده SRES، مربوط به بارش (۰/۸۶ و ۰/۸۰ درصد) به‌دست آمد. در مرحله بعد از داده‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس HadCM3 تحت سناریوهای RCP2.6 مختلف برای پیش‌بینی دوره‌های آتی (۲۰۱۰-۲۱۰۰) مورد استفاده قرار گرفت. بیشترین کاهش بارش نسبت به دوره پایه مربوط به سناریوی RCP2.6 (۰/۳۵ - میلی‌متر در روز در فوریه)، بیشترین افزایش دمای حداکثر نسبت به دوره پایه، در دوره ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد در ماه اوت) و بیشترین افزایش دمای حداقل نسبت به دوره پایه، در دوره ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۱۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد در ماه اوت) است. نتایج به‌دست آمده حاکی از افزایش دما در تمام ماه‌ها و فصول سال و کاهش بارندگی در اکثر آنها است که این مسئله مؤید این مطلب است که در منطقه مورد مطالعه، اقلیم در حال تغییر است.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، HadCM3، SDSM، یزد، ایران

۱. گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

۲. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ایلام

۳. گروه خاکشناسی، دانشکده کشاورزی، منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه اردکان

*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: H.fathizad@stu.yazd.ac.ir

مقدمه

امروزه موضوع تغییر اقلیم به دلیل پیامدهای زیست محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی، به یکی از مباحث مهم تبدیل شده و علاقه‌مندی فراوانی برای آشکارسازی نمودهای مختلف تغییر اقلیم و تحلیل علمی آن در بین پژوهشگران ایجاد شده است (۲۳ و ۳۱). فرایند تغییر اقلیم به‌ویژه برای دما و بارندگی مهم‌ترین مبحث مطرح در قلمرو علوم محیطی است (۳). اثرات تغییر اقلیم در مناطق مختلف جهان، نشان‌دهنده روندها و تغییرپذیری طولانی مدت در پارامترهای آب و هوایی مانند بارش و دما است (۱۶). در بلندمدت، روند گرم شدن کره زمین به‌خصوص در مناطق نیمه‌خشک افزایش یافته است (۱۱ و ۱۳). به دلیل افزایش تبخیر و کاهش بارش، خشکسالی‌ها در مدت زمان طولانی و شدیدتر در مناطقی که تحت تأثیر خشکسالی هستند، می‌توانند اثرگذار باشند. به دلیل گرمایش جهانی، روند خشک شدن در مناطق نیمه‌خشک و خشک به شدت افزایش می‌یابد و منجر به تشدید چرخه هیدرولوژیکی می‌شود و مناطق مرطوب از لحاظ اقلیمی خشک‌تر می‌شوند (۷، ۱۰ و ۲۵).

در دهه‌های اخیر، ارزیابی مؤلفه‌های اقلیمی در دوره‌های آتی توسط مدل‌های جهانی اقلیم صورت پذیرفته است (۱۲). روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آنها استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو یا GCM (General Circulation Model) است که در مطالعات مختلف به‌کار گرفته شده است (۱۹ و ۲۶).

تحقیقات نشان داده است که مدل‌های گردش عمومی جو زمین، تغییرات متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش را در بعد زمان و مکان در مقیاس جهانی به‌خوبی پیش‌بینی می‌کنند (۱۷). یکی از دغدغه‌های اصلی استفاده از این مدل‌ها نبود دقت کافی در تفکیک مکانی آنهاست که برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در مقیاس محلی و منطقه‌ای مناسب نیستند. این مدل‌ها، در واقع اثر عوارض محلی مانند توپوگرافی، پوشش گیاهی و غیره را در

شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دخالت نمی‌دهند (۲۴ و ۳۱). به منظور رفع این محدودیت روش‌های مختلفی ارائه شده است، که به مجموع آنها روش‌های ریزمقیاس‌نمایی گفته می‌شود. اساس کار همه این روش‌ها بر پایه روابط بین متغیرهای مستقل (خروجی مدل جهانی) و متغیرهای وابسته زمینی مانند مقدار دما، بارش و غیره در سطح زمین (آمار یک ایستگاه هواشناسی) استوار است.

در یک تقسیم‌بندی کلی این روش‌ها در چهار گروه دینامیکی، همدیدی، آماری و تابع انتقالی طبقه‌بندی می‌شوند. در روش‌های دینامیکی و همدیدی یک شبکه بزرگ مدل گردش عمومی به شبکه‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. سپس با دخالت دادن شرایط محلی و منطقه‌ای در شبکه کوچک‌تر متغیرهای اقلیمی مورد نظر شبیه‌سازی می‌شوند. این روش‌ها نیاز به کارشناسان با تجربه، سیستم‌های کامپیوتری پیشرفته و نرم‌افزارهای تخصصی دارند که استفاده از آنها را با محدودیت روبه‌رو می‌کند. مدل‌های آماری و تابع انتقالی بر خلاف روش‌های دینامیکی و همدیدی کاربرد بیشتری دارند (۳۴). چرا که نیازی به تجهیزات پیشرفته ندارند و با تعداد محدودی مؤلفه، امکان پیش‌بینی به‌نسبت دقیق متغیرهای اقلیمی را فراهم می‌کنند. روش‌های آماری با استفاده از ویژگی توزیع‌های آماری به ویژه سری‌های زمانی، متغیرهای اقلیمی مورد نظر را شبیه‌سازی می‌کنند. روش‌های تابع انتقالی برحسب اینکه بر پایه روابط آماری یا ریاضی استوار باشند، به دو دسته مدل‌های آماری و مدل‌های ریاضی تقسیم‌بندی می‌شوند.

مدل SDSM (Statistical Downscaling Model) یکی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی تابع انتقالی آماری به‌شمار می‌آید (۳۲) که به‌عنوان پرکاربردترین مدل ریزمقیاس‌نمایی در سطح جهان شناخته شده است (۸). مقایسه این مدل با سایر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری نشان می‌دهد که این مدل برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی از توانایی لازم برخوردار است (۹ و ۱۵). تاکنون از مدل SDSM در موارد زیادی برای ریزمقیاس‌نمایی در مطالعات مختلفی استفاده شده است (۱ و ۲).

عمده در درجه حرارت، سطح دریا و یا ذوب شدن یخ شود. سناریوهای RCPs (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5) در سال ۲۰۱۰ توسط یک کمیته علمی و زیر نظر هیئت بین دولت تغییرات اقلیمی با هدف مهیا کردن مجموعه‌ای از اطلاعاتی که از نتایج آن بتوان عوامل اصلی تغییرات اقلیمی را ردیابی و نتایج آن را برای مدل‌های اقلیمی اعمال کرد، ایجاد شده‌اند. مدل‌های اقلیمی از نتایج این سناریوها برای نشان دادن غلظت و انتشار گازهای گلخانه‌ای و میزان آلودگی‌ها و تغییرات کاربری اراضی استفاده می‌کنند.

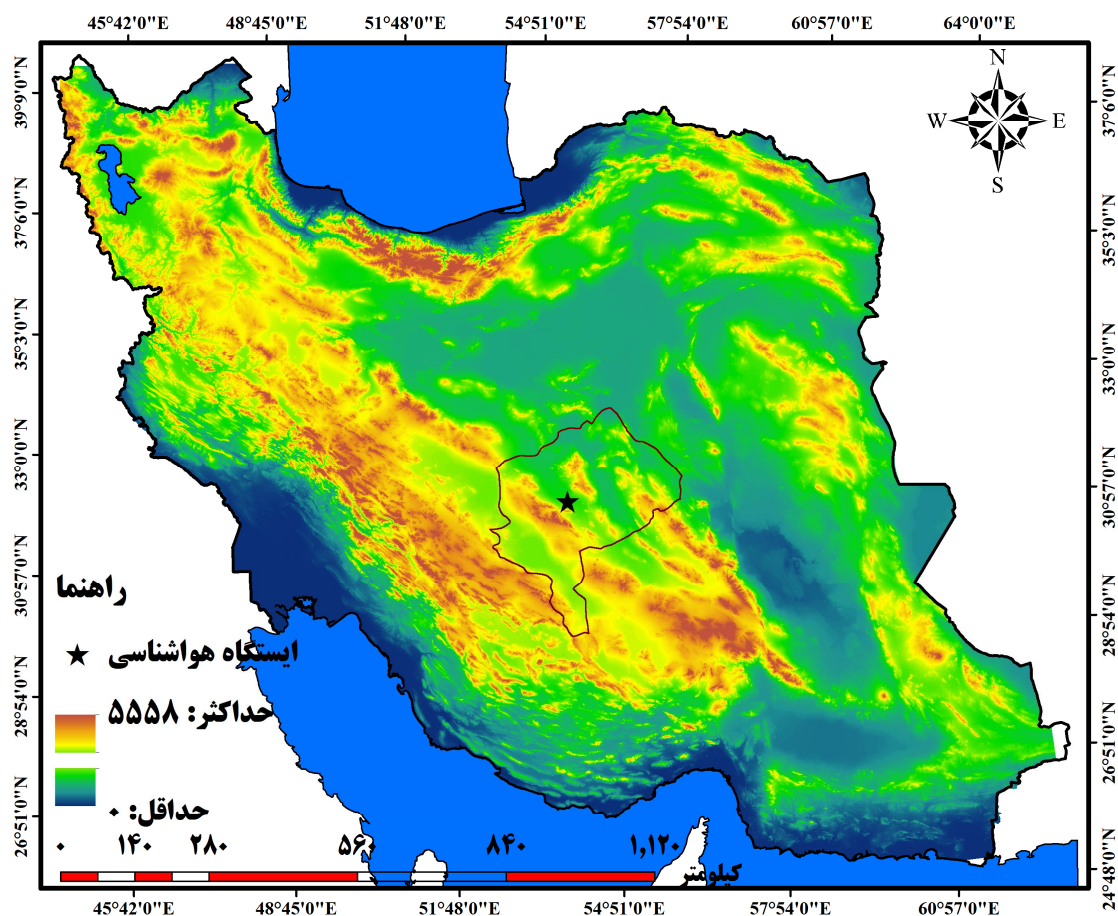
این سناریوها بر اساس نتایج حاصل از برخی فراسنج‌های اجتماعی-اقتصادی، تکنولوژیکی و همچنین میزان غلظت برخی گازها برای دهه‌های آینده طراحی شده‌اند. در سناریوی RCP2.6، که کمترین است، کل واداشت تابشی تا سال ۲۰۵۰ به اوج خود یعنی ۳ وات بر مترمربع خواهد رسید و بعد از آن روند کاهشی را دنبال می‌کند. سناریوی RCP4.5، که یک سناریوی ثابت با افزایش نیروی واداشت تابشی کل تا سال ۲۰۷۰ و با غلظت‌های پایدار بعد از آن است. در سناریوی RCP8.5، میزان غلظت CO₂ تا سال ۲۱۰۰، ۱۳۷۰ ppm تخمین زده شده است و اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت‌های تابشی را تا ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده است (۳۰ و ۳۵).

در مدل‌های گزارش ارزیابی چهارم (SRES) سناریوها مقادیر گازهای گلخانه‌ای با نرخ ثابت تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. هر کدام از این سناریوها مربوط به یکی از خانواده‌های B2، A2، B1، A1 هستند. سناریوی A2 از نوع منطقه‌ای است که شرایط اقتصادی را بیشتر مد نظر دارد. سناریوی B2 نیز همانند سناریوی A2 منطقه‌ای است که به امر حفظ محیط زیست توجه بیشتری دارد (۲۹).

ایران در منطقه خشک و نیمه‌خشک واقع شده و بیشتر توسط بارندگی کم و درجه حرارت بالا شناخته شده است. ناهنجاری‌ها در درجه حرارت و بارش در ایران نقش مهمی در صنعت کشاورزی و توسعه سریع کشور ایفا می‌کند. رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و توسعه سریع اقتصادی

مدل‌های GCM به‌عنوان مدل‌های عددی که فرایندهای فیزیکی جو را نشان می‌دهند، می‌توانند اقلیم حاضر را شبیه‌سازی و شرایط اقلیم آینده را تحت سناریوهای مختلف، تصویرسازی کنند. نسل جدیدی از مدل‌های گردش عمومی که در تهیه گزارش ارزیابی پنجم IPCC استفاده شد، تحت عنوان پروژه درون مقایسه‌ای مدل‌های جفت شده (CMIP5) شناخته شده است. مجموعه‌ای از آزمایش‌ها شامل شبیه‌سازی‌های قرن بیستم و پروژه‌های اقلیمی قرن ۲۱ تحت سناریوهای جدید انتشار با عنوان نماینده خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) مدل‌های گزارش پنجم را تشکیل می‌دهند (۲۰). در این گزارش نشان داده شده که خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای، مسیرهای انتشار را بر اساس تصمیمات سیاسی متفاوت فرض شده‌ای که بر تحولات زمانی انتشار آتی گازهای گلخانه‌ای، ذرات معلق در هوا، اوزون، کاربری اراضی و تغییرات پوشش زمین تأثیر می‌گذارد، تولید می‌کند (۲۰). اکثر مطالعات پیشین در رابطه با بررسی پدیده تغییر اقلیم، بیشتر بر اساس مدل‌های گزارش چهارم IPCC انجام پذیرفته است (۱۴، ۱۸ و ۳۶). درحالی که به‌تازگی بیشتر پژوهشگران در سرتاسر جهان با استفاده از گزارش ارزیابی پنجم به بررسی تغییرات اقلیم تحت سناریوهای جدید انتشار در مناطق مختلف پرداخته‌اند (۴)، چهار سناریوی RCPs (۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶)، بر اساس سناریوهای انتشار گازهایی که در مقالات منتشر شده‌اند انتخاب شدند. این سناریوها اساس مشخصات متفاوت سطح تکنولوژی، وضعیت اجتماعی و اقتصادی، خط مشی‌ها در آینده است که در هر شرایطی می‌تواند منجر به سطح انتشار متفاوت گازهای گلخانه‌ای و تغییرات اقلیمی شوند. در هر نسخه از این سناریوها، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای بر اساس نقش آن بر سطح واداشت‌های تابشی به چهار دسته ۸/۵، ۶، ۴/۵ و ۲/۶ (W/m²) تا پایان قرن ۲۱، طبقه‌بندی شده‌اند (۵).

گزارش پنجمین IPCC شامل چندین نوآوری از نظر روش شناسی است که کارشناسان هواشناسی فرض کرده‌اند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند منجر به تغییرات



شکل ۱. موقعیت ایستگاه هواشناسی یزد در کشور ایران و استان یزد

در ایستگاه یزد است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه یزد در موقعیت جغرافیایی $31^{\circ} 52' 52.10'' N$ و $31^{\circ} 52' 52.10'' N$ در ارتفاع ۱۲۳۶ متری از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱). یزد دارای اقلیم گرم و خشک و بیابانی است و نوسان دما در تابستان و زمستان و حتی در شب و روز بالا و متغیر است و این از ویژگی‌های آب و هوایی منطقه به‌شمار می‌رود. یزد دارای دو فصل بلند گرما (از اسفند تا مهر) و کوتاه سرما (از آبان تا اواخر بهمن) است. خشکی اقلیمی استان یزد دو علت اساسی و عمده دارد: یکی اینکه روی کمربند خشک جهانی

نشان می‌دهد که ایران با چالش‌های گسترده‌ای در منابع آب قابل دسترس در حال حاضر و به‌ویژه در آینده مواجه خواهد بود. استان یزد به دلیل واقع شدن در منطقه خشک و رشد قابل ملاحظه جمعیت و صنعت، از نظر منابع آبی بسیار مورد توجه برنامه‌ریزان بوده است. بنابراین به نظر می‌رسد که مطالعه تغییر اقلیم در این منطقه توسط مدل‌های اقلیمی با وضوح بالا و به ویژه توسط مدل‌های گزارش پنجم و تحت سناریوهای جدید انتشار امری ضروری به نظر می‌رسد. به طوری که مدل‌های فوق می‌توانند درک بهتری از این مناطق در دوره‌های زمانی آتی نسبت به مدل‌های پیشین هیأت بین الدول تغییر اقلیم (گزارش سوم و چهارم) برای مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب فراهم کنند. بنابراین هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی تغییرات اقلیم تحت سناریوهای جدیدی برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی

های مشخص است. این مدل‌ها، ابزاری مناسب و توانا برای مطالعه و ارزیابی خطرات تغییرات اقلیمی مانند وقوع دوره‌های خشک، بارش‌های رگباری و سیل‌آسا و ... هستند. این مدل‌ها همچنین با استفاده از سناریوهای تأیید شده هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، می‌توانند اقلیم حاضر را شبیه‌سازی و شرایط اقلیم آینده را تحت سناریوهای مختلف، تصویرسازی کنند. مدل‌های گردش عمومی جو، قابل استفاده در مقیاس‌های کوچک‌تر نیستند، لذا نیازمند به ریزمقیاس نمایی هستند.

مدل SDSM

مدل SDSM مدلی کوچک‌مقیاس کننده آماری است و قابلیت توسعه سریع و کم‌هزینه داده‌های کوچک‌مقیاس شده در مقیاس ایستگاهی به صورت روزانه، ماهانه، فصلی و یا سالیانه را دارا است (۳۴). مدل مذکور از نوع مدل‌های تابع انتقالی است که در واقع بهترین ترکیب از مدل‌های رگرسیونی و مدل‌های آماری به حساب می‌آید (۳۲). بررسی‌ها نشان می‌دهد این مدل نسبت به سایر مدل‌های ریزمقیاس نمایی نتایج رضایت‌بخشی در شبیه سازی ارائه کرده است (۸). این مدل قادر است در هر مرحله اجرا بین ۱ تا ۱۰۰ بار داده‌ها را شبیه‌سازی کند (۳۳).

برای آماده‌سازی داده‌ها در مدل SDSM هر یک از ۲۶ فایل داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP نیز همانند داده‌های مشاهده شده برای انجام واسنجی مدل به دو دوره (۱۹۶۱-۱۹۹۲) و (۱۹۹۰-۱۹۹۱) و برای اعتبارسنجی به دو دوره (۱۹۹۳-۲۰۰۵) و (۱۹۹۱-۲۰۰۱) تفکیک شد. هر یک از ۲۶ فایل داده‌های بزرگ مقیاس (RCP 8.5, H3B2a (1961-2099), H3A2a (1961-2099), RCP 2.6 (2006-2100), RCP 4.5 (2006-2100) و RCP 8.5 (2006-2100) برای مرحله پیش‌بینی به سه دوره 2070s, 2040s و 2100s تفکیک شدند و دوره ۱۹۹۰-۱۹۶۱ به عنوان دوره پایه در نظر گرفته شد.

انتخاب متغیرهای مستقل برای پیش‌بینی متغیرهای وابسته

اساس کار مدل‌های ریزمقیاس آماری تابع انتقالی مانند مدل

قرار دارد و دیگر آنکه از دریا‌های آزاد عمان و خلیج فارس و دریاچه‌های داخلی و بادهای رطوبت‌زای دریایی دور است. عامل مهم اعتدال نسبی آب و هوای یزد، که قابلیت زیست به نسبت مناسبی به آن بخشیده است، ارتفاعاتی است که بیشتر به صورت موضعی مؤثر هستند و این امر باعث شده است مناطقی که در ارتفاعات بیش از ۲۵۰۰ متر قرار دارند از اعتدال و رطوبت بیشتری نسبت به دشت‌های یزد و اردکان برخوردار باشند.

روش تحقیق

برای بررسی روند تغییرات سالانه فراسنج‌های هواشناسی ایستگاه یزد، حداقل، حداکثر، میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش (۲۰۰۵-۱۹۶۱) از اداره کل هواشناسی استان یزد اخذ شد. از طرف دیگر داده‌های پیش‌بینی کننده برای منطقه مورد مطالعه از سایت‌های اینترنتی مربوطه برای دوره‌های گذشته تا پایان قرن جاری دریافت شد. به منظور آماده‌سازی داده‌ها در مدل SDSM سه نوع داده شامل داده‌های مشاهداتی، داده‌های واکاوی شده در دوره مشابه گذشته (NCEP) برای واسنجی (۱۹۹۲-۱۹۶۱) و (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و اعتبارسنجی (۲۰۰۵-۱۹۹۳) و (۲۰۰۱-۱۹۹۱) و داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس HadCM3 و ریزمقیاس نمایی SDSM تحت سناریوهای RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, A2 و B2 برای پیش‌بینی دوره های آتی (۲۰۱۰-۲۰۱۰۰) مورد استفاده قرار گرفته است. بازه های زمانی انتخاب شده برای واسنجی و اعتبارسنجی به این دلیل است که داده‌های RCPs از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۵ و داده‌های SRES از سال ۱۹۶۱ تا ۲۰۰۱ هستند. به همین دلیل ۷۰ درصد داده‌ها در مرحله واسنجی و ۳۰ درصد داده‌ها در مرحله اعتبارسنجی استفاده شده‌اند.

مدل‌های گردش عمومی (GCM)

یکی از متداول‌ترین و مناسب‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اقلیم آینده، استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو است. هدف اصلی این مدل‌ها، محاسبه شاخص‌های سه‌بعدی اقلیم در شبکه

جدول ۱. خلاصه‌ای از خصوصیات سناریوهای مورد استفاده در این تحقیق

سناریو	خصوصیات
RCP2.6	واداشت تابشی ناشی از آن است. مطابق این سناریو واداشت تابشی در اواسط این قرن به حدود ۳/۱ رسیده و سپس کاهش یافته و به ۲/۶ وات بر مترمربع در سال ۲۱۰۰ می‌رسد.
RCP4.5	واداشت تابشی ناشی از گازهای گلخانه‌ای قبل از سال ۲۱۰۰ در مقدار ۴/۵ وات بر مترمربع ثابت می‌ماند.
RCP8.5	بدون اتخاذ هیچ گونه سیاست‌های کاهش آثار و مقابله با پیامدهای اقلیم، آب و هوای کره زمین در خط سیر سناریوی انتشار RCP8.5 پیش خواهد رفت. به‌طوری که ادامه این روند منجر به واداشت تابشی به میزان ۸/۵ وات بر متر مربع در سال ۲۱۰۰ می‌شود. در این هنگام غلظت دی‌اکسید کربن به ۱۰۰۰ ppm رسیده و همچنان روند افزایش خواهد داشت.
A2	ناهمگونی در دنیا زیاد، رشد جمعیت زیاد، رشد اقتصادی به‌صورت منطق‌های، توسعه و تغییرات فناوری به‌صورت منطقه‌ای (و نه جهانی)
B2	این سناریو دنیایی را توصیف می‌کند که در آن تأکید بر راه حل‌های محلی برای پایداری محیط زیستی، اقتصادی و اجتماعی است.

سناریوهای تغییر اقلیم

چون پیش‌بینی وضعیت اقلیم مشکل است، راه جایگزین، مشخص کردن وضعیت‌های ممکن آینده بوده که سناریوهای اقلیمی نامیده می‌شوند، اما باید توجه داشت که یک سناریوی اقلیمی، یک پیش‌بینی کننده آب و هوا نیست. در این مطالعه از سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5، A2 و B2 استفاده شده است. در جدول ۱، خلاصه‌ای از سناریوهای RCP و SRES مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.

نتایج

مدل SDSM پس از وارد کردن داده‌های مشاهداتی و مقادیر متناظر NCEP، پارامترهایی که بالاترین تأثیر را بر شبیه‌سازی داشته و واریانس بیشتری را توضیح می‌دهند را انتخاب و مشخص می‌کند (جدول ۲). این مرحله مهم‌ترین مرحله مدلینگ اقلیم است که در آن پارامترهای مؤثر بر اساس تأثیری که بر معادله دارند تعیین می‌شوند.

در این پژوهش، با استفاده از شاخص‌های $RMSE$ ، R^2 ، MAE اقدام به ارزیابی دقت داده‌های شبیه‌سازی شده داده‌های مشاهده شده موجود در دوره پایه شد. نتایج کوچک مقیاس شده حداقل و حداکثر میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش داده‌های

SDSM بر پایه ارتباط بین متغیرهای مستقل جوی و متغیرهای وابسته ایستگاهی نظیر بارش و دما استوار است. در این مورد انتخاب متغیرهای مستقل که ارتباط منطقی و مناسبی با متغیرهای وابسته داشته باشند، از اهمیت خاصی برخوردار است.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

به‌منظور کالیبره کردن مدل SDSM داده‌های مورد استفاده به دو دوره (۱۹۹۰-۱۹۶۱) و (۱۹۹۲-۱۹۶۱) برای واسنجی و دو دوره (۲۰۰۱-۱۹۹۱) و (۲۰۰۵-۱۹۹۳) برای اعتبارسنجی تقسیم شدند. برای کالیبره کردن مدل از روش بهینه‌سازی حداقل مربعات استفاده شد. بعد از کالیبره کردن مدل به‌منظور حصول اطمینان از اینکه مدل توانایی شبیه‌سازی داده‌ها را خارج از محدوده زمانی کالیبراسیون دارد، نیاز است مدل ارزیابی شود. بدین منظور با استفاده از مدل SDSM کالیبره شده، پارامترهای حداقل و حداکثر میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش برای دوره (۲۰۰۱-۱۹۹۱) و (۲۰۰۵-۱۹۹۳) شبیه‌سازی شدند. سپس با مقایسه داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های شبیه‌سازی شده، کارایی مدل برای ایستگاه یزد مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق به‌منظور بررسی میزان کارایی مدل از ضریب تعیین R^2 استفاده شد.

جدول ۲. مهم‌ترین متغیرهای پیش‌بینی کننده ایستگاه مورد مطالعه

RCP (1961-2005)			SRES (1961-2001)			اسم متغیر	متغیر
حداقل درجه	حداکثر درجه	بارش	حداقل درجه	حداکثر درجه	بارش		
حرارت	حرارت		حرارت	حرارت			
					*	Vorticity at 850 hPa height	ncepp8_zas
			*	*	*	Relative humidity at 850 hPa height	ncepr850as
			*	*	*	Near surface relative humidity data	nceprhumas
	*	*			*	Surface specific humidity	ncepshumas
*	*	*				Specific humidity at 500 hPa	ncepp500gl
*		*				500 hPa geopotential height	nceps500gl
		*				Specific humidity at 850 hPa	nceps850gl
			*	*		Mean sea level pressure	ncepmslpas
	*		*	*		500 hPa geopotential height	ncepp500as
*	*		*	*		Mean temperature at 2m	nceptempas
*	*					Mean sea level pressure	ncepmslpgl
						850 hPa geopotential height	ncepp850as
*						500 hPa vorticity	ncepp5_zgl

هوا در این فصل دانست که از نظم خاصی پیروی نمی‌کنند به همین دلیل مدل توانایی لازم برای شبیه‌سازی بارش در این فصل را ندارد. کاهش خطای مدل در فصل تابستان را می‌توان ناشی از نبود بارش دانست که مدل هم توانایی شبیه‌سازی آن را به‌خوبی دارد. نمودار نتایج کوچک‌مقیاس شده حداقل و حداکثر میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش داده‌های RCP و SRES به‌ترتیب در شکل‌های ۲ تا ۷ در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است.

پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی آینده

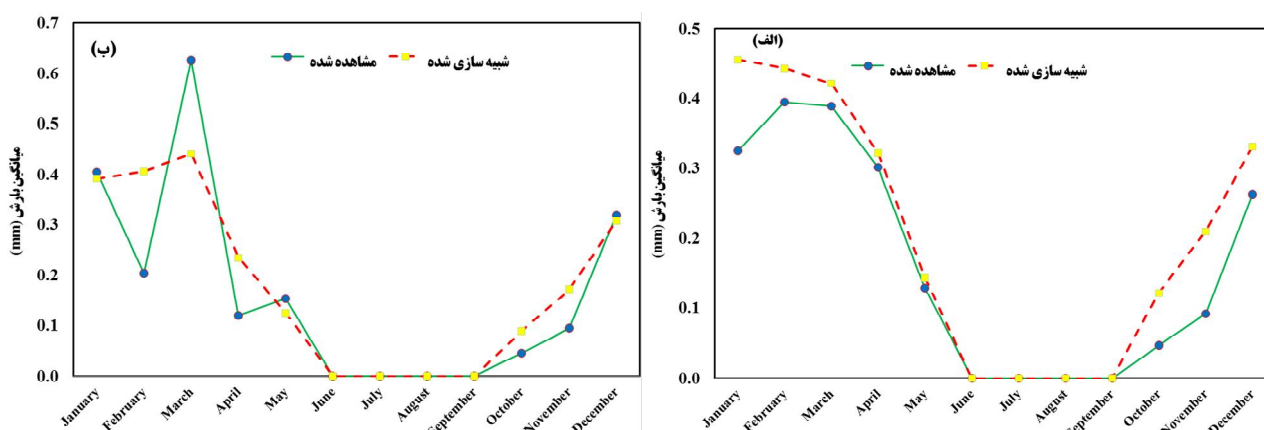
پس از ارزیابی مدل، با توجه به متغیرهای انتخاب شده، سری‌های زمانی پارامترهای اقلیمی تولید شده است. شکل‌های ۸ و ۹ و جدول ۴ مقادیر پیش‌بینی شده میانگین ماهیانه بارش تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف RCPs در مقایسه با دوره پایه را نشان می‌دهد. تحت سناریوی RCP2.6 برای هر سه دوره در ماه‌های آوریل، می و اکتبر شاهد افزایش میزان بارش و در بقیه ماه‌ها کاهش بارش پیش‌بینی شده است. تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 برای هر سه دوره در ماه‌های آوریل، می، اکتبر، نوامبر و دسامبر (به‌جز دوره ۲۰۷۰ که در ماه دسامبر کاهش بارش پیش‌بینی شده) شاهد افزایش میزان بارش و در بقیه ماه‌ها کاهش بارش پیش‌بینی شده است.

RCP و SRES در جدول (۳) در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی ارائه شده است. کمترین مقدار R^2 در واسنجی و اعتبارسنجی بین میانگین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده SRES، مربوط به بارش (۰/۸۶ و ۰/۸۰) بوده است. در ایستگاه یزد مدل‌سازی میانگین دمای حداقل و حداکثر دو دسته داده‌های RCP و SRES کاملاً با داده‌های مشاهداتی مطابقت دارند. از نظر شاخص ارزیابی R^2 ، دقت نتایج کوچک‌مقیاس شده دمای میانگین حداقل و حداکثر بیشتر از دقت میانگین بارش بوده، ولی از نظر شاخص‌های ارزیابی MAE و RMSE، دقت نتایج کوچک‌مقیاس شده میانگین بارش بیشتر از دقت دمای میانگین حداقل و حداکثر بوده است. به‌طور کلی، مطلوب بودن مقادیر شاخص‌های ارزیابی و عدم اختلاف معنی‌دار بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، مؤید کارایی مناسب مدل SDSM برای شبیه‌سازی وضعیت اقلیمی آینده در منطقه مورد مطالعه است.

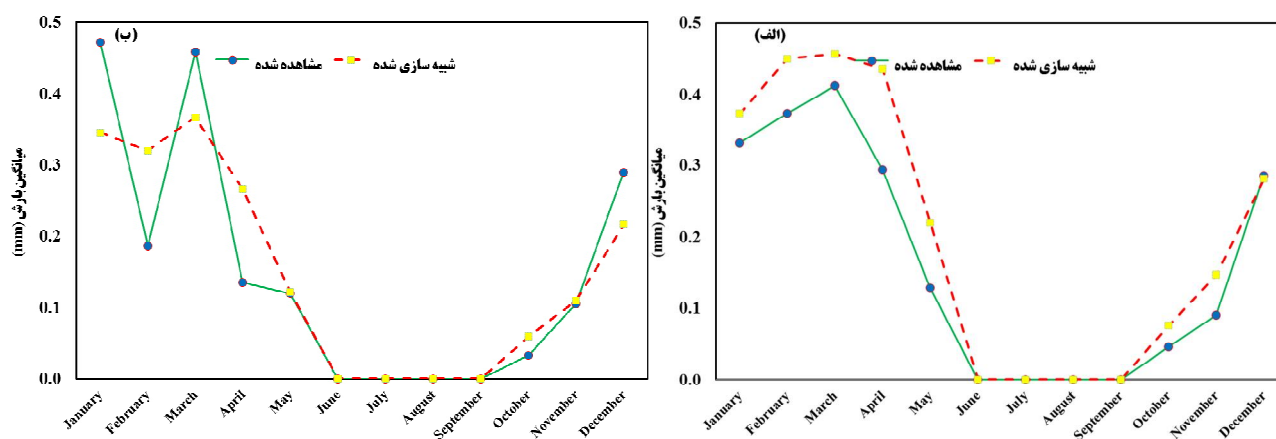
در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی میانگین روزانه بارش، ماه‌های فصل بهار بیشترین خطا و ماه‌های فصل تابستان دارای کمترین خطا هستند. در واقع خطای بالای شبیه‌سازی در فصل بهار را باید ناشی از بارش‌های رگباری و آشفته‌گی‌های آب و

جدول ۳. نتایج آماری شبیه‌سازی حداقل و حداکثر میانگین دمای روزانه و میانگین روزانه بارش

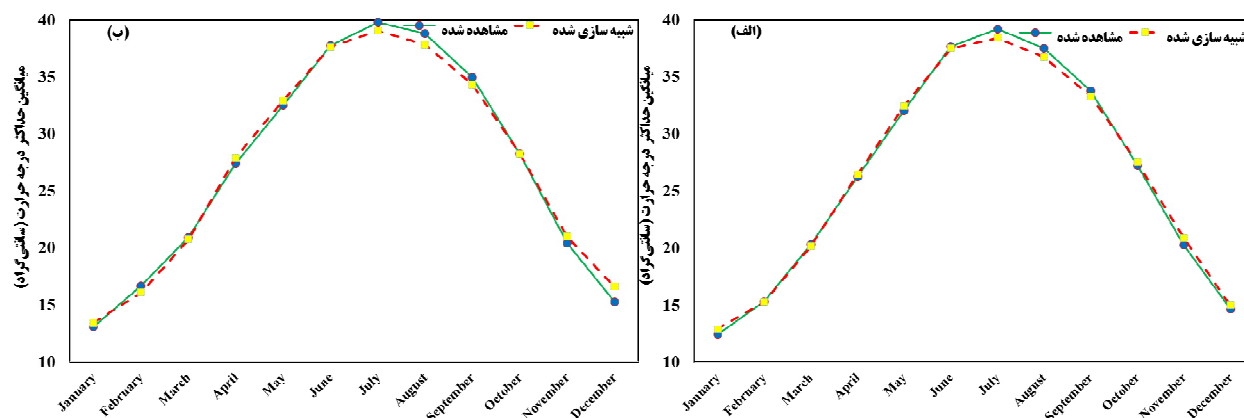
اعتبارسنجی			واسنجی			پارامتر	دوره
RMSE	R ²	MAE	RMSE	R ²	MAE		
۰/۰۷	۰/۸۰	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۸۶	۰/۰۴	بارش	SRES (1961-2001)
۰/۲۶	۰/۹۹	۰/۱۷	۰/۵۲	۰/۹۹	۰/۳۵	حداکثر درجه حرارت	
۱/۰۵	۰/۹۸	۰/۸۸	۰/۵۶	۰/۹۹	۰/۴۱	حداقل درجه حرارت	
۰/۰۳	۰/۹۵	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۹۱	۰/۰۴	بارش	RCP (1961-2005)
۰/۵۹	۰/۹۹	۰/۴۳	۰/۵۰	۰/۹۹	۰/۴۳	حداکثر درجه حرارت	
۰/۸۱	۰/۹۸	۰/۷۱	۱/۰۷	۰/۹۸	۰/۷۶	حداقل درجه حرارت	



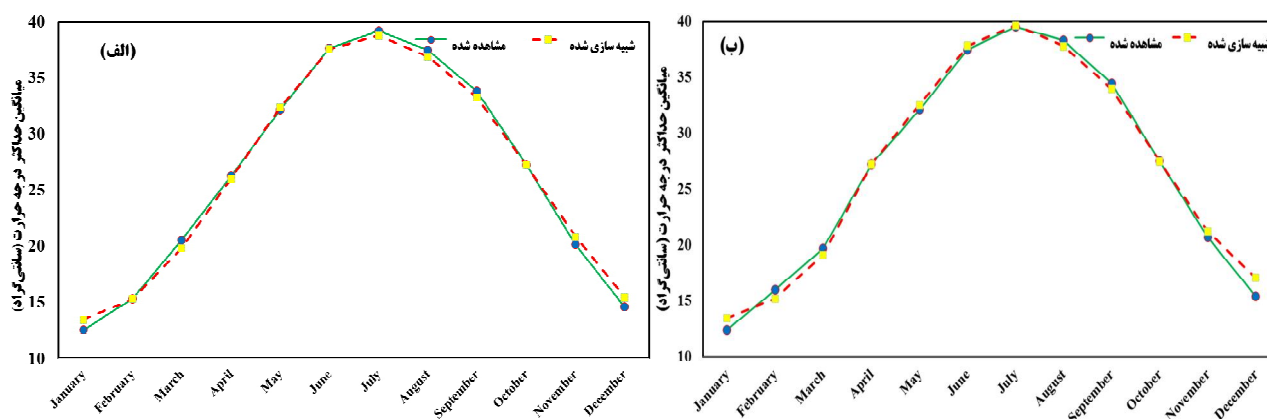
شکل ۲. نمودار مقایسه میانگین روزانه بارش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده: (الف) دوره واسنجی و (ب) اعتبارسنجی سناریوهای SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)



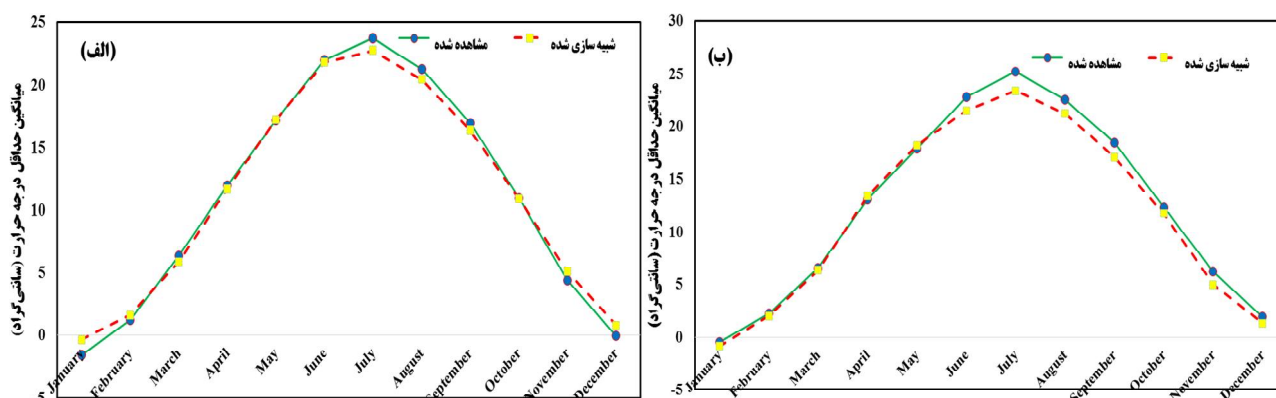
شکل ۳. نمودار مقایسه میانگین روزانه بارش مشاهده شده و شبیه‌سازی شده: (الف) دوره واسنجی و (ب) اعتبارسنجی سناریوهای RCP (رنگی در نسخه الکترونیکی)



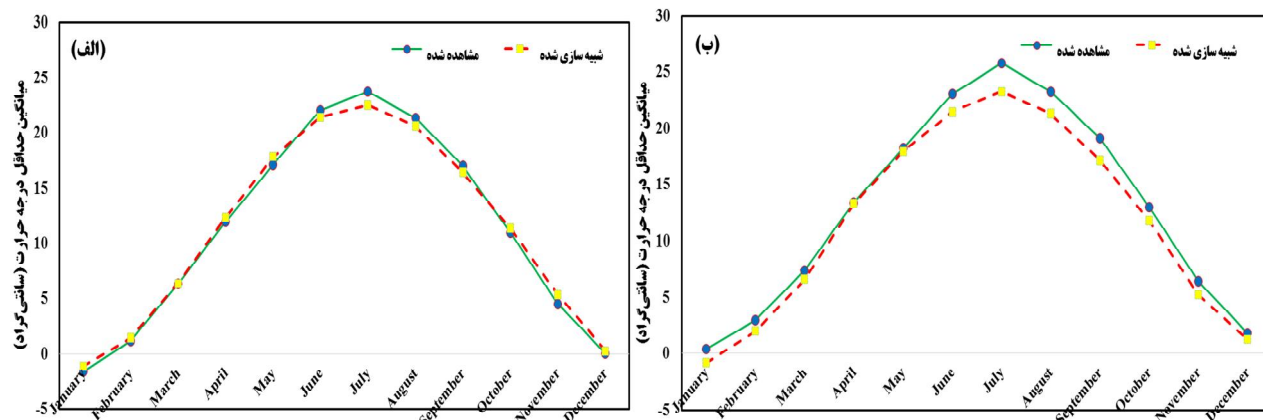
شکل ۴. نمودار مقایسه میانگین روزانه دمای حداکثر مشاهده شده و شبیه سازی شده: الف) واسنجی و ب) اعتبارسنجی سناریوهای SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)



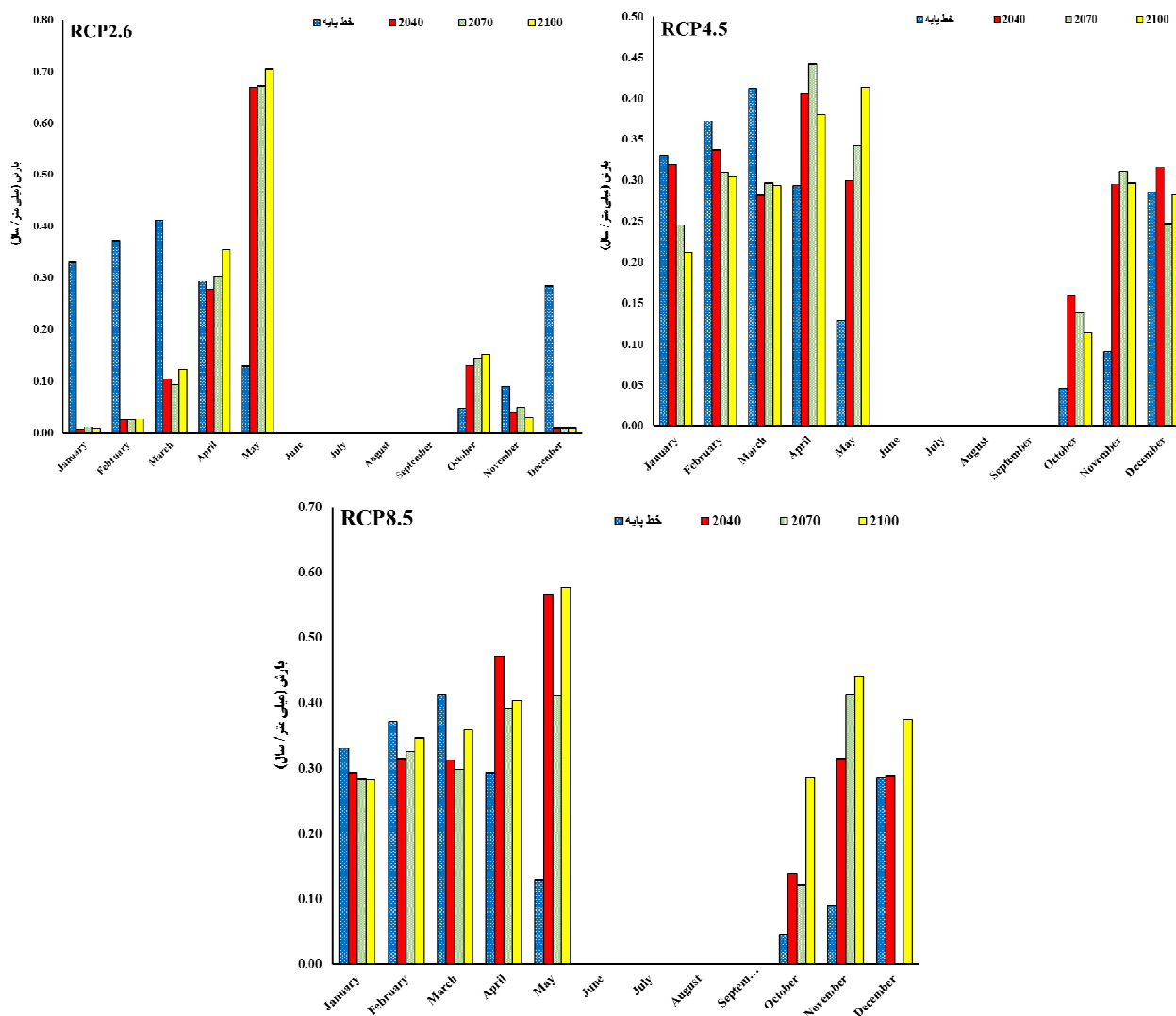
شکل ۵. نمودار مقایسه میانگین روزانه دمای حداکثر مشاهده شده و شبیه سازی شده: الف) دوره واسنجی و ب) اعتبارسنجی سناریوهای RCP (رنگی در نسخه الکترونیکی)



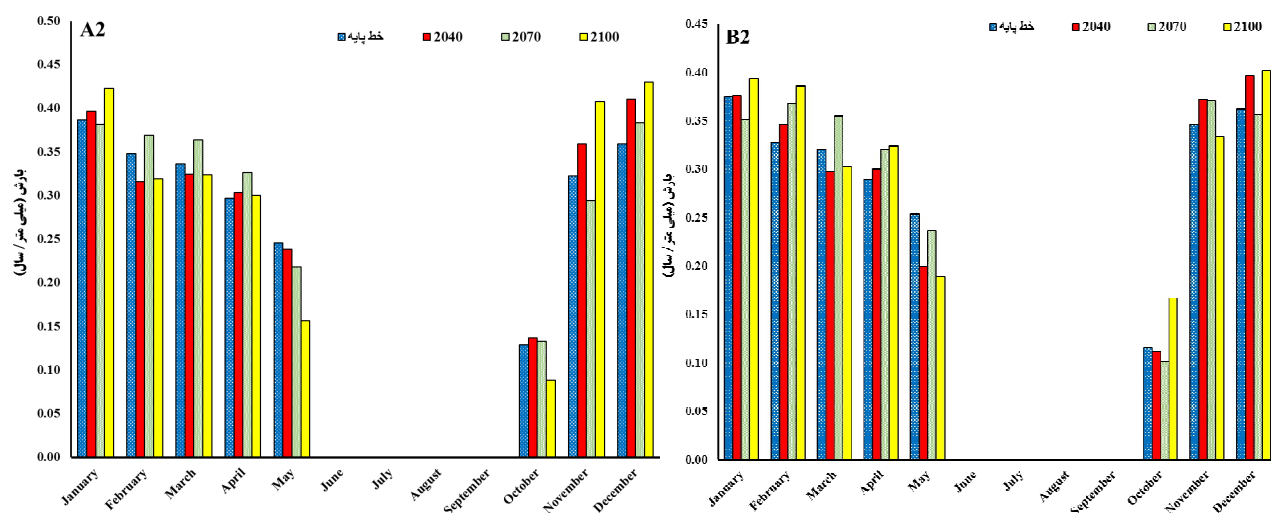
شکل ۶. نمودار مقایسه میانگین روزانه دمای حداقل مشاهده شده و شبیه سازی شده: الف) دوره واسنجی و ب) اعتبارسنجی سناریوهای SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۷. نمودار مقایسه میانگین روزانه دمای حداقل مشاهده شده و شبیه سازی شده: (الف) دوره واسنجی و (ب) اعتبارسنجی سناریوهای RCP (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۸. میانگین ماهیانه بارش پیش بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای RCPs (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۹. میانگین ماهیانه بارش پیش‌بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای مختلف SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۴. مقدار تغییرات میانگین ماهیانه بارش در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای مختلف

سناریو	دوره	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
RCP2.6	۲۰۴۰	-۰/۳۲	-۰/۳۵	-۰/۳۱	-۰/۰۱	۰/۵۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	-۰/۰۵	-۰/۲۸	۰/۲۷
	۲۰۷۰	۰/۰۱	۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۱
	۲۰۱۰	-۰/۳۲	-۰/۳۵	-۰/۲۹	۰/۰۶	۰/۵۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۱	-۰/۰۶	-۰/۲۸	۰/۲۶
RCP4.5	۲۰۴۰	-۰/۰۱	-۰/۰۴	-۰/۱۳	۰/۱۱	۰/۱۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۱	۰/۲۰	۰/۰۳	۰/۰۶
	۲۰۷۰	-۰/۰۸	-۰/۰۶	-۰/۱۲	۰/۱۵	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۲۲	-۰/۰۴	۰/۰۵
	۲۰۱۰	-۰/۱۲	-۰/۰۷	-۰/۱۲	۰/۰۹	۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۰۰	۰/۰۵
RCP8.5	۲۰۴۰	-۰/۰۴	-۰/۰۶	-۰/۱۰	۰/۱۸	۰/۴۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۹	۰/۲۲	۰/۰۰	۰/۰۹
	۲۰۷۰	-۰/۰۵	-۰/۰۵	-۰/۱۱	۰/۱۰	۰/۲۸	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۸	۰/۳۲	۰/۱۴	۰/۰۸
	۲۰۱۰	-۰/۰۵۵	-۰/۰۳	-۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۴۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۲۴	۰/۳۵	۰/۰۹	۰/۱۳
A2	۲۰۴۰	۰/۰۱	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۱	-۰/۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۱
	۲۰۷۰	۰/۰۰	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۰
	۲۰۱۰	۰/۰۴	-۰/۰۳	-۰/۰۱	۰/۰۰	-۰/۰۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۰/۰۴	۰/۰۹	۰/۰۷	۰/۰۰
B2	۲۰۴۰	۰/۰۰	۰/۰۲	-۰/۰۲	۰/۰۱	-۰/۰۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۰
	۲۰۷۰	-۰/۰۲	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۳	-۰/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	-۰/۰۱	۰/۰۲	-۰/۰۱	۰/۰۱
	۲۰۱۰	۰/۰۲	۰/۰۶	-۰/۰۲	۰/۰۳	-۰/۰۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۵	-۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱

پیش‌بینی شده است (۲۲ و ۲۸).

بحث

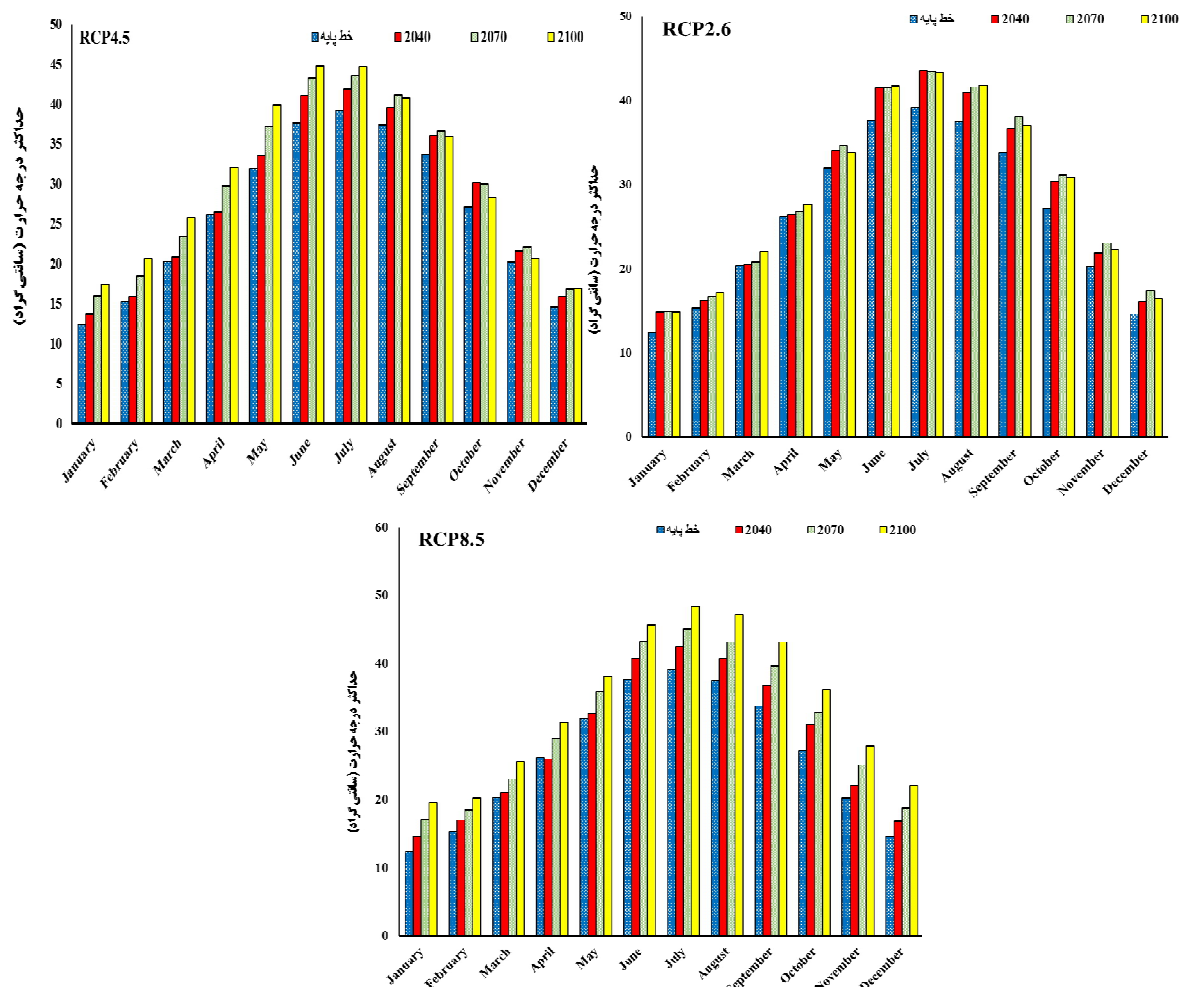
با توجه به قرار گرفتن کشور ایران روی کمربند خشک کره زمین و دارا بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک، تأثیرات پدیده تغییر اقلیم و افزایش درجه حرارت بر فراسنج‌های اقلیمی امری بدیهی است. اصولاً برای بررسی تغییر اقلیم از فراسنج‌هایی استفاده می‌شود که نسبت به بقیه فراسنج‌ها از درجه اهمیت بالاتری برخوردار باشد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به درجه حرارت و بارندگی اشاره کرد. هدف از انجام تحقیق حاضر بررسی تغییرات اقلیم تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5، A2 و B2 و توانایی HadCM3 و SDSM برای شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی بارش، حداقل و حداکثر درجه حرارت در ایستگاه یزد در کشور ایران است. به‌منظور کوچک‌مقیاس کردن داده‌های مدل گردش عمومی از مدل SDSM استفاده شده و داده‌های بزرگ‌مقیاس مدل گردش عمومی جو HadCM3 تحت دو دسته سناریوهای کوچک‌مقیاس شدند. خروجی‌های مدل SDSM در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی نشان می‌دهد که مقدار ضریب تبیین در همه موارد از میزان قابل توجهی برخوردار بوده و همچنین مقادیر شاخص‌های خطاسنجی نیز به‌نسبت پایین بوده که مؤید انطباق نسبی و قابل قبول مقادیر شبیه‌سازی شده توسط مدل و مقادیر مشاهده شده در دوره پایه است. ملاحظه می‌شود که نمودار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره پایه تقریباً به‌هم نزدیک بوده و با هم برابری می‌کند و این خود صحت توانایی مدل در کوچک‌مقیاس کردن داده‌های اقلیمی برای آینده را تأیید می‌کند. صحت شبیه‌سازی داده‌های دما بالاتر از بارش است که این امر را می‌توان به شرطی (Conditional) بودن بارش نسبت به درجه حرارت که پارامتری غیرشرطی (Unconditional) است مرتبط دانست.

از مدل‌های تهیه شده در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی و

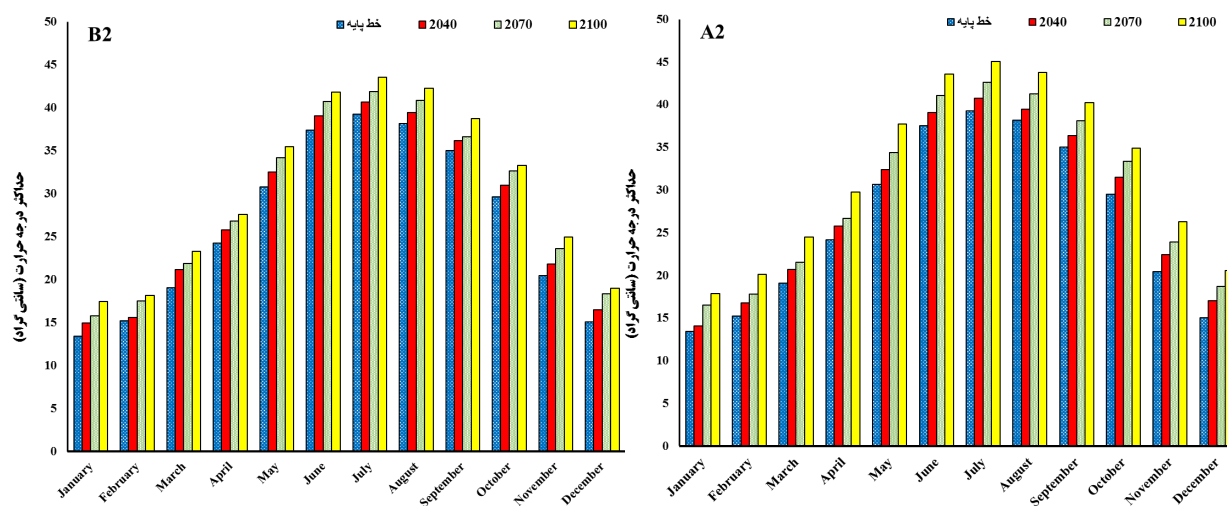
تحت سناریوی A2 برای دوره ۲۰۴۰ به‌جز ماه‌های فوریه، مارس و می، در دوره ۲۰۷۰ به‌جز ماه‌های ژانویه، می و نوامبر و در دوره ۲۱۰۰ به‌جز ماه‌های فوریه، مارس، می و اکتبر بارش افزایش خواهد یافت. تحت سناریوی B2 برای دوره ۲۰۴۰ به‌جز ماه‌های مارس و می، در دوره ۲۰۷۰ به‌جز ماه‌های ژانویه، می، اکتبر و در دوره ۲۱۰۰ به‌جز ماه‌های مارس، می و نوامبر بارش افزایش خواهد یافت. این امر نشان می‌دهد که فصل‌های پر باران، مرطوب‌تر شده و فصل‌های خشک، خشک‌تر خواهند شد.

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جدول ۵، مقادیر پیش‌بینی شده میانگین دمای حداکثر روزانه تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه را نشان می‌دهد. با توجه به پیش‌بینی انجام شده برای هر سه دوره میانگین دمای حداکثر روزانه به استثنای برخی ماه‌ها (ژانویه و فوریه در RCP2.6)، برای تمام فصل‌های سال نسبت به دوره آماری پایه افزایش نشان می‌دهد. بیشترین میزان افزایش دمای حداکثر در هر سه دوره آتی مربوط به سناریوی RCP8.5 (در ماه اوت دوره ۲۱۰۰ در حدود ۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد) است. تحت تمامی سناریوها، میزان دمای حداکثر ماه‌های گرم در مقایسه با ماه‌های سرد، بیشتر افزایش خواهد یافت.

شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و جدول ۶، مقادیر پیش‌بینی شده میانگین دمای حداقل روزانه تا انتهای قرن جاری تحت سناریوهای مختلف در مقایسه با دوره پایه را نشان می‌دهد. تحت تمامی سناریوها، برای مقدار میانگین دمای حداقل روزانه نسبت به مقدار متناظر دوره پایه افزایش پیش‌بینی شده است. بیشترین میزان افزایش دمای حداقل روزانه در هر سه دوره آتی مربوط به سناریوی RCP8.5 (در ماه اوت دوره ۲۱۰۰ در حدود ۱۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد) است. در غالب موارد، میزان افزایش دمای حداقل در ماه‌های گرم سال بیشتر از مقدار آن در ماه‌های سرد محاسبه شده است. مقایسه میزان افزایش دمای حداقل و حداکثر نشان می‌دهد که میزان افزایش دمای حداقل عموماً بیشتر از دمای حداکثر



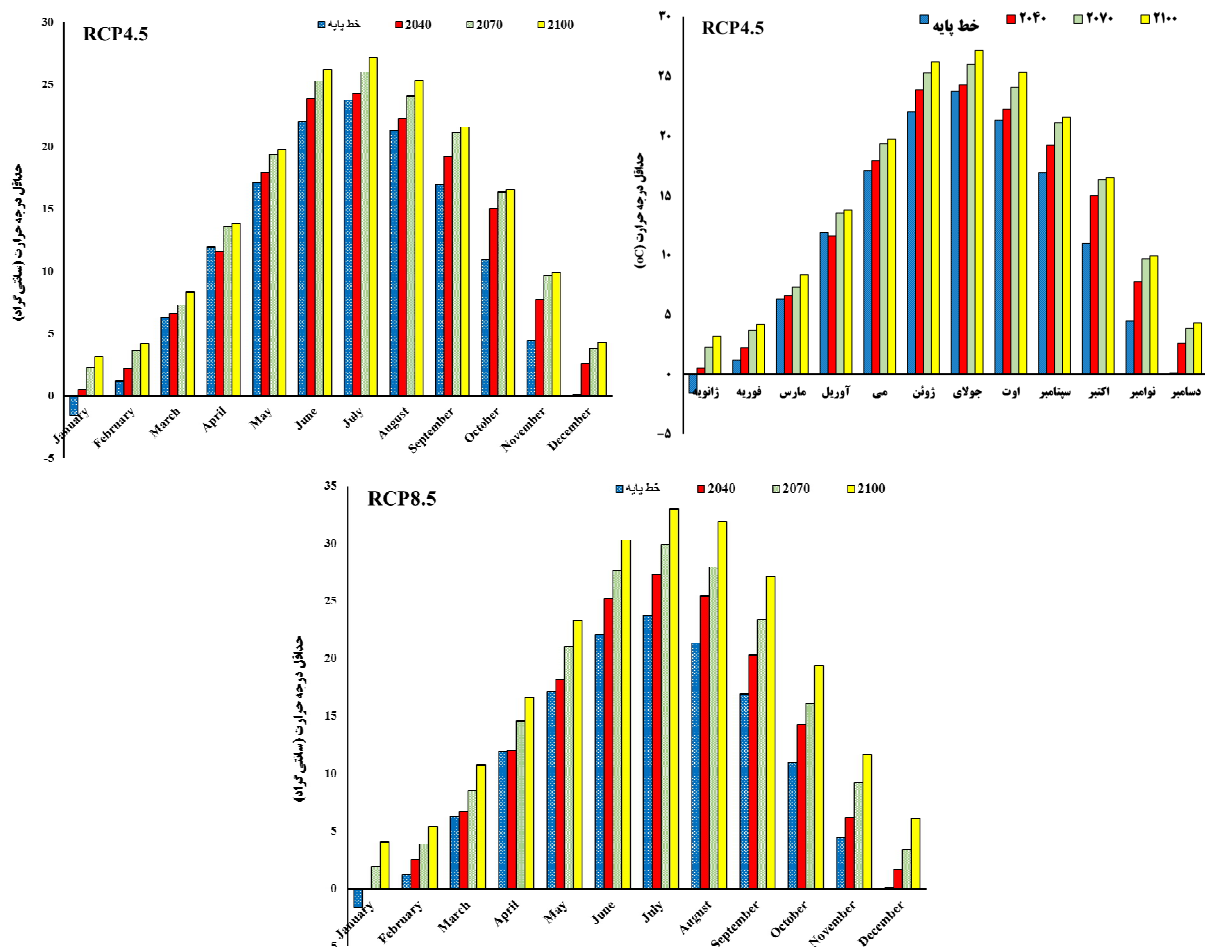
شکل ۱۰. میانگین دمای حداکثر روزانه پیش‌بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای مختلف RCPs (رنگی در نسخه الکترونیکی)



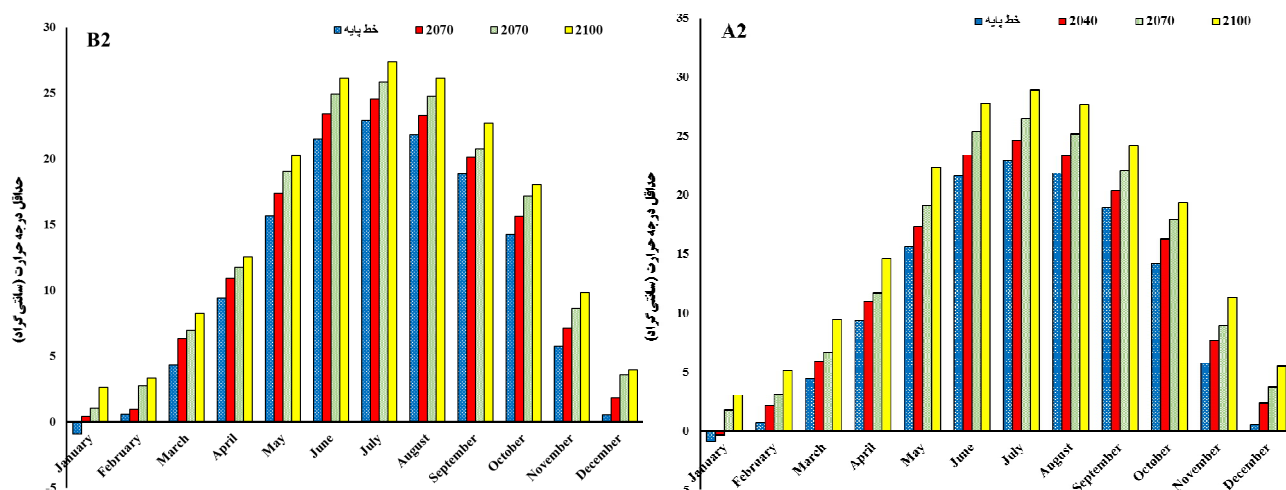
شکل ۱۱. میانگین دمای حداکثر روزانه پیش‌بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای مختلف SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۵. مقدار تغییرات میانگین دمای حداکثر روزانه در در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای مختلف

سناریو	دوره	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
RCP2.6	۲۰۴۰	۲/۴۷	۰/۹۷	۰/۱۹	۰/۲۱	۲/۰۶	۳/۹۱	۴/۴۲	۳/۵۳	۲/۸۹	۳/۲۲	۱/۶۲	۱/۴۵	۳/۲۶
	۲۰۷۰	۲/۵۴	۱/۳۸	۰/۴۵	۰/۶۳	۲/۶۳	۳/۸۷	۴/۲۶	۴/۱۶	۴/۳۲	۳/۹۸	۲/۸۱	۲/۷۶	۲/۸۳
	۲۰۱۰	۲/۴۲	۱/۸۶	۱/۷۰	۱/۴۸	۱/۷۷	۴/۱۵	۴/۱۲	۴/۳۴	۳/۳۰	۳/۶۲	۲/۰۳	۱/۸۳	۲/۷۳
RCP4.5	۲۰۴۰	۱/۲۹	۰/۶۳	۰/۵۶	۰/۲۶	۱/۵۸	۳/۴۳	۲/۷۲	۲/۱۲	۲/۲۸	۳/۰۳	۱/۳۶	۱/۳۳	۱/۷۳
	۲۰۷۰	۳/۶۰	۳/۱۹	۳/۱۲	۳/۵۱	۵/۲۹	۵/۶۸	۴/۴۰	۳/۶۸	۲/۹۱	۲/۸۵	۱/۹۱	۲/۳۳	۳/۵۵
	۲۰۱۰	۴/۹۹	۵/۳۰	۵/۴۳	۵/۹۳	۷/۹۳	۷/۱۸	۵/۵۳	۳/۳۵	۲/۱۸	۱/۱۱	۰/۴۳	۲/۳۶	۴/۳۱
RCP8.5	۲۰۴۰	۲/۲۴	۱/۷۰	۰/۶۸	-۰/۲۳	۰/۶۹	۳/۱۳	۳/۲۸	۳/۲۷	۳/۰۲	۳/۸۴	۱/۸۴	۲/۲۴	۲/۱۶
	۲۰۷۰	۴/۷۱	۳/۲۰	۲/۷۲	۲/۸۰	۳/۹۱	۵/۶۵	۵/۸۸	۵/۷۴	۵/۹۱	۵/۶۷	۴/۸۷	۴/۱۵	۴/۶۲
	۲۰۱۰	۷/۱۴	۵/۰۰	۵/۲۶	۵/۱۳	۶/۱۸	۸/۰۴	۹/۱۲	۹/۷۱	۹/۴۰	۸/۹۴	۷/۶۸	۷/۳۸	۷/۴۴
A2	۲۰۴۰	۰/۶۱	۱/۵۱	۱/۵۸	۱/۶۴	۱/۷۵	۱/۵۸	۱/۴۹	۱/۲۶	۱/۳۴	۱/۹۹	۱/۹۹	۲/۰۱	۱/۵۶
	۲۰۷۰	۳/۰۷	۲/۵۸	۲/۴۴	۲/۴۹	۳/۷۵	۳/۶۰	۳/۳۸	۳/۰۶	۳/۱۲	۳/۸۰	۳/۴۸	۳/۶۳	۳/۲۰
	۲۰۱۰	۴/۴۵	۴/۸۵	۵/۳۶	۵/۶۲	۷/۰۶	۶/۰۹	۵/۸۰	۵/۶۰	۵/۲۵	۵/۳۸	۵/۸۲	۵/۵۰	۵/۵۶
B2	۲۰۴۰	۱/۵۸	۰/۴۲	۲/۱۱	۱/۵۶	۱/۷۲	۱/۶۵	۱/۳۹	۱/۲۹	۱/۱۱	۱/۴۰	۱/۳۳	۱/۳۸	۱/۴۱
	۲۰۷۰	۲/۴۲	۲/۳۳	۲/۷۸	۲/۵۳	۳/۳۷	۳/۳۱	۲/۶۲	۲/۶۹	۱/۶۱	۳/۰۳	۳/۱۶	۳/۲۵	۲/۷۶
	۲۰۱۰	۴/۰۶	۲/۹۴	۴/۲۰	۳/۳۱	۴/۶۹	۴/۴۲	۴/۲۹	۴/۱۳	۳/۶۷	۳/۶۹	۴/۴۸	۳/۹۱	۳/۹۸



شکل ۱۲. میانگین دمای حداکثر روزانه پیش‌بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای مختلف RCPs (رنگی در نسخه الکترونیکی)



شکل ۱۳. میانگین دمای حداقل روزانه پیش‌بینی شده تا پایان قرن جاری برای سناریوهای مختلف SRES (رنگی در نسخه الکترونیکی)

جدول ۶. مقدار تغییرات میانگین دمای حداقل روزانه در دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه تحت سناریوهای مختلف

سناریو	دوره	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
RCP2.6	۲۰۴۰	۱/۷۸	۰/۸۹	۰/۲۰	۰/۴۳	۲/۱۰	۳/۶۰	۴/۲۸	۴/۱۵	۳/۲۵	۲/۴۹	۱/۸۲	۱/۱۵	۲/۱۹
	۲۰۷۰	۱/۹۹	۱/۲۳	۰/۴۳	۰/۷۵	۲/۶۴	۳/۷۵	۴/۰۶	۴/۵۹	۴/۵۵	۳/۳۷	۲/۷۷	۲/۰۸	۲/۷۰
	۲۰۱۰	۱/۸۳	۱/۵۴	۱/۲۵	۱/۳۴	۱/۹۳	۳/۸۶	۴/۱۴	۴/۸۱	۳/۶۳	۳/۱۸	۲/۰۸	۱/۲۹	۲/۵۹
RCP4.5	۲۰۴۰	۲/۰۸	۱/۰۲	۰/۳۱	-۰/۳۵	۰/۸۳	۱/۸۳	۰/۵۴	۰/۹۱	۲/۳۲	۴/۰۹	۳/۳۰	۲/۵۰	۱/۶۲
	۲۰۷۰	۳/۸۶	۲/۴۹	۰/۹۹	۱/۶۴	۲/۲۷	۳/۲۴	۲/۲۶	۲/۷۶	۴/۱۹	۵/۴۲	۵/۲۱	۳/۷۴	۳/۱۸
	۲۰۱۰	۴/۷۷	۲/۹۷	۲/۰۵	۱/۹۰	۲/۶۵	۴/۱۵	۳/۴۲	۴/۰۰	۴/۶۴	۵/۵۹	۵/۴۷	۴/۲۱	۳/۸۳
RCP8.5	۲۰۴۰	۱/۵۴	۱/۳۰	۰/۳۸	۰/۰۶	۱/۱۰	۳/۱۵	۳/۵۴	۴/۱۳	۳/۳۶	۳/۲۸	۱/۷۱	۱/۵۸	۲/۱۱
	۲۰۷۰	۳/۴۶	۲/۶۸	۲/۲۷	۲/۶۶	۳/۹۷	۵/۵۸	۶/۱۳	۶/۶۱	۶/۴۶	۵/۱۸	۴/۷۶	۳/۳۱	۴/۴۴
	۲۰۱۰	۵/۶۴	۴/۲۰	۴/۴۴	۴/۶۷	۶/۱۸	۸/۲۵	۹/۲۶	۱۰/۵۴	۱۰/۲۳	۸/۳۹	۷/۱۷	۶/۰۴	۷/۱۱
A2	۲۰۴۰	۰/۵۶	۱/۵۰	۱/۴۶	۱/۶۲	۱/۷۵	۱/۷۶	۱/۷۱	۱/۴۹	۱/۴۷	۲/۱۲	۱/۸۹	۱/۸۴	۱/۶۰
	۲۰۷۰	۲/۶۸	۲/۴۳	۲/۲۳	۲/۳۲	۳/۵۶	۳/۷۶	۳/۵۵	۳/۳۱	۳/۱۸	۳/۷۴	۳/۲۰	۳/۱۸	۳/۱۰
	۲۰۱۰	۳/۹۴	۴/۴۸	۴/۹۸	۵/۲۵	۶/۷۹	۶/۱۵	۵/۹۹	۵/۸۲	۵/۳۲	۵/۲۱	۵/۵۴	۵/۰۰	۵/۳۷
B2	۲۰۴۰	۱/۳۲	۰/۳۸	۲/۰۱	۱/۵۱	۱/۷۴	۱/۹۴	۱/۶۱	۱/۴۶	۱/۲۴	۱/۳۸	۱/۳۹	۱/۲۸	۱/۴۴
	۲۰۷۰	۱/۹۸	۲/۱۶	۲/۶۰	۲/۳۵	۳/۳۷	۳/۴۳	۲/۸۹	۲/۹۰	۱/۸۷	۲/۹۰	۲/۹۰	۳/۰۳	۲/۷۰
	۲۰۱۰	۳/۵۶	۲/۷۵	۳/۹۰	۳/۱۴	۴/۶۰	۴/۶۲	۴/۴۳	۴/۲۸	۳/۸۱	۳/۷۹	۴/۰۹	۳/۴۰	۳/۸۶

نتایج به دست آمده حاکی از افزایش دما در تمام ماه‌ها و فصول سال و کاهش بارندگی در اکثر آنها است که این مسئله مؤید این مطلب است که در منطقه مورد مطالعه اقلیم در حال تغییر است و گرمایش جهانی در حال وقوع است. افزایش دما و تغییرات پارامترهای اقلیمی تحت سناریوهای مختلف گزارش شده است (۶، ۲۱ و ۲۷) که با نتایج به دست آمده در این تحقیق همخوانی دارد. همچنین با تحقیقی که در چین انجام شده است از نظر قابلیت بهتر سناریوهای RCP مبنی بر پیش‌بینی بارش و درجه حرارت، همسو است (۳۵).

نتیجه‌گیری

نتایج عدم قطعیت در فراسنج‌های پیش‌بینی شده در مدل گردش عمومی نشان می‌دهد که به‌طور کلی هر چه پیش‌بینی‌ها به‌طرف دهه‌های انتهایی قرن حاضر نزدیک می‌شود عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده حاکی از افزایش دما در تمام ماه‌ها و فصل‌های سال و کاهش بارندگی در اکثر آنها است که این مسئله مؤید این مطلب است که در منطقه مورد مطالعه اقلیم در حال تغییر است و گرمایش جهانی در حال وقوع است. در پژوهش حاضر تغییرات اقلیم در ایستگاه یزد با فرض ثابت بودن شیب، پوشش گیاهی و کاربری اراضی صورت پذیرفت. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های بیشتر، عدم قطعیت‌های مدل‌های گزارش ارزیابی پنجم و چهارم، با در نظر گرفتن همه عوامل محیطی فوق و به‌منظور درک بهتری تغییرات اقلیم آتی در سرتاسر منطقه فوق انجام پذیرد. همچنین با توجه به اینکه تغییر اقلیم در مناطق مختلف می‌تواند متفاوت باشد نتیجه‌ای که در یک منطقه با شرایط خاص به دست می‌آید را نمی‌توان به یک منطقه دیگر تعمیم داد. بنابراین، به منظور مقایسه نتایج این پژوهش با تحقیقات انجام شده باید تحقیقاتی که در این منطقه یا مناطق اطراف با شرایط مشابه انجام شده است، ارزیابی شود.

همچنین داده‌های اقلیمی بزرگ مقیاس HadCM3 و ریزمقیاس نمای SDSM تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP8.5، A2 و B2 برای پیش‌بینی دوره‌های آتی مورد استفاده قرار گرفت که بر اساس نتایج به دست آمده، بیشترین کاهش بارش نسبت به دوره پایه، در دوره ۲۰۴۰ مربوط به سناریوی RCP2.6 (۰/۳۵- میلی‌متر در روز در ماه فوریه)، در دوره ۲۰۷۰ مربوط به سناریوی RCP4.5 (۰/۱۲- میلی‌متر در روز در ماه مارس) و در دوره ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی RCP2.6 (۰/۳۵- میلی‌متر در روز در ماه فوریه) است. نتایج تحقیق (۱۹) در پاکستان نشان‌دهنده کاهش بارش تحت سناریوی RCP2.6 به میزان ۶ درصد است.

بیشترین افزایش دمای حداکثر نسبت به دوره پایه، در دوره ۲۰۴۰ مربوط به سناریوی RCP2.6 (۴/۴۲ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه جولای)، در دوره ۲۰۷۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۵/۹۱ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه سپتامبر) و در دوره ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۹/۷۱ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه اوت) است. بیشترین افزایش دمای حداقل نسبت به دوره پایه، در دوره ۲۰۴۰ مربوط به سناریوی RCP2.6 (۴/۲۸ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه جولای)، در دوره ۲۰۷۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۶/۶۱ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه اوت) و در دوره ۲۱۰۰ مربوط به سناریوی RCP8.5 (۱۰/۵۴ درجه سانتی‌گراد در روز در ماه اوت) است.

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که میانگین دمای حداقل و حداکثر ماهانه در ماه‌های گرم بیشتر از مقدار آنها در ماه‌های سرد افزایش خواهد یافت. از طرفی میزان افزایش دمای حداقل بیشتر از افزایش دمای حداکثر بوده و میانگین افزایش دمای حداقل برای کلیه سناریوها و دوره‌های آتی برابر ۳/۱۸ و برای دمای حداکثر برابر ۳/۳۴ است. در مجموع تفاوت‌هایی بین نتایج سناریوهای گزارش چهارم و پنجم دیده شد اما روند تغییرات یکسان است.

منابع مورد استفاده

1. Abbasnia, M., and H. Toros. 2016. Future changes in maximum temperature using the statistical downscaling model (SDSM) at selected stations of Iran. *Model. Earth Systems and Environment* 2: 68.
2. Abbasnia, M., T. Tavousi and M. Khosravi. 2016. Assessment of future changes in the maximum temperature at selected stations in Iran based on HADCM3 and CGCM3 models. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 52(4): 371-377.
3. Brayson, R. A. 1997. The paradigm of climatology: an essay. *Bulletin of the American Meteorological Society* 73: 449-465.
4. Chadwick, R., I. Boutle and G. martin. 2013. Spatial patterns of precipitation change in CMIP5: Why the rich do not get richer in the tropics. *Journal of Climate* 26(11): 3803-3822.
5. Charron, I. 2016. A Guidebook on Climate Scenarios: Using Climate Information to Guide Adaptation Research and Decisions 2016 Edition, Ouranos.
6. Chen, H., J. Guo, Z. Zhang and Ch. Xu. 2013. Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Suda by using LARS-WG in future. *Theor Applied Climatology* 113: 363-375.
7. Chou, C., J. Neelin, C. Chen and J. Tu. 2009. Evaluating the "rich-getricher" mechanism in tropical precipitation change under global warming. *Journal of Climate* 22(8): 1982-2004.
8. Coulibaly, P., and B. Yonas. 2005. Downscaling precipitation and temperature with temporal neural networks. *American Meterology Socity* 6: 483-496.
9. Dibike, Y. and P. Coulibaly. 2005. Hydrological impact of climate change in the Saguenay watershed: Comparison of downscaling methods and hydrologic models. *Journal of Hydrology* 307: 145-163.
10. Held, I. M. and B. J. Soden. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate* 19(21): 5686-5699.
11. Huang, J., X. Guan and F. Ji. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12(12): 5391-5398.
12. Javan, K., F. Nasiri Saleh and H. Taheri Shahraiyini. 2013. The influences of climate change on the runoff Gharesoo River Watershed. *Climatic Change* 2(4): 296-305.
13. Ji, F., Z. Wu, J. Huang and P. Eric. 2014. Evolution of land surface air temperature trend. *Nat Clim Change* 4: 462-466.
14. Jiang, Z. H., W. L. Chen, J. Song and J. Wang. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* 33(1): 109-120.
15. Khan, M. S., P. Coulibaly and Y. Dibike. 2006. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods using Canadian Global Climate Model predictors. *Hydrology Process* 20: 3085-3104.
16. Kharin, V. V. and F. W. Zwiers. 2000. Changes in the extremes in an ensemble of transient climate simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM. *Journal of Climate* 13: 3760-3788.
17. Koukidis, E. N. and A. A. Berg. 2009. Sensitivity of the Statistical Downscaling Model (SDSM) to reanalysis products. *Atmosphere-Ocean* 47(1): 1-18.
18. Kumarbal, P., A. Ramachandran, R. Geetha, B. Bhaskaran, P. Thirumurugan, J. Indumathi and N. Jayanthi. 2016. Climate change projections for Tamil Nadu, India: deriving highresolution climate data by a downscaling approach using PRECIS. *Theoretical and Applied Climatology* 123(3-4): 523-535.
19. Mahmood, R., Sh. Jia. N. Kumar Tripathi and S. Shrestha. 2018. Precipitation extended linear scaling method for correcting GCM precipitation and Its evaluation and implication in the transboundary Jhelum River basin. *Atmosphere* 9: 160.
20. Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463(7282): 747-756.
21. Nkomozepi, T. and S. O. Chung. 2014. The effect of climate change on the water resources of the Geumho River Basin, Republic of Korea. *Journal of Hydro-Environment Research* 8(4): 358-366.
22. Peng, S. B., J. L. Huang, J. E. Sheehy, R. C. Laza, R. M. Visperas, X. H. Zhong, G. S. Centeno, G. S. Khush and K. G. Cassman. 2004. Rice yields decline with higher night temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences, U.S.A* 101: 9971-9975.
23. Peterson, T. C., X. B. Zhang, M. B. India and J. L. V. Aguirre. 2008. Changes in North American extremes derived from daily weather data. *Journal of Geophysical Research* 41: 123-135.
24. Salathe, E. P. 2005. Downscaling simulations of future global climate with application to hydrologic modeling. *International Journal of Climatology* 25: 419-436.
25. Seager, R., N. Naik and G. A. Vecchi. 2010. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. *Journal of Climate* 23(17): 4651-4668.

26. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller. 2007. The Physical science basis, contribution of working group I to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Cambridge University Press, Ambridge* 1-18.
27. Terink, W., W. W. Immerzeel and P. Droogers. 2013. Climate change projections of precipitation and reference evapotranspiration for the Middle East and Northern Africa until 2050. *International Journal of Climatology* 33(14): 3055-3072.
28. Turkes, M. and U. M. Sumer. 2004. Spatial and temporal patterns of trends and variability in diurnal temperature ranges of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology* 77: 195-227.
29. UNEP. 2000. IPCC Emissions Scenarios, in IPCC SRES 2000.
30. Vuuren, D. V., J. Edmonds, M. Kainuma, K. Riahi and J. Weyant. 2011. A special issue on the RCPs. *Climate Change* 109: 1-4.
31. Wang, Q-x., X-h. Fan, Z-d. Qin and M-b. Wang. 2012. Change trends of temperature and precipitation in the loess plateau region of China, 1961-2010. *Global and Planetary Change* 138-147.
32. Wilby, R. L. and C. W. Dawson. 2007. SDSM 4.2-A Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts, Version 4.2 User Manual. Lancaster University, Lancaster/Environment Agency of England and Wales, Lancaster.
33. Wilby, R. L., C. W. Dawson and E. M. Barrow. 2002. SDSM-A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling and Software* 17: 147-159.
34. Wilby, R. L., O. J. Tomlinson and W. C. Dawson. 2003. Multi-site simulation of precipitation by conditional resampling. *Journal of Climate Research* 23: 183-194.
35. Xu, C. H. and Y. Xu. 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.
36. Zhao, Z. C., Y. Luo, Y. Jiang and Y. Xu. 2008. Projections of surface air temperature change in China for the next two decades. *Journal of Meteorological Research* 24(5): 1-5.

Evaluation of the Effects of Climate Change on Meteorological Parameters under Different Scenarios in Yazd Meteorological Station

H. Fathizad^{1*}, M. Tavakoli², M. A. Hakimzadeh Ardakani¹, R. Taghizadeh Mehrjardi³
and H. Sodaiezhadeh¹

(Received: December 6-2019 ; Accepted: June 16-2020)

Abstract

The purpose of this research was to investigate the trend of annual changes in Yazd station's meteorological parameters including minimum and maximum average daily temperature and average daily precipitation (1961-2005), as well as the predicted annual mean of these parameters in the three upcoming thirty years of the 2040s, 2070s and 2100s, by the SDSM model, under RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, A2, and B2 scenarios. Accordingly, by using the coefficient of determination and the MAE, R^2 , RMSE indicators, we evaluated the data generated by the SDSM model in comparison with the observed data in the base period. The lowest value of R^2 based on the calibration and validation of the mean values of observed and simulated SRES was obtained for precipitation (86 and 80%). In terms of the R^2 evaluation index, the accuracy of the small-scaled results of the minimum and maximum average temperature values was more than that of the average precipitation; however, in terms of the MAE and RMSE evaluation indicators, the accuracy of the small-scaled results of the average precipitation was higher than that of the minimum and maximum average temperature values. Subsequently, HadCM3 large-scale climatological data was used to predict the future periods (2010-2100). The results indicated that the temperature was raised in all months and seasons and the precipitation was decreasing in most of them, thereby confirming that the climate was changing in the studied region.

Keywords: Climate Change, HadCM3, SDSM, Yazd, Iran.

1. Department of Management Arid and Desert Regions, College of Natural Resources and Desert, Yazd University, Iran.

2. Natural Resources Department, Agriculture Faculty, Ilam University, Ilam, Iran.

3. Department of Soil Science, Agriculture and Natural Resources Department, Ardakan University, Yazd, Iran.

*: Corresponding author, Email: H.fathizad@stu.yazd.ac.ir