

بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از رویکرد مدل‌های گردش عمومی جو در استان‌های غربی کشور

مهران اکبرزاده، احمد نوری،* ثمر مرتضوی، بهناز عطائیان^۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۷

چکیده

امروزه از مهم‌ترین چالش‌های جوامع انسانی، تغییرات اقلیمی است و بررسی این تغییرات به دلیل تأثیر گسترده آن بر موجودات زنده از اهمیت بسزایی برخوردار است. در این پژوهش به پیش‌بینی و بررسی پارامترهای دمای حداکثر، بارش و دمای میانگین تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 و کاربست مدل SDSM در ۱۱ استان غربی کشور در دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۶ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ نسبت به دوره پایه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج مدل نشان داد که بارش در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۶ نسبت به دوره پایه از ۲/۵۰ تا ۳/۸۶ درصد و در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ نیز ۱۰/۰۲ تا ۱۵/۷۳ درصد تغییر نسبت به دوره پایه خواهد داشت و بیشترین تغییر در میزان بارش در استان‌های آذربایجان شرقی و غربی رخ خواهد داد. بررسی دمای حداکثر در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۶ نسبت به دوره پایه از ۰/۲ تا ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد افزایش بیشینه دما در سطح منطقه مورد مطالعه اتفاق خواهد افتاد و در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ نیز بیشینه دما از ۰/۸۶ تا ۰/۸۹ درجه سانتی‌گراد نسبت به داده‌های دوره پایه افزایش خواهد یافت و بیشترین تغییر در میزان دمای حداکثر در جنوب استان فارس و مناطق مرزی استان کرمانشاه رخ خواهد داد و بررسی دمای میانگین هم در بازه زمانی اول از ۰/۰۵ تا ۵/۰۷ درصد افزایش دما را نشان می‌دهد و در بازه زمانی دوم نیز ۴/۴۷ تا ۵/۰۵ درصد افزایش میانگین دما نسبت به داده‌های پایه خواهیم داشت. کمترین تغییرات در پارامترهای مورد مطالعه مربوط به سناریو RCP2.6 و بیشترین تغییرات مربوط به سناریو RCP8.5 به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، تغییرات بارش، مدل GCM، SDSM.

۱. دانشجوی دکتری محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

۲. دانشیار، گروه منابع طبیعی و آبخیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران، climatology.hnouri52@gmail.com

۳. استادیار، گروه منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

۴. استادیار، گروه منابع طبیعی و آبخیزداری، دانشگاه ملایر، ملایر، همدان، ایران

این مقاله برگرفته از رساله دکتری دانشگاه ملایر است.

مقدمه

شرایط اقلیمی در هر منطقه، وضعیت محیطی آن منطقه را شکل می‌دهد و هرگونه نوسانی در آن موجب تغییرات اقلیمی در آن منطقه می‌شود و شیوه زندگی جوامع انسانی را دستخوش تغییر می‌کند (شیخ بیکلو اسلام، ۲۰۲۳). امروزه پدیده تغییر اقلیم به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیط جهان تبدیل شده که با افزایش روزافزون انتشار گازهای گلخانه، سرعت این تغییرات بیشتر شده است (اکبرزاده و نیکو، ۲۰۲۱). گازهای گلخانه‌ای یکی از عوامل غیرطبیعی اثرگذار بر اقلیم کره زمین است که پس از انقلاب صنعتی در اواسط قرن هجدهم به واسطه افزایش استفاده از سوخت‌های فسیلی، تعادل مقادیر گازهای گلخانه‌ای در سطح اتمسفر زمین به هم خورد و تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی به وقوع پیوست (استانزل و هانس، ۲۰۱۸). بررسی و پیش‌بینی برای شناسایی اثرات و پیش‌آگاهی از وضعیت آینده و در نظر گرفتن تمهیدات و راهکارهای لازم با هدف تعدیل و سازگاری با تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (عرب سلغار و همکاران، ۲۰۲۲). به همین دلیل بررسی و پیش‌بینی درازمدت پارامترهای اقلیمی برای اطلاع و شناخت میزان تغییرات آن‌ها و در نظر گرفتن راهکار مناسب جهت تعدیل اثرات منفی ناشی از آن مورد توجه جامعه جهانی است و بر همین اساس مدل‌های گردش عمومی جو توسعه یافته است (کیان و همکاران، ۲۰۰۴). در واقع در بسیاری از تحقیقات از مدل‌های گردش عمومی به صورت مستقیم و به‌تنهایی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی و هیدرولوژیکی نقطه‌ای یا منطقه‌ای استفاده می‌کنند. این امر عدم قطعیت را افزایش می‌دهد؛ به همین دلیل برای افزایش دقت مکانی این داده‌ها از روش مقیاس کاهی استفاده می‌شود که به روش آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند (بیچام و همکاران، ۲۰۱۴). استفاده از مدل‌سازی و برآورد پارامترهای آب‌وهوایی به دلیل گستردگی تغییرات اقلیمی، ذهن محققان و دانشمندان

را در سراسر کره زمین به خود مشغول کرده است (حجازی‌زاده و همکاران، ۲۰۱۵). به همین دلیل در این تحقیق برای دستیابی به پارامترهای اقلیمی از مقایسه سناریوهای گردش عمومی جو از سه پارامتر دمای میانگین، دمای حداکثر و بارش در سطح ۱۱ استان غربی کشور شامل آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، کردستان، زنجان، همدان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، فارس، چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد بهره گرفته شد. تحقیقات متعددی در سطح کشور و جهان در زمینه بررسی اثرات ریزگرد بر خصوصیات مورفولوژیکی و عملکرد گیاهان مختلف صورت گرفته که در ذیل به بعضی از آن‌ها اشاره شده است.

مودال و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از مدل‌های مختلف گردش عمومی جو به بررسی تغییرات اقلیمی در دشت‌های مرتفع تگزاس کشور آمریکا پرداخته و نتایج حاکی از آن است تا سال ۲۰۷۰ دما افزایش و فصول بدون یخبندان ۲/۶ تا ۳/۴ هفته طولانی‌تر می‌شود و روزهای با وقوع پدیده یخبندان در سطح این منطقه ۱۷/۹ تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.

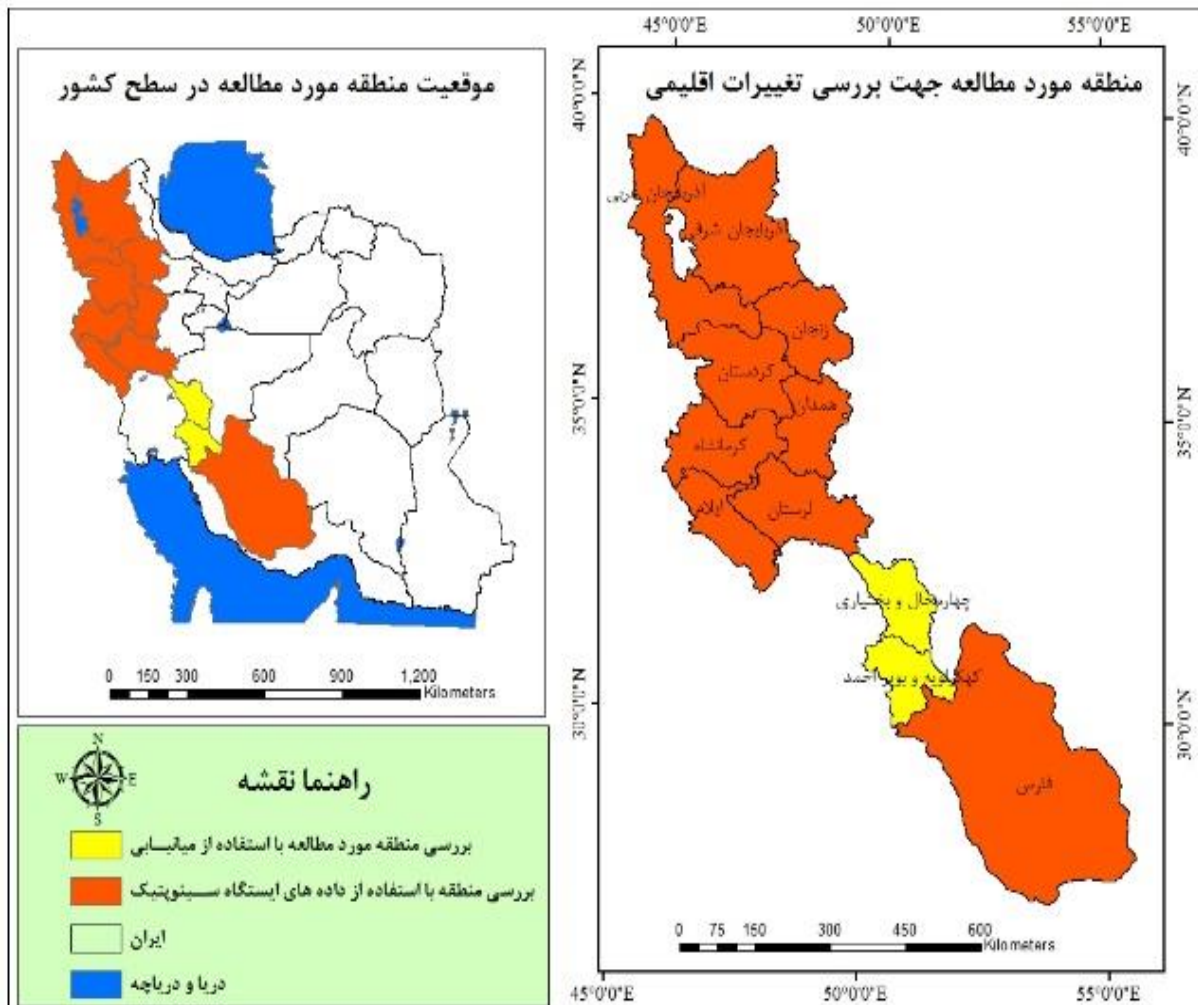
نلوار و ویکار^۱ (۲۰۱۹) در تحقیقی تغییرات بارش و دما در کشور هند را با دو سناریو RCP مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از آن است که میزان بارش و دما تحت هر دو سناریو افزایشی است. در همین راستا حیدری و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی دما و بارش در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه نشان دادند که دما در سطح این حوزه افزایش می‌یابد، اما بارش روند کاهشی خواهد داشت. نتایج تحقیق دیمیری و همکاران (۲۰۱۸) نیز در منطقه هیمالیا تحت سناریوهای مختلف RCP نشان داد که دمای حداکثر و حداقل در این منطقه به ترتیب ۰/۵۴ و ۰/۲۳ درجه سلسیوس به صورت میانگین در هر دهه افزایش یافته است. نتایج تحقیق عرب سلغار و همکاران (۲۰۲۲) با بررسی تغییرات اقلیمی در سطح حوزه آبخیز دز کاهش بارندگی را نشان می‌دهد. همچنین دمای حداکثر ۱/۳ تا ۳/۹ درجه سلسیوس و دمای حداقل نیز ۱/۵ تا ۳/۵ درجه سلسیوس در سطح حوزه تغییر خواهد کرد.

1. Stanzel & Hannes
2. GCM
3. Qian
4. Beecham

5. Modala
6. Nilawar & Waikar
7. Dimri

خواهد یافت. نتایج تحقیق مساح بوانی و همکاران (۲۰۲۱) که به بررسی تغییر اقلیم در حوزه آبخیز قره‌سو پرداخته‌اند، نشان داد که در سطح این حوزه افزایش دما و افزایش میزان تبخیر به وجود می‌آید و از طرفی عنوان کرده‌اند که با تغییرات به‌وجودآمده، در آینده تغییراتی در هیدرولوژی حوزه و وقایع جوی ایجاد خواهد شد.

در همین راستا نتایج پژوهش کثیری و همکاران (۲۰۲۰) در سواحل جنوبی دریای خزر نیز کاهش بارندگی و افزایش دمای حداکثر و حداقل را در منطقه نشان داد. در ارتباط با این موضوع حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) که به بررسی چشم‌انداز تغییرات شاخص‌های حدی دما و بارش در استان کردستان پرداخته بودند، نشان داده‌اند که در این منطقه در اثر تغییرات اقلیمی، میزان دما افزایش و میزان بارندگی کاهش



شکل (۱): موقعیت منطقه مورد مطالعه در سطح کشور و موقعیت قرارگیری استان

Figure (1): The location of the studied area in the country and the location of the province

و کهگیلویه و بویراحمد است (شکل ۱). جمعیت منطقه مورد مطالعه این پژوهش براساس سرشماری رسمی کشور در سال ۱۳۹۵ برابر است با ۲۲/۹۸ میلیون نفر که ۲۸/۷۵ درصد از جمعیت کشور را دربر می‌گیرد و مساحت منطقه مورد مطالعه نیز ۳۸۳۵۵۵ کیلومتر مربع که ۲۳/۲۷ درصد از سطح کشور را

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق شامل ۱۱ استان غربی کشور از جمله آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، زنجان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، همدان، فارس، چهارمحال و بختیاری

جدول (۲): ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه

Table (2): The studied synoptic station

ایستگاه	ایستگاه	ایستگاه	ایستگاه	ایستگاه
سینوپتیک خوی	سینوپتیک جلفا	سینوپتیک فسا	سینوپتیک ایلام	سینوپتیک زرینه
مهاباد	مراغه	لار	اسلام‌آباد غرب	الیگودرز
ماکو	میانه	شیراز	کنگاور	بروجرد
ارومیه	سهند	زرقان	کرمانشاه	خرم‌آباد
پیرانشهر	سراب	همدان	روانسر	خدابنده
سردشت	تبریز	ملایر	سرپل ذهاب	زنجان
تکاب	آباده	نهایند	بیجار	قروه
اهر	درود زن	ایوان	سقز	سنندج

بررسی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی نیازمند بهره‌گیری از مدل‌هایی است که بتواند این تغییرات را به‌درستی نمایان کند. در این تحقیق از مدل SDSM بهره گرفته شد که برای اولین بار ویلیبی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲ ارائه کردند. این مدل یک روش نمونه‌برداری مجدد شرطی است که از دو مرحله برای مقیاس‌گامی داده‌های مدل GCM تشکیل شده است (ویلیبی و داوسون، ۲۰۰۷). مراحل کار در این روش به این شکل است که نخست متغیرهای پیش‌بینی‌کننده از جمله دما و بارش را با استفاده از روش‌های رگرسیونی ترکیبی و یک روش تصادفی مولد هواشناسی، کوچک‌مقیاس کرده و در مرحله آخر داده مورد نظر در محل ایستگاه تولید می‌گردد (تسومی^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). در این تحقیق برای واسنجی داده‌ها با استفاده از مدل مذکور از داده‌های بارش و دما ایستگاه‌های هواشناسی در سطح استان‌های مورد مطالعه و داده‌های مرکز ملی پیش‌بینی‌های محیطی در دوره پایه ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۰ بهره گرفته شد. برای ارزیابی مدل‌های مقیاس‌گامی روش‌های شاخص‌های گوناگونی وجود دارد که در این تحقیق از چهار شاخص MAE، RMSE، MAPE، MSE و بهره گرفته شد. میانگین مربعات خطا روشی است برای برآورد میزان خطا که اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و داده‌های مشاهداتی را

تشکیل می‌دهد (جدول ۱). منطقه مورد مطالعه از لحاظ اقلیمی بسیار متفاوت است و دارای اقلیم‌های متفاوتی است که شامل مناطق نیمه‌خشک با اقلیم مدیترانه‌ای همچون سنندج، مناطق نیمه‌مرطوب خشک از جمله مریوان تا مناطقی با اقلیم گرم و خشک شامل مهران و گله‌دار متغیر است. از لحاظ تغییرات دمای نیز شهر زرینه در استان کردستان یکی از سردترین شهرهای کشور و مهران در استان ایلام هم یکی از گرم‌ترین شهرهای در سطح کشور به شمار می‌رود.

جدول (۱): مساحت و جمعیت منطقه مورد مطالعه

Table (1): Area and population of the studied region

ردیف	نام استان	مساحت (کیلومتر مربع)	جمعیت (نفر)
۱	آذربایجان غربی	۳۷۰۵۹	۳۲۶۵۲۱۹
۲	آذربایجان شرقی	۴۵۴۱۹	۴۰۴۰۴۰۰
۳	کردستان	۲۳۳۴۹	۱۶۴۸۱۹۵
۴	زنجان	۲۱۷۷۳	۱۲۶۴۳۲۴
۵	کرمانشاه	۲۵۰۰۹	۱۹۵۲۴۳۴
۶	لرستان	۲۹۳۰۸	۱۷۶۰۶۴۹
۷	ایلام	۲۰۱۰۰	۵۸۰۱۵۸
۸	همدان	۲۰۱۷۳	۱۷۵۸۲۶۸
۹	فارس	۱۲۲۶۰۸	۵۰۵۴۷۰۰
۱۰	چهارمحال و بختیاری	۱۶۴۲۱	۹۴۷۷۶۳
۱۱	کهگیلویه و بویراحمد	۱۶۲۶۴	۷۱۳۰۵۲
	جمع	۳۸۳۵۵۵	۲۲۹۸۵۱۶۲

منبع: مرکز سرشماری عمومی نفوس و مسکن (۱۳۹۵)

روش کار

در تحقیقات اقلیمی، یکی از نیازهای اولیه، اطلاعات بارش و دماست (مساح بوانی و همکاران، ۲۰۲۱)؛ بنابراین آمار ۴۰ ایستگاه سینوپتیک در سطح ۹ استان (آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، کردستان، زنجان، کرمانشاه، لرستان، ایلام، همدان و فارس) و استخراج داده‌های اقلیمی نیز در سطح ۲ استان (چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد) از طریق روش میان‌یابی (به دلیل اینکه داده اقلیمی این دو استان در بسیار از سال‌های مورد مطالعه محدود و ناقص بود و در دسترس نبود) استخراج شد و برای تخمین دمای میانگین، بارش و دمای حداکثر مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۲).

1. Wilby
2. Dawson
3. Tatsumi
4. Mean Squared Error

از چهار روش صحت‌سنجی بعد از تعیین میزان دقت ۴ روش، برای صحت‌سنجی داده‌های دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰، ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ اقدام شد.

پس از اینکه صحت‌سنجی با استفاده از چهار روش مذکور (MSE, MAPE, RMSE و MAE) انجام شد و مورد تأیید قرار گرفت و اطمینان لازم از توانایی مدل در شبیه‌سازی اقلیمی حاصل گردید، در ادامه پارامترهای اقلیمی براساس خروجی مدل CanESM2 تحت سه سناریو RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی شد. سناریو واداشت تابشی تفاوت بین انرژی تابشی دریافتی از خورشید و انرژی بازتاب‌شده توسط زمین به جو است. در هر نسخه از این سه سناریو، اثر انتشار گازهای گلخانه‌ای براساس نقش آن بر سطح واداشت تابشی برحسب وات بر متر مربع طبقه‌بندی شده است (گودرزی و همکاران، ۲۰۱۶). روش کار به این شکل است که داده‌های اقلیمی مورد نیاز روزانه از اول ژانویه ۱۹۹۰ تا پایان دسامبر ۲۰۲۰ برای واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور از داده‌های NCEP دوره پایه که شامل ۴۰ متغیر مستقل اتمسفری است بهره گرفته شد؛ سپس با استفاده از مدل واسنجی‌شده با کمک داده‌های بزرگ‌مقیاس NCEP داده‌های مصنوعی در بازه‌های مورد مطالعه این تحقیق تولید شد. پس از تولید داده‌های روزانه برای دوره‌های ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ از خروجی مدل میزان دمای حداکثر، میانگین دما و بارش برای دوره‌های مطالعاتی در آینده پیش‌بینی و محاسبه شد.

روش کار به این شکل است که داده‌های دیدبانی‌شده را جمع‌آوری کرده، سپس مشخصه آماری داده‌ها استخراج شد و با استفاده از آزمون‌های صحت‌سنجی توانمندی مدل تعیین شد؛ به این شکل که برای داده‌های پایه ۱۹۹۰-۲۰۲۰ مدل اجرا شد تا یک سری داده‌های مصنوعی برای این دوره پایه تهیه گردد، سپس این خروجی‌ها را به منظور ارزیابی عملکرد مدل در بازسازی داده‌ها با مشخصات آماری مشاهداتی مقایسه شد و تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و بازتولیدی نشان می‌دهد که مدل سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای انتخابی و خروجی مدل اقلیمی GCM را به داده‌های دوره پایه

نشان می‌دهد؛ مقدار این شاخص همیشه مثبت است و از بازه صفر تا مثبت بی‌نهایت متغیر است و یک روش خوب برای صحت‌سنجی و مقایسه خطاهای پیش‌بینی‌شده است و از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود (عرب سلگار و همکاران، ۲۰۲۲). مجذور میانگین مربعات خطا بین دو مجموعه از داده‌ها، میزان خطا را اندازه‌گیری می‌کند. از این روش برای نشان دادن اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و داده‌های شبیه‌سازی‌شده استفاده می‌شود. این شاخص در واقع میانگین خطاهای موجود را زمانی نشان می‌دهد که هدف ما ارزیابی دقت داده‌های استخراجی باشد و از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود (لین و همکاران، ۲۰۰۶). میانگین مطلق خطا برای مقایسه خطای نسبی داده به داده مقادیر شبیه‌سازی‌شده به کار می‌رود و از طریق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. میانگین درصد قدر مطلق خطای یک روش جهت برآورد درصد خطا برای بررسی داده‌های استخراجی نسبت به داده‌های واقعی است و از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i x_j)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| \quad (3)$$

$$MAPE(Y\hat{Y}) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Y - \hat{Y}}{Y} \right| = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{Y_i} \right| \quad (4)$$

در روابط فوق Y_i و X_i داده‌های مشاهداتی \hat{Y}_i و \hat{X}_i داده‌های شبیه‌سازی شد و N تعداد داده‌هاست.

برای بررسی دقت ارزیابی صحت، در ابتدا داده‌های سال ۱۹۹۰-۲۰۲۰ به‌عنوان داده اصلی و واقعی در نظر گرفته شد. سپس با استفاده از داده‌های ۱۹۹۰-۲۰۲۰ که داده واقعی هستند، شبیه‌سازی صورت گرفت و میزان دقت داده‌های استخراجی مربوط به دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ به نسبت ۱۹۹۰-۲۰۰۵ بررسی و اندازه‌گیری شد و پس از تأیید با داده‌های واقعی همان سال مقایسه گردید و در نهایت با استفاده

1. root-mean-square error
2. Lin
3. Mean Absolute Error
4. Mean Absolute Percentage Error

جدول (۳): ارزیابی مدل ریزمقیاس گردانی SDSM با استفاده از شاخص‌های مختلف
Table (3): Evaluation of the SDSM downscaling model using various indices.

نام ایستگاه	پارامترهای اقلیمی	MAE	MSE	RMSE	MAPE
خوی RCP2.6	بارش	0.05	0.005	0.07	9.05
	دمای میانگین	0.02	0.008	0.10	8.67
	دمای حداکثر	0.03	0.010	0.04	7.59
مهاباد RCP2.6	بارش	0.01	0.006	0.09	6.81
	دمای میانگین	0.02	0.000	0.02	1.48
	دمای حداکثر	0.02	0.000	0.02	1.48
ماکو RCP2.6	بارش	0.06	0.003	0.08	9.61
	دمای میانگین	0.02	0.001	0.03	1.81
	دمای حداکثر	0.02	0.001	0.03	1.31
ارومیه RCP2.6	بارش	0.01	0.009	0.10	9.79
	دمای میانگین	0.01	0.000	0.01	1.06
	دمای حداکثر	0.02	0.001	0.02	1.17
خوی RCP4.5	بارش	0.01	0.01	0.01	0.01
	دمای میانگین	0.04	0.04	0.04	0.04
	دمای حداکثر	0.01	0.01	0.01	0.01
مهاباد RCP4.5	بارش	0.01	0.01	0.01	0.01
	دمای میانگین	0.02	0.02	0.02	0.02
	دمای حداکثر	0.02	0.02	0.02	0.02
ماکو RCP4.5	بارش	0.07	0.07	0.07	0.07
	دمای میانگین	0.01	0.01	0.01	0.01
	دمای حداکثر	0.02	0.02	0.02	0.02
ارومیه RCP4.5	بارش	0.07	0.07	0.07	0.07
	دمای میانگین	0.02	0.02	0.02	0.02
	دمای حداکثر	0.02	0.02	0.02	0.02
خوی RCP8.5	بارش	0.01	0.003	0.09	7.74
	دمای میانگین	0.04	0.007	0.02	5.28
	دمای حداکثر	0.01	0.000	0.01	3.03
مهاباد RCP8.5	بارش	0.01	0.003	0.09	7.74
	دمای میانگین	0.02	0.001	0.02	1.55
	دمای حداکثر	0.02	0.001	0.02	1.55
ماکو RCP8.5	بارش	0.09	0.001	0.05	7.78
	دمای میانگین	0.02	0.001	0.03	1.11
	دمای حداکثر	0.02	0.001	0.03	1.33
ارومیه RCP8.5	بارش	0.07	0.006	0.06	8.38
	دمای میانگین	0.02	0.001	0.03	2.33
	دمای حداکثر	0.03	0.001	0.03	1.84

بیشترین مقدار MAPE، MSE، RMSE و MAE در سناریو اول (RCP2.6) به ترتیب با ۰/۱۰، ۱۰/۵۷، ۰/۰۱ و ۰/۱۰ است که به ترتیب در ایستگاه خوی (برای پارامتر دمای

اعمال و تغییرات در آینده را شبیه‌سازی می‌کند. ورودی و خروجی این مدل به صورت ایستگاهی است.

نتایج پژوهش

برای واسنجی داده‌های طبق مدل SDSM، در ابتدا مدل برای داده‌های دوره‌ای آماری ۱۹۹۰-۲۰۲۰ اجرا شد. سپس داده‌های شبیه‌سازی شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه و بررسی شد؛ در این مدل قبل واسنجی لازم است پارامترهای مستقل جوی که بیشترین میزان همبستگی با داده‌های اقلیمی مورد بررسی (دمای میانگین، دمای حداکثر و بارش) در این تحقیق را دارند، تعیین و مشخص گردد. در این خصوص متغیرهایی همچون فشار اتمسفری در سطح دریا، متوسط دما در ارتفاع دومتری از سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیشترین ضریب همبستگی را با دمای میانگین، بارش و دمای حداکثر در سطح منطقه مورد مطالعه دارند. نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای حداکثر، دمای میانگین و بارش توسط مدل SDSM تحت سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) با استفاده از شاخص MAPE، MSE، RMSE و MAE مورد ارزیابی گرفت و با توجه به بالا بودن تعداد ایستگاه برای نمونه، ۴ ایستگاه از ۴۰ در جدول (۳) آورده شده است. نتایج بررسی مدل با ۴ شاخص مذکور نشان داد که اختلاف معناداری بین داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در سطح معناداری ۰/۰۵ وجود ندارد و در این سطح معناداری ۰/۰۵ درصد قابل قبول است. بررسی دقت مدل SDSM در ۴۰ ایستگاه مطالعاتی نشان داد که این مدل دقت بیشتر در پارامترهای مربوط به دمای میانگین و حداکثر به نسبت بارش دارد و هرچه میزان نوسانات بارش در ایستگاه‌ها مطالعاتی بیشتر، دقت این مدل کمتر و هرچه بارش ایستگاه کمتر و منظم‌تر باشد، این مدل از دقت بیشتری برخوردار است. به بیانی دیگر این مدل در بررسی پارامترهای مربوط به دما از دقت بسیار بیشتر نسبت به بارش برخوردار است.

که به ترتیب در ایستگاه تبریز (برای پارامتر دمای حداکثر)، ایستگاه اسلام‌آباد غرب (برای پارامتر بارش)، برای چند ایستگاه شامل خوی، مهاباد، جلفا، فسا، زرقان، نهاوند و زنجان (پارامترهای مربوط به دما و بارش) و برای ایستگاه زرینه (برای پارامتر بارش) رخ داده و کمترین مقدار به آن به ترتیب در سناریوی سوم ۰/۷۳، ۰/۰۰، ۰/۰۰ و ۰/۰۰ است.

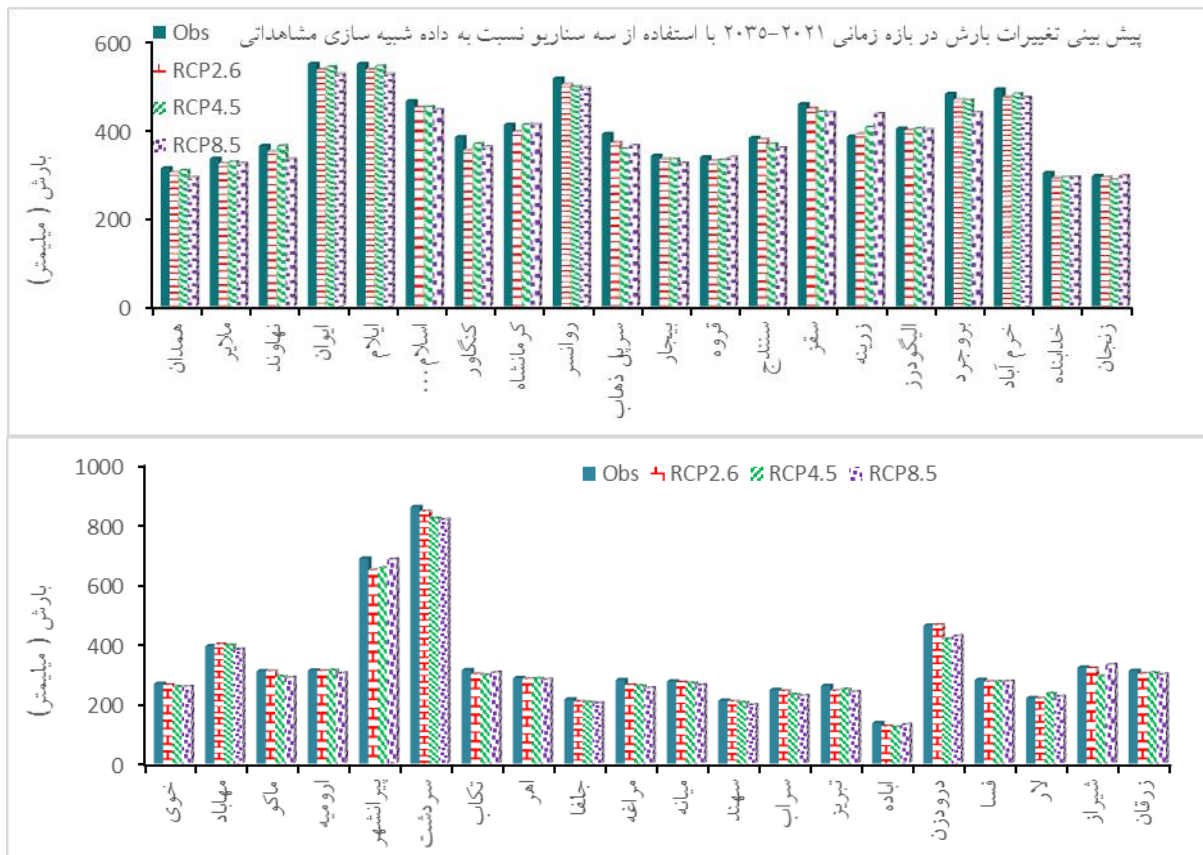
بررسی پارامتر اقلیمی بارش

نتایج به دست آمده از روش مدل مقیاس گاهی SDSM برای بررسی پارامترهای اقلیمی بارش با استفاده از سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 انجام شد. نتایج نشان داد که سناریو اول (RCP2.6) به نسبت دو سناریوی دیگر از دقت بیشتری در پیش‌بینی بارش برای دو دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ برخوردار است و در بیشتر موارد بارش را به نسبت داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی شده، با اختلاف کمتری پیش‌بینی کرده است.

حداکثر، ایستگاه سنندج (برای پارامتر بارش)، ایستگاه درود زن (برای پارامتر بارش) و ایستگاه پیرانشهر (برای پارامتر بارش) رخ داده و کمترین مقدار آن به ترتیب در سناریو اول ۰/۰۰ (در اکثر ایستگاه مورد بررسی برای پارامترهای مربوط به دما و بارش)، ۰/۱۲ (ایستگاه کنگاور برای بارش)، ۰/۰۰ (ایستگاه ایلام برای دمای حداکثر) و ۰/۰۰ (مراغه برای بارش و ایلام برای دمای حداکثر) است.

بیشترین مقدار MAPE، RMSE، MAE و در سناریوی دوم (RCP4.5) به ترتیب با ۰/۰۱، ۱۶/۹۰، ۰/۱۰ و ۰/۱۰ است که به ترتیب در ایستگاه جلفا (برای پارامتر دمای حداکثر)، ایستگاه ارومیه (برای پارامتر بارش)، ایستگاه نهاوند (برای پارامتر بارش) و ایستگاه زرینه (برای پارامتر بارش) رخ داده و کمترین مقدار به آن به ترتیب در سناریوی دوم ۰/۰۰، ۰/۴۱ و ۰/۰۰ است.

بیشترین مقدار MAPE، RMSE، MAE و در سناریوی سوم (RCP8.5) به ترتیب با ۰/۰۱، ۱۰/۸۰، ۰/۰۹ و ۰/۱۰ است



شکل (۲): مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) در

بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶

Figure (2): Annual observed and simulated precipitation values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2036-2100.



شکل (۳): مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بارش به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5) در باز زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵

Figure (3): Annual observed and simulated precipitation values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2021-2035

بررسی بارش با استفاده از مدل مقیاس گاهی SDSM در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۳۵ تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۲/۵، ۳/۱۵ و ۳/۸۶ درصد کاهش بارندگی را نشان می‌دهد و در دوره آماری ۲۰۳۶ تا ۲۱۰۰ میزان تغییرات به ترتیب ۱۰/۰۲، ۱۳/۳۱ و ۱۵/۷۳ درصد است. کاهش بازنند در دوره آماری دوم بسیار شدیدتر از دوره آماری اول است (جدول ۴).

بررسی پارامتر اقلیمی دمای میانگین

نتایج به دست آمده از روش مدل مقیاس گاهی SDSM برای بررسی پارامترهای اقلیمی دمای میانگین با استفاده از سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 انجام شد. نتایج نشان داد که سناریوی دوم (RCP4.5) به نسبت دو سناریوی دیگر از دقت بیشتری در پیش‌بینی دمای میانگین برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ برخوردار است و برای دوره ۲۰۳۵-۲۰۳۶ سناریوی اول (RCP2.6) اختلاف کمتری با داده‌های مشاهده‌ای

برای نمایش بهتر و اطمینان از صحت پیش‌بینی‌ها و همچنین بررسی عدم قطعیت در سناریوهای مورد بررسی، به مقایسه مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به صورت بلندمدت در طول دوره مورد بررسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودارهای مقایسه‌ای پرداخته شد. در این بررسی به علت تعدد زیاد نمودارهای ماهانه و همین‌طور تعداد بالای ایستگاه‌های مطالعاتی از آوردن اطلاعات ایستگاه‌ها به صورت ماهانه خودداری شد و فقط نتایج بلندمدت آن آورده شده است. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بارش در سطح ۴۰ ایستگاه مورد بررسی اختلاف چندانی باهم ندارند؛ اما در بررسی‌های به عمل آمده، نتایج حاکی از آن است که سناریوی اول اکثر ایستگاه‌ها اختلاف کمتری نسبت به مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده به نسبت دو سناریوی دیگر دارد؛ در نتیجه، سناریوی اول از دقت بیشتری برخوردار است (شکل ۲ و ۳).

مشاهداتی دارد و در این بازه زمانی از دقت بیشتری برخوردار است؛ زیرا در بیشتر موارد دمای میانگین را به نسبت داده‌های مشاهداتی شبیه‌سازی شده، با اختلاف کمتری پیش‌بینی کرده است (شکل ۴ و ۵). همان‌طور که از نمودارها مشخص است، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای میانگین در سطح ۴۰ ایستگاه مورد بررسی، اختلاف چندانی باهم ندارند؛ اما در بررسی‌های به‌عمل‌آمده، نتایج حاکی از آن است که در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ سناریوی دوم در اکثر ایستگاه‌ها اختلاف کمتری از مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به نسبت دو سناریوی دیگر دارد؛ در نتیجه سناریوی دوم از دقت بیشتری برخوردار است. اما در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ سناریوی اول اختلاف کمتری نسبت به داده‌های

مشاهداتی دارد و میزان دقت آن بیشتر است (شکل ۴ و ۵). بررسی دمای میانگین با استفاده از مدل مقیاس کاهی SDSM در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۳۵ تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب ۰/۰۵، ۰/۱۴ و ۵/۰۷ درصد کاهش و افزایش میانگین دما را نشان می‌دهد و در دوره آماری ۲۰۳۶ تا ۲۱۰۰ میزان تغییرات به ترتیب ۴/۴۷، ۴/۲۷ و ۵/۰۵ درصد است که نشان از افزایش میانگین دما در این بازه زمانی است. در تمامی سناریوها در هر دو دوره مطالعاتی، افزایش دما در سطح منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد به‌جز سناریوی اول در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ که به‌میزان ۰/۰۵ درصد میانگین دما را در سطح ۴۰ ایستگاه مطالعاتی، کاهش را نشان داده است (جدول ۵).

جدول (۴): تغییرات میزان بارش در دوره‌های آماری مورد مطالعه و تحت سناریوهای مختلف

Table (4): Variations in precipitation levels during the studied statistical periods under different scenarios.

سناریو	۲۰۳۶-۲۱۰۰	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۰۲۱-۲۰۳۵	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۰۲۱-۲۰۳۵	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۱۰۰-۲۰۳۶	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۱۰۰-۲۰۳۶
RCP2.6	۳۳۱/۲۹	۹/۲۳	۲/۵۰	۳۶/۹۲	۱۰/۰۲
RCP4.5	۳۱۹/۱۸	۱۱/۶۱	۳/۱۵	۴۹/۰۳	۱۳/۳۱
RCP8.5	۳۱۰/۲۸	۱۴/۲۱	۳/۸۶	۵۷/۹۲	۱۵/۸۳
مشاهداتی	۳۳۸/۲۱	۳۳۸/۲۱	-	-	-



شکل (۴): مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده دمای میانگین به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵

Figure (4): Annual observed and simulated mean temperature values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2021-2035



شکل (۵): مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌ی دما میانگین به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو (RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5) در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰

(RCP8.5) در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰

Figure (5): Annual observed and simulated mean temperature values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2036-2100

نسبت به مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به نسبت دو سناریو دیگر دارد. در نتیجه سناریوی دوم از دقت بیشتری برخوردار است، اما در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ سناریوی اول اختلاف کمتری نسبت به داده‌های مشاهداتی دارد و میزان دقت آن بیشتر است (شکل ۶ و ۷).

همان‌طور که از نمودارها مشخص است، مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌ی دمای حداکثر در سطح ۴۰ ایستگاه مورد بررسی اختلاف چندانی باهم ندارند؛ اما در بررسی‌های به‌عمل آمده، نتایج حاکی از آن است که در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ سناریوی دوم در اکثر ایستگاه‌ها اختلاف کمتری

جدول (۵): تغییرات میزان دمای میانگین (۴۰ ایستگاه) در دوره‌های آماری مورد مطالعه و تحت سناریوهای مختلف

Table (5): Variations in mean temperature levels (across 40 stations) during the studied statistical periods under different scenarios.

سناریو	۲۰۳۵-۲۰۲۱	۲۱۰۰-۲۰۳۶	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی
RCP2.6	۱۴/۸۶	۱۵/۵۳	-۰/۰۱	-۰/۰۵	۰/۶۶	۴/۴۷
RCP4.5	۱۴/۸۹	۱۵/۵۰	۰/۰۲	۰/۱۴	۰/۶۳	۴/۲۷
RCP8.5	۱۵/۶۲	۱۵/۶۲	۰/۷۵	۵/۰۷	۰/۷۵	۵/۰۵
مشاهداتی	۱۴/۸۷	۱۴/۸۷	-	-	-	-

بارش کم طی هر سه سناریو و هر دو بازه زمانی مورد مطالعه افزایش را نشان می‌دهد. مناطق جنوبی منطقه مورد مطالعه از جمله استان فارس و کهگیلویه و بویراحمد طبق سه سناریو در بازه‌های زمانی مذکور با کاهش بارندگی مواجه خواهد شد؛ به‌گونه‌ای که در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ طبق هر سه سناریو، اکثر مناطق در این دو استان جزء مناطق با بارش کمتر از ۲۶۸ میلی‌متری قرار می‌گیرند (۸، ۹ و ۱۰).

بررسی تغییرات دمای حداکثر در هر دو بازه زمانی مورد مطالعه براساس هر سه سناریو طبق نقشه‌های استخراجی افزایشی است، در بررسی نقشه‌های استخراجی از داده‌های واقعی آخرین طبقه درخصوص دمای حداکثر ۳۲-۳۸ درجه سانتی‌گراد است؛ این درحالی است که در سناریوی دوم و سوم در هر دوره مطالعاتی دمای حداکثر به‌صورت میانگین به ۳۲-۳۹ درجه سانتی‌گراد می‌رسد. طبق بررسی دمای حداکثر در مناطق غربی از جمله استان کردستان، کرمانشاه، ایلام و آذربایجان غربی بیشترین تغییرات را خواهد داشت و در استان فارس، چهارمحال و بختیاری، لرستان و کهگیلویه و بویراحمد طبق نقشه‌های استخراجی دمای حداکثر نسبت به دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۰ افزایش را نشان می‌دهد. درکل طبق نقشه‌های استخراجی برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ مناطق بارنگ نارنجی و قرمز (مناطق با دمای بیشینه بالا) در سطح منطقه مورد مطالعه افزایش و مناطق بارنگ آبی (دمای بیشینه پایین) افزایش می‌یابد (۸، ۹ و ۱۰).

بررسی تغییرات دمای میانگین در نقشه‌های استخراجی نیز در هر دو بازه زمانی مورد مطالعه و طبق هر سه سناریو افزایش را نشان می‌دهد. بیشترین تغییر دمای میانگین طبق نقشه‌ها در جنوب استان فارس و مناطق شمال منطقه مورد مطالعه از جمله استان‌های آذربایجان شرقی، غربی، کردستان، زنجان رخ می‌دهد. درکل با توجه به نقشه‌های استخراجی می‌توان استنباط کرد در تمامی منطقه مورد مطالعه دما دچار تغییر و تحول خواهد شد و این تغییر و تحولات افزایشی است (۸، ۹ و ۱۰).

بررسی دمای حداکثر با استفاده از مدل مقیاس کاهی SDSM در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۳۵ تحت سه سناریوی RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به‌ترتیب ۰/۹۵، ۱/۰۴ و ۴/۱۶ درصد افزایش دما در سطح منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در دوره آماری ۲۰۳۶-۲۱۰۰ نیز میزان تغییرات به‌ترتیب ۳/۹۹، ۳/۸۰ و ۴/۱۶ درصد است که نشان از افزایش دمای حداکثر در این بازه زمانی است. افزایش دمای حداکثر در دوره آماری دوم بسیار شدیدتر از دوره آماری اول است (جدول ۶).

بررسی میزان تغییرات دمای میانگین، دمای حداکثر و بارش در دوره‌های مطالعاتی ۱۹۹۰-۲۰۲۰، ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶-۲۱۰۰ براساس سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در شکل (۸) (۹) و (۱۰) آورده شده است. میزان بارش در هر دو بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۵-۲۱۰۰ براساس هر سه سناریو کاهش یافته است. بررسی نقشه‌های بارش نشان می‌دهد که در هر سه سناریو، مناطق آبی‌رنگ که نشان از مناطق با بارش بیش از ۴۰۰ میلی‌مترند، طی دوره‌های مطالعاتی کاهش یافته و مناطق قرمز رنگ که نشان از مناطقی با بارندگی کمتر است، در سطح منطقه مورد مطالعه طی بازه‌های زمانی مذکور افزایش یافته است. در نقشه سال ۱۹۹۰-۲۰۲۰ که طبق داده‌های واقعی ترسیم شده است، در شمال منطقه مورد مطالعه (آذربایجان شرقی) فقط چند منطقه با بارش کم مشاهده شد؛ باین‌حال طبق نتایج پژوهش در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵، گسترش مناطق کم بارش پیش‌بینی می‌شود تا حدی که در پیش‌بینی سناریوی سوم در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰، مناطق با بارش کم به استان‌های زنجان، آذربایجان غربی گسترش می‌یابد. مناطق پربارش منطقه مورد مطالعه در استان‌های کردستان، کرمانشاه، چهارمحال و بختیاری، ایلام و لرستان واقع شده است که جزء مناطقی با بارش بیش از ۴۰۰ میلی‌متر قرار می‌گیرند، در هر دو دوره‌های مورد مطالعه به‌شدت مساحت این مناطق تحت هر سه سناریو و طی هر دو بازه زمانی کاهش یافته است؛ به‌طوری‌که در سناریوی RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ مناطق با بارش بیش از ۴۰۰ میلی‌متر فقط به یک نوار باریک در مناطق مرزی استان کردستان و کرمانشاه ختم می‌شود و از طرفی مناطق با



شکل (۶): مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده دما حداکثر به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵

Figure (6): Annual observed and simulated maximum temperature values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2021-2035

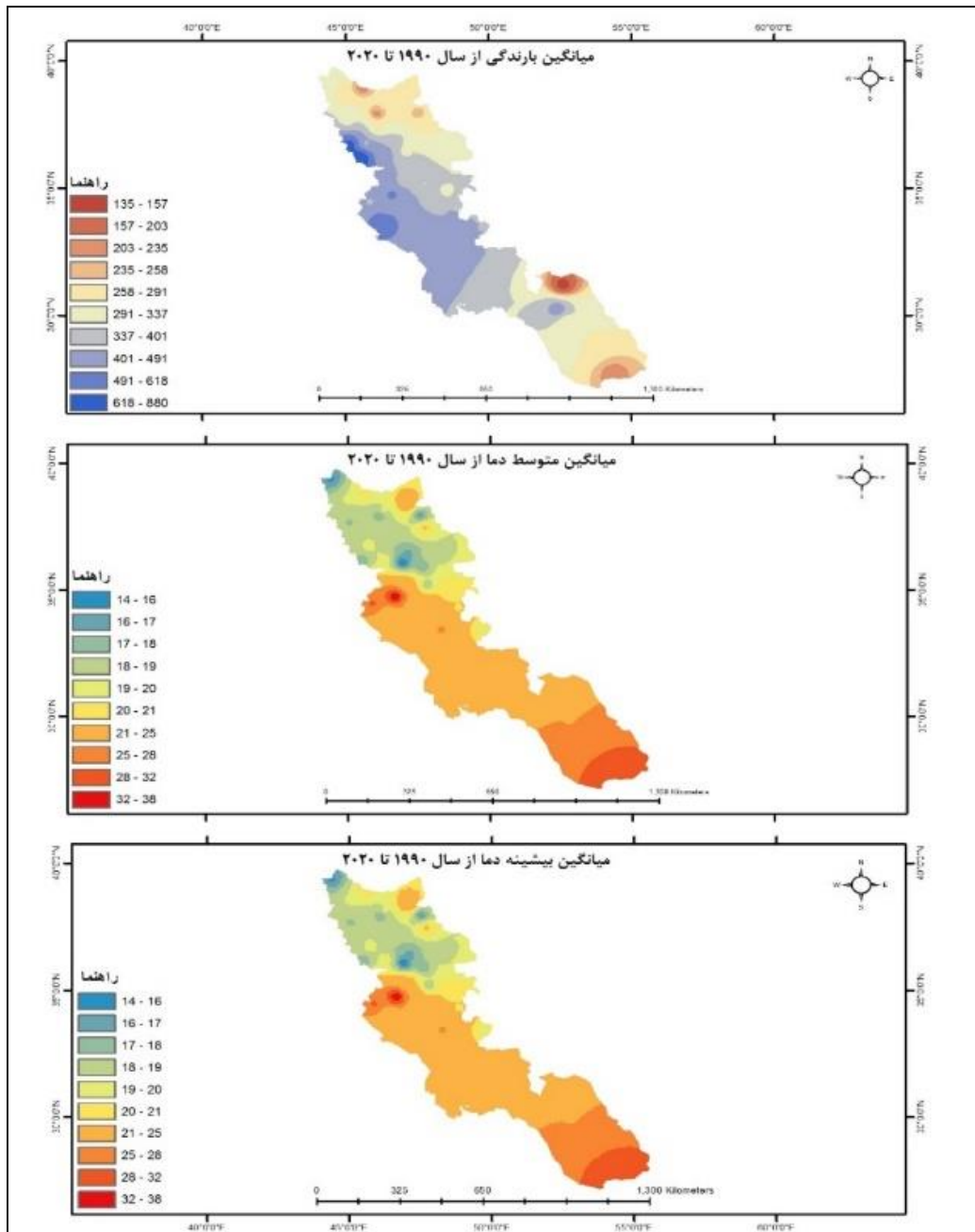


شکل (۷): مقادیر مشاهداتی و شبیه سازی شده دما حداکثر به صورت سالانه توسط مدل SDSM و تحت سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰

Figure (7): Annual observed and simulated maximum temperature values by the SDSM model under three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) for the time period 2036-2100

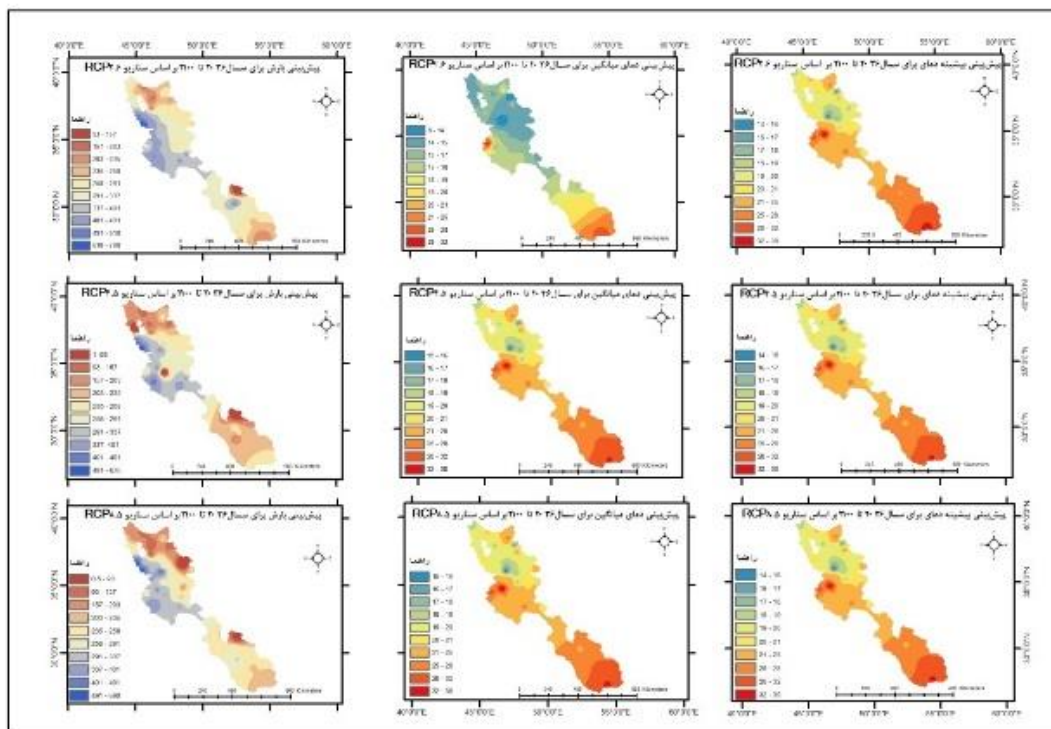
جدول (۶): تغییرات میزان دمای حداکثر (۴۰ ایستگاه) در دوره‌های آماری مورد مطالعه و تحت سناریوهای مختلف
Table (6): Variations in maximum temperature levels (across 40 stations) during the studied statistical periods under different scenarios.

سناریو	۲۰۳۵-۲۰۲۱	۲۱۰۰-۲۰۳۶	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۰۳۵-۲۰۲۱	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۰۳۵-۲۰۲۱	میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۱۰۰-۲۰۳۶	درصد میزان تغییرات نسبت به داده‌های مشاهداتی ۲۱۰۰-۲۰۳۶
RCP2.6	۲۱/۶۵	۲۲/۳۰	۰/۲۰	۰/۹۵	۰/۸۶	۳/۹۹
RCP4.5	۲۱/۶۷	۲۲/۲۶	۰/۲۲	۱/۰۴	۰/۸۱	۳/۸۰
RCP8.5	۲۲/۳۴	۲۲/۳۴	۰/۸۹	۴/۱۶	۰/۸۹	۴/۱۶
مشاهداتی	۲۱/۴۵	۲۱/۴۵	-	-	-	-



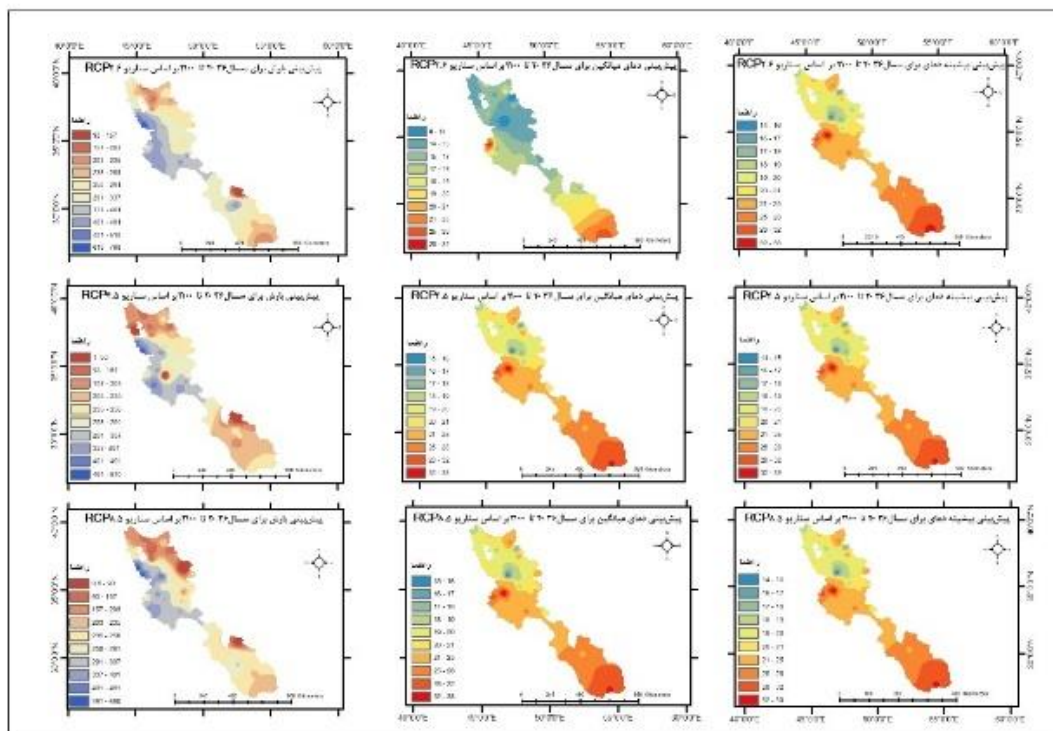
شکل (۸): پیش‌بینی تغییرات بارش، دمای میانگین، دمای حداکثر طی بازه زمانی ۱۹۹۰-۲۰۲۰

Figure (8): Prediction of changes in precipitation, mean temperature, and maximum temperature during the time period 1990-2020



شکل (۹): پیش‌بینی تغییرات بارش، دمای میانگین، دمای حداکثر طی بازه زمانی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ با استفاده از سه سناریو (RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5)

Figure (9): Prediction of changes in precipitation, mean temperature, and maximum temperature during the time period 2021-2035 using three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5)



شکل (۱۰): پیش‌بینی تغییرات بارش، دمای میانگین، دمای حداکثر طی بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۱۰۰ با استفاده از سه سناریو (RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5)

Figure (10): Prediction of changes in precipitation, mean temperature, and maximum temperature during the time period 2035-2100 using three scenarios (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5)

بررسی تغییرات دما میانگین، بارش و دمای حداکثر براساس RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱

بررسی نقشه‌های تغییرات بارش در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱ نشان از کاهش بارش طبق سناریوی اول (RCP2.6) و سناریوی دوم (RCP4.5) از بازه ۱-۲/۵ میلی‌متر تا ۱۹-۶ میلی‌متر در سطح منطقه مورد مطالعه است. بیشترین کاهش بارندگی در نوار مرزی استان کردستان، کرمانشاه، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد و شمال استان فارس در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱ رخ خواهد داد و کمترین تغییرات بارش طبق این سناریو در جنوب استان فارس و زرینه در استان کردستان رخ خواهد داد. بررسی بارش طبق سناریوی سوم (RCP8.5) از بازه ۱-۱۰ میلی‌متر تا ۱۹-۳۹ میلی‌متر کاهش را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد و طبق این سناریو بیشترین تغییرات بارش در استان‌های کرمانشاه، ایلام و نوار مرزی استان کردستان رخ می‌دهد (شکل ۱۱).

بررسی نقشه تغییرات دمای میانگین در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱ نشان از افزایش دمای میانگین طبق سناریوی اول حداقل ۰/۱۳-۰/۰۰۰۵ تا حداکثر ۰/۴۶-۱ درجه سانتی‌گراد در سطح منطقه مورد مطالعه در سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۳۵ است. بیشتر افزایش تغییرات میانگین دما در استان‌های آذربایجان غربی و شرقی و شمال شرق استان فارس و کمترین تغییرات دمای میانگین در استان کرمانشاه و شمال استان کهگیلویه و بویراحمد رخ خواهد داد. طبق سناریوی دوم علاوه‌بر مناطق ذکرشده، در مناطق مرزی استان کرمانشاه نیز افزایش دمای میانگین رخ خواهد داد. طبق سناریوی سوم از بازه ۰/۰۶-۰/۱۳ تا ۰/۴۶-۱ درجه سانتی‌گراد در سطح منطقه مورد مطالعه افزایش دما میانگین خواهیم داشت که بیشترین میزان افزایش دما در استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و شمال شرق استان زنجان و جنوب استان فارس رخ خواهد داد و کمترین تغییرات در بخش‌های مرکز و شرقی استان‌های کرمانشاه، کردستان و لرستان خواهد بود (شکل ۱۱).

بررسی نقشه تغییرات دمای حداکثر در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱ نشان از افزایش دمای حداکثر طبق هر سه سناریو

از بازه ۰/۱۲-۰ تا ۰/۵-۱ درجه سانتی‌گراد در سطح منطقه مورد مطالعه است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر طبق هر سه سناریو در استان آذربایجان غربی، نوار مرزی شمال استان کردستان و شمال شرق استان فارس و کمترین تغییرات در مناطق مرکزی استان لرستان و کرمانشاه و شمال استان کهگیلویه و بویراحمد رخ خواهد داد (شکل ۱۱).

بررسی تغییرات دما میانگین، بارش و دمای حداکثر براساس RCP2.6, RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶

بررسی نقشه‌های تغییرات بارش در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶ نشان از کاهش بارش طبق سناریوی اول (RCP2.6) از بازه ۱-۳۱ میلی‌متر تا ۹۹-۱۵۴ میلی‌متر در سطح منطقه مورد مطالعه است. بیشترین کاهش بارندگی در نوار مرزی شمال استان کردستان، کرمانشاه، ایلام در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶ رخ خواهد داد و کمترین تغییرات بارش طبق این سناریو در استان زنجان، کهگیلویه و بویراحمد، چهارمحال بختیاری و فارس رخ خواهد داد؛ اما در سناریوی دوم بیشتر مناطق مرزی استان کردستان، کرمانشاه و شمال استان فارس به‌عنوان مناطق با کاهش بارندگی شدید پیش‌بینی کرده است. بررسی بارش طبق سناریوی سوم (RCP8.5) از بازه ۱-۳۱ میلی‌متر تا ۹۹-۱۷۶ میلی‌متر کاهش را در سطح منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد و طبق این سناریو بیشترین تغییرات بارش در استان‌های کرمانشاه، آذربایجان شرقی و غربی، چهارمحال و بختیاری، کهگیلویه و بویراحمد، ایلام و نوار مرزی استان کردستان رخ می‌دهد در واقع در سناریوی سوم تغییرات بارش در سطح منطقه مورد مطالعه شدیدتر از دو سناریوی دیگر است (شکل ۱۲).

بررسی نقشه تغییرات دمای میانگین در بازه زمانی ۲۱۰۰-۲۰۳۶ نشان از افزایش دمای میانگین طبق سه سناریو در سطح منطقه مورد مطالعه است. بیشتر افزایش تغییرات میانگین دما در استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و جنوب و شمال شرق استان فارس و کمترین تغییرات دمای میانگین در استان کرمانشاه، کردستان، زنجان، چهارمحال بختیاری و شمال استان کهگیلویه و بویراحمد رخ خواهد داد. درکل طبق هر سه سناریو در تمامی منطقه مورد مطالعه افزایش دمای

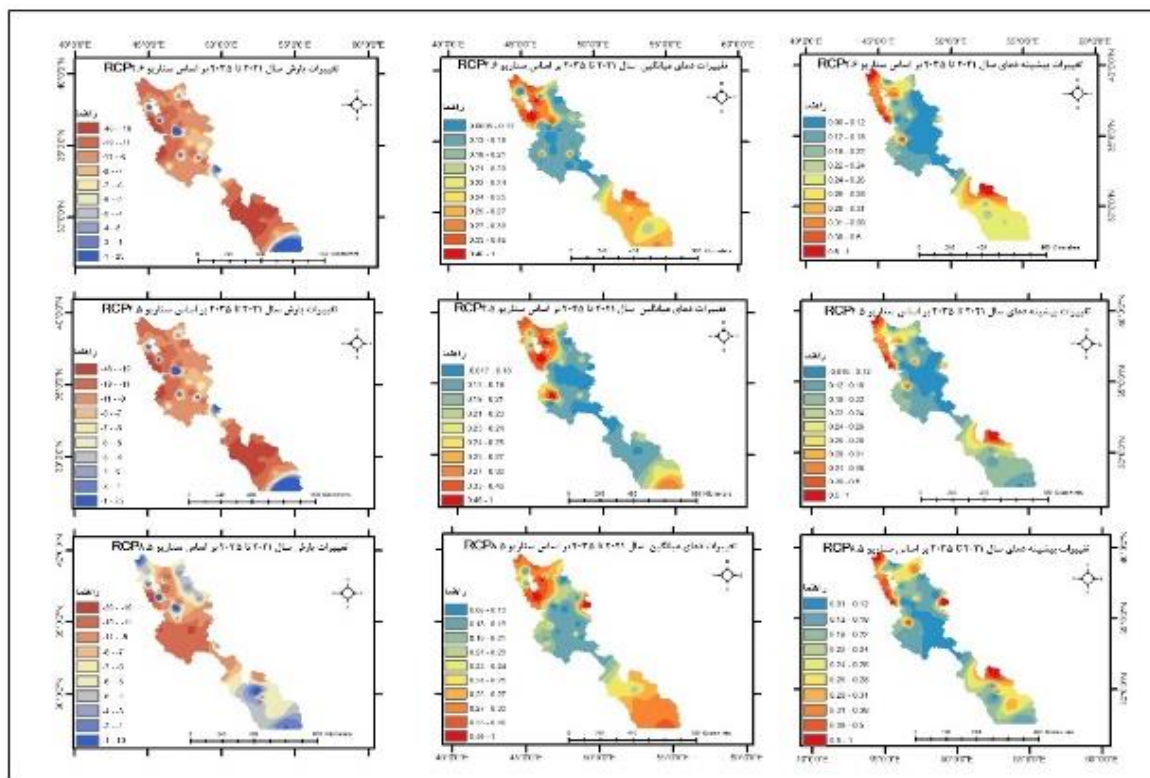
دانسته‌اند. بررسی تغییرات بارش در سطح ۴۰ ایستگاه و در ۱۱ استان مورد مطالعه، در هر دو دوره مطالعاتی ۲۰۲۱-۲۰۳۵ و ۲۰۳۶ تا ۲۱۰۰ کاهش بارندگی را نشان می‌دهد که در دوره دوم کاهش بارندگی تحت هر سه سناریو شدیدتر از دوره اول (۲۰۲۱-۲۰۳۵) ارزیابی شده است؛ به‌گونه‌ای که میانگین بارندگی طبق هر سه سناریو از ۳۶/۹۲ تا ۵۷/۹۲ میلی‌متر به‌صورت میانگین در سطح ایستگاه‌های مطالعاتی کاهش می‌یابد. در همین راستا حیدری و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی دما و بارش در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه نشان دادند که برآیند میزان بارش در سطح این حوزه روند کاهشی خواهد داشت و همین‌طور حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳) که به بررسی چشم‌انداز تغییرات شاخص‌های بارش در استان کردستان پرداخته‌اند نیز کاهش بارندگی در سطح این استان گزارش کرده‌اند که در راستای نتایج این پژوهش است. اما نتایج تحقیق نلوار و ویکار (۲۰۱۹) که تغییرات بارش در کشور هند را مورد بررسی قرار دادند، افزایش میزان بارش تحت هر دو سناریو گزارش نموده‌اند که در تضاد با نتیجه این پژوهش است.

میانگین اتفاق خواهد افتاد و میزان این تغییرات از ۰/۱۳ تا ۱ درجه سانتی‌گراد متغیر خواهد بود (شکل ۱۲).

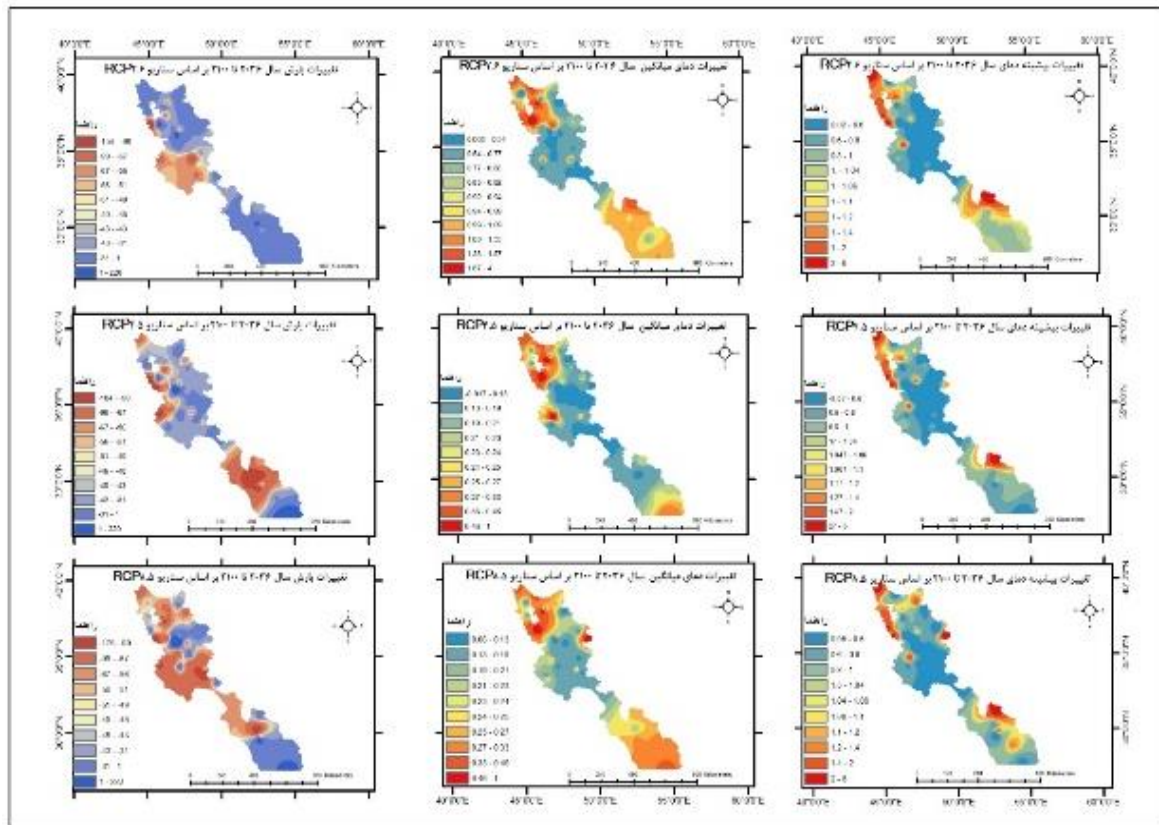
بررسی نقشه تغییرات دمای حداکثر در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰ نشان از افزایش دمای حداکثر طبق هر سه سناریو از بازه ۰/۰۲ تا ۶ درجه سانتی‌گراد در سطح منطقه مورد مطالعه است. بیشترین تغییرات دمای حداکثر طبق هر سه سناریو در استان آذربایجان غربی، نوار مرزی شمال استان کردستان و شمال شرق استان فارس و کمترین تغییرات در مناطق مرکزی استان لرستان و کرمانشاه و شمال استان کهگیلویه و بویراحمد رخ خواهد داد (شکل ۱۲).

بحث

در این تحقیق با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته درخصوص مدل‌های مختلف برای بررسی تغییرات اقلیمی، مدل مقیاس گاهی SDSM به‌عنوان مدل تحقیق با توجه به دقت خوب آن، انتخاب شد که عرب سلغار و همکاران (۲۰۲۲) و تسومی و همکاران (۲۰۱۳) نیز این مدل را در برای بررسی روند تغییرات اقلیمی برای دما و بارش استفاده کرده و آن را مناسب و کارا



شکل (۱۱): بررسی تغییرات دما میانگین، بارش و دمای حداکثر براساس RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۳۵-۲۰۲۱
 Figure (11): Examination of changes in mean temperature, precipitation, and maximum temperature based on RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios in the time period of 2021-2035



شکل (۱۲): بررسی تغییرات دما میانگین، بارش و دمای حداکثر براساس RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 در بازه زمانی ۲۰۳۶-۲۱۰۰

Figure (12): Examination of changes in mean temperature, precipitation, and maximum temperature based on RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios in the time period of 2036-2100

بین‌الملل قرار گرفته است و از طرفی با توجه به اقلیم شکننده کشور ما این تغییرات برای ما بسیار حائز اهمیت است. مناطقی مطالعاتی در این پژوهش با توجه به این موضوع که یکی از اصلی‌ترین مناطق در تأمین آب استان‌های مرکزی و غربی کشورند، جزء قطب تولید محصولات کشاورزی به شمار می‌روند و بیشترین میزان بارندگی در این مناطق رخ می‌دهد (به‌جز مناطق شمالی کشور)؛ در نتیجه هرگونه تغییر در آب‌وهوا و پارامترهای اقلیمی در این منطقه عدم قطعیت مربوط به پیش‌بینی و برنامه‌ریزی آینده را افزایش می‌دهد. لذا با توجه به روند تغییرات شدید فراسنج‌های اقلیمی در آینده باید مناطق تحت ریسک را شناسایی کرد و برنامه‌های مدیریتی و عملیاتی را در راستای مقابله با آن، تدوین و پیاده‌سازی کرد و راهکارهای لازم برای کاهش پیامدها و سازگاری با شرایط آن لحاظ گردد.

بررسی‌های اقلیمی در سطح ایستگاه‌های مطالعات در سطح منطقه پژوهش نیز نشان داد که میزان دمای حداکثر در سطح منطقه در هر دو مطالعه، افزایش بیشینه دما رخ می‌دهد و در دوره دوم ۲۰۳۶-۲۱۰۰ شدت افزایش دما بیشتر است؛ به‌گونه‌ای که هر سه سناریو تغییرات ۳/۹۹ تا ۴/۱۶ درصدی در دمای حداکثر در سطح منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد که نشان از افزایش دمای منطقه طی سال‌های آتی است. در همین راستا تحقیقات مساح بوانی و همکاران (۲۰۲۱)، عرب سلغار و همکاران (۲۰۲۲)، حجازی‌زاده و همکاران (۲۰۲۳)، مودال و همکاران (۲۰۱۶)، دیمیری و همکاران (۲۰۱۸) نیز افزایش دما در سطح مناطق مطالعاتی خود را گزارش کرده‌اند.

نتیجه‌گیری

امروزه بحث تغییر اقلیم یکی از مباحث داغ در سطح بین‌الملل و بسیار مورد توجه سیاست‌گذاران و دانشمندان عرصه‌های

منابع

1. Akbarzadeh, P., and Nikoo, Shima. 2021. The Effects of Climate Change on Agriculture and Horticulture. *The second International Conference and the fifth National Conference on Conservation of Natural Resources and Environment Top of Form*, Ardabil, Iran.
2. Arab Salghar, A., Parhamt, J., and Goodarzi, M., 2022. Prediction of Climate Change using General Circulation Models and Downscaling of SDSM and LARS-WG Models. *Radiative Forcing Scenarios in the Dez Watershed. Physical Geography*, 15(55), pp. 129-149.
3. Beecham, S., Rashid, M., and Chowdhury, R.K., 2014. Statistical Downscaling Of Multi-Site Daily Rainfall In A South Australian Catchment Using A Generalized Linear Model. *International Journal Of Climatology*, 34(14), pp. 3654-3670.
4. 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): pp. 212-234.
5. Goodarzi, M., Hosseini, A., and Mosgari, E., 2016. Climatology Models, *Azar Kalk Publications*, Zanjan.
6. Hajizadeh, Z., Hosseini, M., and Karbalaie Dorei, A. R., 2015. Simulation of Climate Variables in Semnan Province with General Circulation Model (HadCM3) Scenarios. *Geography and Environmental Hazards*, 4(3), pp. 1-24.
7. Hajizadeh, Z., Zarei, Sh., and Sayyad, V., 2023. Investigating the Perspective of Extreme Temperature and Precipitation Changes in Kurdistan Province based on Radiative Forcing Scenarios (RCP), *Applied Geographic Sciences Research*, No. 23(69), pp. 1-14.
8. Heydari, Sh., Hosseini, S.A., and Heydari, A., 2020. Investigating The Effects Of Climate Change On Stream Flows Of Urmia Lake Basin In Iran, *Modeling Earth Systems And Environment*, 1: pp. 329-339.
9. Kasiri, M., Goodarzi, M., Janbaz Ghobadi, Gh., and Motavalli, S., 2020. Future Outlook of Temperature and Precipitation Changes in the Southern Coasts of the Caspian Sea. *Physical Geography*, 13(47), pp. 35-51.
10. Lin, J.Y., Cheng, C. T., and Chau, K.W., 2006. Using Support Vector Machines for Long-Term discharge Prediction. *Hydrological Science Journal*, 51: 599-612.
11. Modala, N. R., Ale, S., Goldberg, D. W., Olivares, M., Munster, C. L., Rajan, N. and Feagin, R. A., 2016. Climate change projections for the Texas High Plains and Rolling Plains. *Theoretical and Applied Climatology*, 1: pp. 124:1-18.
12. Mossah Boani, A. R., Ghasemzadeh, S., Rouzbahani, A., and Rajaei, F., 2021. Climate Change Prediction using a Multi-Model Ensemble Approach in the *Garehsoo Watershed. Ecohydrology*, No. 8(4), pp. 1189-1197.
13. Nilawar, A. P., and Waikar, M. L., 2019. Impacts Of Climate Change On Stream Flow And Sediment Concentration Under RCP 4.5 And 8.5: A Case Study In Purna River Basin, India. *Science Of The Total Environment*, 2: 2685-2696.
14. Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., Dejong, R., and Bootsma, A., 2004. Comparison Of LARS-WG And AAFC-WG Stochastic Weather Generators For Diverse Canadian Climates. *Climate Research*. 1(1): pp. 26.
15. Sheikh Bikloo Islam, B., 2023. Climate Change, Paradigm Shift: Epistemological Transformations in the Holocene Perspective, *Climate Change Research*, No. 4(1), pp. 1-18.
16. Stanzel, P., and Hannes, H., 2018. Climate change impact on West African rivers under an ensemble of CORDE climate projections. *Climate Services*, 11(1): pp 36-48.
17. Tatsumi, K., Oizumi, T., and Yamashiki, Y., 2013. Introduction Of Daily Minimum And Maximum Temperature Change Signals In The Shikoku Region Using The Statistical Downscaling Method By Gcms. *Hydrological Research Letters*, 3: pp. 48-53
18. Wilby, R.L., and Dawson, W.C., 2007. SDSM 4.2- A Decision Support Tool For The Assessment Of Regional Climate Change Impacts, SDSM Manual Version 4.2, *Environment Agency Of England And Wales*, 94p.
19. 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 Modeling & Software*, 17: pp. 147-159.

Investigation and prediction of climate changes using the approach of General Circulation Models (GCMs) in the western provinces of Iran

Mehran Akbarzadeh,¹ Hamid Nouri,^{2*} Samar Mortazavi,³ Behnaz attaeian⁴

Received: 03/10/20223

Accepted: 03/03/2024

Extended Abstract

Introduction: Considering its pervasive influence on live creatures, climate change is currently considered one of the most crucial challenges facing human societies, the investigation of which is of great significance. Moreover, climate change exerts an adverse influence on biological resources, the natural environment, and water sources, causing various environmental, social, and economic consequences. Therefore, this study sought to investigate and predict the parameters involved in climate change, including maximum temperature, precipitation, and average temperature under the RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios.

Furthermore, the applicability of the SDSM model was tested on eleven western provinces of Iran. To this end, first, the predictive variables such as temperature and precipitation were downscaled using combined regression techniques and a small-scale stochastic weather generator, and the required data were collected from the site of the monitoring station. Then, variations in maximum temperature, average temperature, and precipitation for the 2021-2036 and 2036-2100 periods were compared to those of the baseline period (1990-2020). The SDSM model was then validated and its accuracy was assessed using metrics such as MSE, MAPE, RMSE, and MAE.

Materials and methods: On the other hand, to verify the accuracy, the data collected for the 1990-2020 period were taken as the actual and observed values, followed by the performance of some simulations with the same data to gauge and measure the accuracy of the extracted data for the 2021-2035 and 2036-2100 periods and compare it with the baseline period (1990-2005). Finally, after confirming the collected data against the actual data of the respective years and determining the accuracy of the four validation methods, the verification process was extended to cover the 1990-2020, 2021-2035, and 2036-2100 periods.

Result: The results of the study indicated that the application of the SDSM model led to a reduction in the required accuracy needed for investigating and simulating climate change. Accordingly, the highest MSE, MAPE, RMSE, and MAE values were found under the second scenario (RCP4.5) in Jolfa station (in terms of maximum temperature), Urmia station (in terms of precipitation), Nahavand station (in terms of precipitation), and Zarrineh station (in terms of precipitation), whose reported values were 0.01, 16.90, 0.10, and 0.10, respectively. On the other hand, the lowest values belonged to the second scenario, whose values were reported to be 0.00, 0.41, 0.00, and 0.00, respectively.

Moreover, the results obtained from the application of the SDSM downscaling model to the investigation of precipitation under RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5 scenarios revealed that compared to the other two scenarios, the first scenario (RCP2.6) had a higher level of accuracy in predicting precipitation for 2021-2035 and 2036-2100 periods with a small margin of error, simulating precipitation more closely to the observed data in most cases. Furthermore, the model's predictive outcomes suggested that compared to the baseline period,

1. Mehran Akbarzadeh, Ph.D. student of environment, Malayer University, Malayer, Iran

2. Hamid Nouri, Associate Professor, Department of Natural Resources and Watershed Management, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran climatology.hnouri52@gmail.com

3. Samar Mortazavi, Assistant Professor, Department of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

4. Behnaz attaeian, Assistant Professor, Department of Natural Resources and Watershed Management, Malayer University, Malayer, Hamadan, Iran

precipitation would undergo changes throughout the 2021-2035 period, ranging from 2.50% to 3.86%. Similarly, it was found that compared to the baseline period the changes would range from 10.02% to 15.73% during the 2036-2100 period.

On the other hand, the most significant alterations in precipitation levels were expected to occur in the Iranian Eastern Azerbaijan and Western Azerbaijan provinces. In this regard, the analysis of maximum temperature rates throughout the 2021-2035 period showed that compared to the baseline period, the rise in the maximum temperature across the study region would range from 0.20 to 0.89 degrees. Similarly, the maximum temperature rate would increase from 0.86 to 0.89 degrees during the 2036-2100, compared to that of the baseline data. However, the most substantial changes in the maximum temperature rate were expected to occur in the southern part of the Iranian Fars province and the bordering areas of Kermanshah province.

Discussion and Conclusion: As for the average temperature rates, the study found that the temperature would increase from 0.05% to 5.07% during the first time period, and from 4.47% to 5.05% throughout the second period. However, while the least significant alterations in the studied parameters belonged to the RCP2.6 scenario, the most notable changes were found under the RCP8.5 scenario. Moreover, precipitation changes were investigated in forty stations across eleven Iranian provinces throughout the 2021-2035 and 2036-2100 periods, proving a reduction in precipitation rate within both periods, with the decrease being more conspicuous in the second period (2036-2100) under all three severity scenarios.

Furthermore, climatic assessments at the station level indicated that the study area would experience a considerable rise in the maximum temperature rate throughout both study periods, with the second period (2036-2100) being expected to witness a more substantial temperature rise. In this regard, all three scenarios showed that the range of increase in the maximum temperature rate would vary from 3.99% to 4.16%, indicating a significant temperature rise in the study area over the coming years.

The regions investigated in the current study play a crucial role in supplying water to the central and western Iranian provinces. The regions are also known as significant hubs for agricultural production. Therefore, any changes in weather and climatic parameters in these areas may lead to increased uncertainty in future predictions and planning, requiring the identification of the areas susceptible to risks caused by prospective extreme climate changes. Thus, it is necessary to develop and implement management and operational plans to deal with such changes and to devise the required strategies to mitigate the consequences of those changes and ensure adaptability to the new conditions.

Keywords: Climate Change, Precipitation Changes, GCM, SDSM.