

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.2.7.1

درصد همانندی: ۱۴٪

تحلیل اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی با استفاده از مدل CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک سلسله)

رضا چمن پیرا^{۱*}، رضا دهقانی^۲، ایرج ویسکرمی^۳

^{۱*} نویسنده مسئول، استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران. chamanpirareza45@gmail.com

^۲ دکترای علوم و مهندسی آب، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران. r.kh72777@gmail.com

^۳ استادیار پژوهشی بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان لرستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، خرم‌آباد، ایران. irvayskarami@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۰۲

چکیده

جامعه بشری و محیط‌زیست به دلیل تغییرات آب‌وهوایی با چالش‌های مهمی روبرو هستند. به دلیل تغییرات آب‌وهوا پیش‌بینی می‌شود دمای سطح کره زمین افزایش یابد. این تغییرات به‌طور یکنواخت در سطح جهانی رخ نمی‌دهد و ضروری است که در سطح منطقه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. بررسی و ارزیابی این تغییرات در هر منطقه برای درک دقیق‌تر چالش‌های آینده و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با آن لازم است. بنابراین در این پژوهش جهت تأثیر تغییر اقلیم بر پارامترهای هواشناسی و خشکسالی‌های آینده از مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی Can ESM5.0 مطابق با گزارش ششم CMIP6 در دشت سلسله واقع در استان لرستان استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی از داده دما و بارش ثبت شده طی سال‌های ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. سپس بر اساس سناریوهای انتشار طراحی شده شامل سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6، حد متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5 وضعیت جوی آتی دوره بیست‌ساله در آینده طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که در Can ESM5.0 در شبیه‌سازی پارامتر دما عملکرد مطلوبی داشته اما در پارامتر بارش توانایی کمتری دارد. نتایج تغییرات بارش و دما در دوره آتی نشان داد که این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی است به‌گونه‌ای که در تمامی سناریوها دمای متوسط سالانه افزایش و بارش متوسط سالانه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از تغییرات فصلی نشان داد بیشترین میزان بارش و کمترین میزان دما در فصل زمستان و کمترین میزان بارش و بیشترین میزان دما در فصل تابستان رخ می‌دهد. در مجموع نتایج این پژوهش می‌تواند به مدیریت منابع آب در آینده، ایجاد برنامه‌هایی مؤثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی و زمینه را برای تصمیم‌گیری آگاهانه و برنامه‌ریزی مناسب آماده نماید.

واژه‌های کلیدی: تغییرات آب‌وهوا، سلسله، شبیه‌سازی، مدل گردش عمومی جو

۱. مقدمه

تغییرات اقلیمی از جمله چالش برانگیزترین مسئله دهه‌های اخیر است. به گونه‌ای زندگی انسان و محیط‌زیست تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار خواهند گرفت. گرمایش جهانی از طریق کمبود منابع آب، دما و بارش در آینده تأثیرات قابل توجهی بر جامعه بشری خواهد گذاشت. تغییرات در متغیرهای اصلی آب‌وهوایی باعث افزایش وقوع رویدادهای شدید آب‌وهوایی مانند سیل و خشکسالی خواهد شد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر تغییرات اقلیمی، انتظار می‌رود این اثرات شدیدتر و فاجعه‌بارتر باشد [۱]. ایران به دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی ناشی از انسان با چالش‌های زیست‌محیطی گوناگونی روبرو است. در سال‌های اخیر، بسیاری از رودخانه‌ها و دریاچه‌ها در ایران کوچک‌شده‌اند، سطح آب‌های زیرزمینی به‌طور چشمگیری کاهش یافته و بخش‌های مختلف کشور خشکسالی‌های شدیدی را تجربه کرده‌اند [۲ و ۳]. انتظار می‌رود تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و مشکلات اقتصادی، مسائل زیست‌محیطی در ایران را تشدید کند. به‌عنوان مثال، کمبود آب تنش‌ها را به‌ویژه در مناطقی که به رودخانه‌های تغذیه‌شده از یخچال‌های طبیعی و ذوب برف از رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز متکی هستند، تشدید می‌کند [۴]. بنابراین، ارزیابی جنبه‌های مختلف تأثیر تغییرات اقلیمی بر ایران، ضروری است. برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی بر روی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و ... از مدل‌های گردش عمومی جو استفاده می‌شود. این مدل‌ها برای درک بهتر تغییرات اقلیمی گذشته و انجام پیش‌بینی‌ها و برآوردهای عدم قطعیت در آینده شبیه‌سازی‌های هدفمند و باکیفیتی را ارائه نموده است [۵]. مدل‌های گردش عمومی جو دارای وضوح و دقت یکسان نبوده و دقت و کارایی آن‌ها در مناطق مختلف، متفاوت است. از طرفی قابلیت اطمینان مدل‌های گردش عمومی جو به توان و صحت آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های آب‌وهوایی پایه و دوره آینده وابسته است. این قابلیت‌ها برای مهندسی منابع آب ارزشمند هستند زیرا برنامه‌ریزی مؤثر و تصمیم‌گیری استراتژیک را تسهیل

می‌کنند. در نهایت، ارزیابی عملکرد GCMها بسیار مهم است زیرا امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای مختلف آب‌وهوا را می‌دهد تا انتخاب‌های آگاهانه‌ای وجود داشته باشد. مرحله ششم پروژه همکاری مقایسه مدل‌ها (CMIP6) پیشرفت‌های قابل توجهی را نسبت به مرحله قبل خود، CMIP5، به ارمغان می‌آورد [۶]. مجموعه گزارش‌های ششم ارائه‌شده توسط گروه بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع علمی در زمینه تغییرات اقلیمی، به بررسی سناریوهای تغییر اقلیمی و اثرات آن بر جوامع و محیط‌زیست می‌پردازد [۷]. در خصوص تغییر اقلیم بر مبنای گزارش پنجم مطالعات مختلفی در سراسر جهان انجام شده است اما این مطالعات در خصوص گزارش ششم محدود است. در سال‌های اخیر پژوهش‌های مختلفی در خصوص پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی با گزارش ششم صورت گرفته است که به‌صورت زیر تشریح می‌گردد.

در پژوهشی اثر تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی رودخانه آمو در ائتوبی اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP245 و SSP585) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد جریان پیش‌بینی شده حوضه به‌جز در ماه‌های مارس، آوریل و می تحت سناریوی SSP245 کاهش یافته است. همچنین پیش‌بینی جریان در مقیاس سالانه و ماهانه در ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر افزایش می‌یابد [۸].

در پژوهشی دیگر تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارندگی با استفاده از مدل‌های CMIP6 را در دشت دامغان مورد بررسی قرار دادند و از سناریوهای گزارش ششم تغییرات اقلیمی توسط IPCC برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارندگی در دامغان استفاده نمودند. وقوع تغییر آب‌وهوا با استفاده از مدل‌های HadGEM3 و CanESM5 تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 پیش‌بینی شد. نتایج نشان داد که تغییرات بیشتر در میزان بارش و دما توسط مدل HadGEM3 در مقایسه با مدل CanESM5 پیش‌بینی شد. بنابراین مدل HadGEM3 عملکرد بهتری نسبت به مدل CanESM5 دارد [۹].

در پژوهشی تغییرات آینده بارش، دما و شرایط خشکسالی

SSP126، متوسط SSP245 و بدبینانه SSP585 برای دوره بیست ساله در آینده نزدیک طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ پرداخته خواهد شد.

۲. مواد و روش‌ها

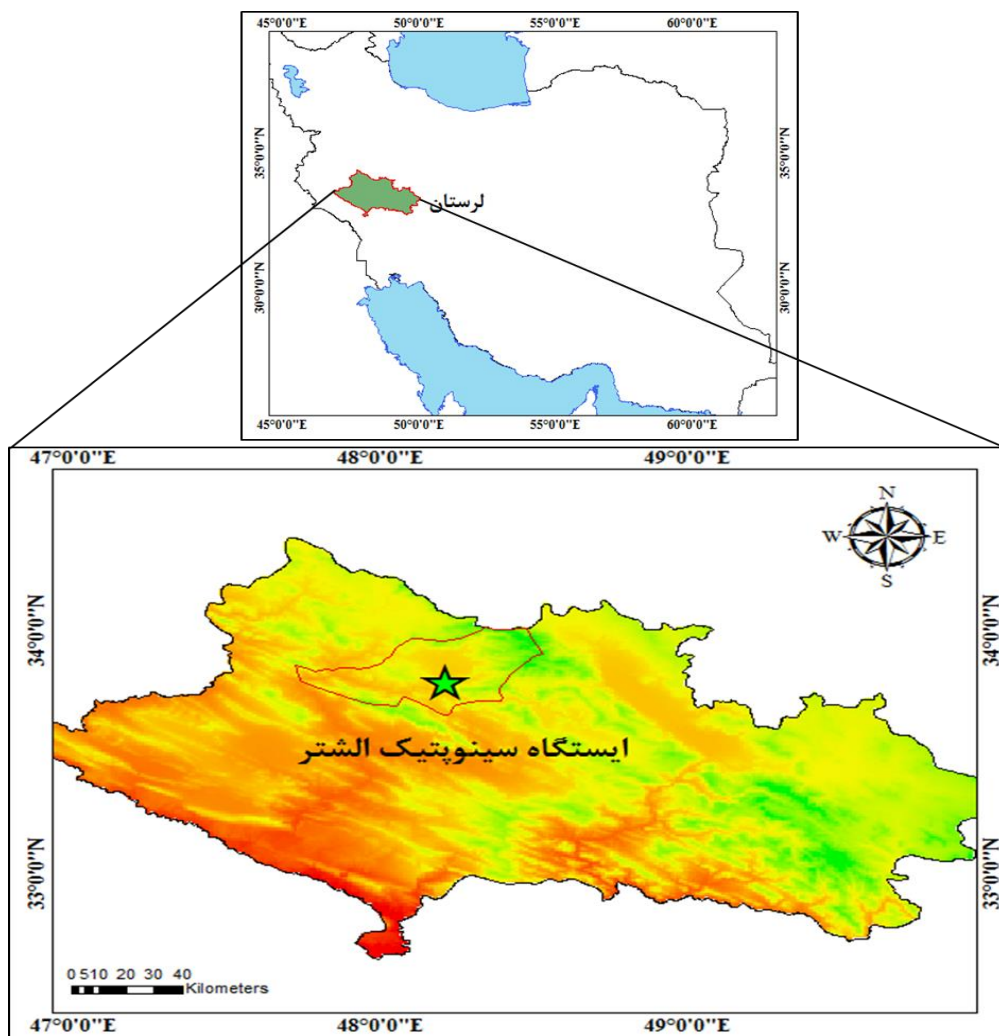
۲-۱. منطقه مورد مطالعه

استان لرستان واقع در کشور ایران یکی از استان‌های کوهستانی غرب ایران بوده که بیشتر مناطق این استان را کوه‌های زاگرس پوشانده است. آب‌وهوای استان لرستان متنوع و تنوع آب‌وهوا در آن از شمال شرق به جنوب غرب کاملاً مشهود است. از مهم‌ترین دشت‌های پرآب این استان سلسله یا الشتر می‌باشد. این دشت بین طول جغرافیایی 2° ° تا 48° ° ۳۱' تا 48° ° شرقی و عرض جغرافیایی 43° ° تا 45° ° شمالی قرار داشته که ارتفاع متوسط دشت از سطح دریا حدود ۱۵۸۰ متر وسعت آن ۱۹۶ کیلومتر مربع می‌باشد. بارندگی متوسط سالانه دشت ۵۴ میلی‌متر و دمای متوسط سالانه $8/8$ درجه سانتی‌گراد است. از نظر توپوگرافی این دشت از زمین‌های پست و نسبتاً هموار و کوه‌ها و پای کوه‌های تشکیل شده است. کوه‌های منطقه به‌عنوان عاملی تأثیرگذار بر ایجاد و توسعه سامانه‌های آبرفتی، اغلب از دو عامل مهم اقلیم و جنبش‌های زمین ساختی تأثیر می‌پذیرند. شکستگی‌ها و گسل‌های موجود در این محدوده، مجاری مناسبی را برای جریان آب به وجود آورده‌اند؛ بنابراین نقش مهمی در ایجاد جریان مجرای دارند. بر این اساس وجود کوه‌های آهکی با سامانه کارستی مناسب در حوزه آبخیز الشتر و همچنین از آنجایی که از نظر میزان بارش از توان و ظرفیت خوبی برخوردار است، باعث ایجاد رودخانه و چشمه‌های پرآب در این منطقه شده است. در شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است. همچنین در اشکال ۲ و ۳ نمودار بارش و دما نشان داده شده است.

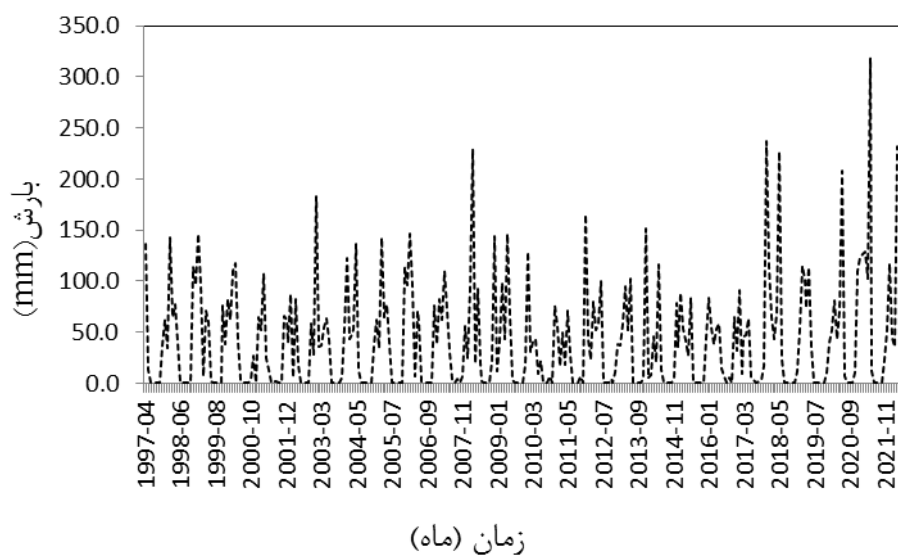
ناشی از آن را بر اساس شش مدل آب‌وهوای جهانی (GCM) از مدل‌های (CMIP6) تحت سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 - SSPs - SSP5 و 8.5 در کشور ساحل عاج مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تا سال ۲۱۰۰، بارش سالانه به‌طور متوسط ۱۳۳ میلی‌متر و ۱۷۷ میلی‌متر به ترتیب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کاهش می‌یابد [۱۰].

در پژوهشی به ارزیابی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) شامل MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL و ACCESS-ESM1-5 تحت دو سناریوی مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در کشور مکزیک پرداختند نتایج نشان داد حداقل دمای سالانه تا افق دور به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۳/۱ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت. در حالی که حداکثر دمای سالانه تا افق دور بین ۲/۵ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۳/۸ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت [۱۱].

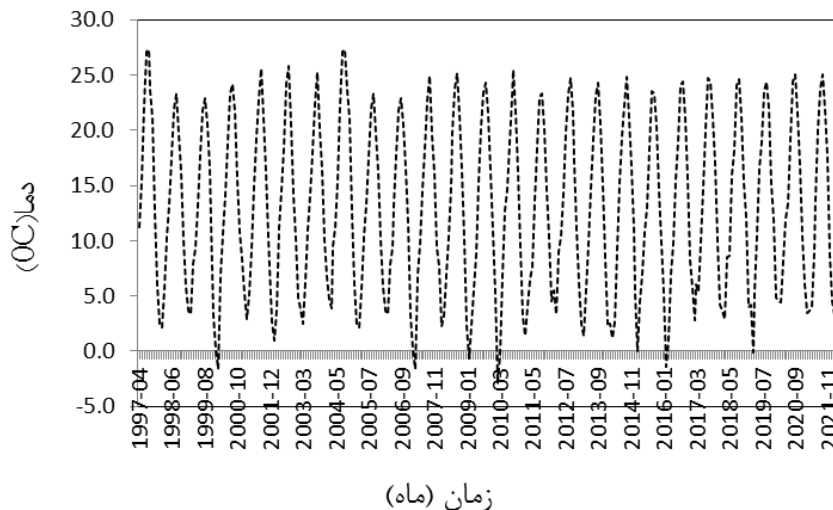
با توجه به پژوهش‌های انجام شده مشخص می‌گردد که انتخاب مدل‌های گردش عمومی (GCM) به دلیل محدودیت‌های محاسباتی و عدم قطعیت‌های اساسی، حیاتی و مهم است از طرفی با توجه به افزایش دمای سطح کره زمین ضروری است برای درک دقیق‌تر چالش‌های آینده و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با آن، در سطح منطقه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. بنابراین در این پژوهش به بررسی اثر تغییر اقلیمی بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شهرستان سلسله واقع در استان لرستان با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی کننده Can Esm 5 و مدل ریزمقیاس نمایی Lars-WG بر اساس سناریوهای انتشار طراحی شده در دوره پایه ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲ برای پیش‌بینی وضعیت جو طی دوره آتی از سه سناریو خوش‌بینانه



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. وضعیت بارش منطقه مورد مطالعه



شکل ۳. وضعیت دما منطقه مورد مطالعه

۲-۲. متد

ابتدا داده‌های هواشناسی شهرستان سلسله از سازمان هواشناسی استان لرستان اخذ شد. سپس با جمع‌آوری سری داده‌های مشاهداتی دما و بارش روزانه در دوره پایه ۲۵ ساله (۱۹۹۷-۲۰۲۳) و بررسی مشخصات و روند آن‌ها و انجام آزمون‌های آماری بر روی دو پارامتر دما و بارش به تحلیل آن‌ها پرداخته شد. سپس با مراجعه به بانک‌های اطلاعاتی موجود مربوط به گزارش ششم، مدل پیش‌بینی کننده گردش عمومی جو انتخاب و سری‌های زمانی تولیدشده توسط مدل‌های مختلف دریافت شد. داده‌های اقلیمی پیش‌بینی‌شده این مدل‌ها برای استان لرستان با توجه به دامنه طول و عرض جغرافیایی قابل دریافت هستند. برای دستیابی به هدف این مطالعه داده‌های تاریخی مدل اقلیمی Can ESM2.0 در فرمت Net CDF و در مقیاس روزانه و ماهانه از سایت‌های اقلیمی دریافت شده و برای انجام عملیات آماری توسط محیط نرم‌افزاری ArcMap به فرمت Excel مبدل گردید و توانایی عملکرد مدل انتخابی برای شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش در دوره پایه با استفاده از داده‌های تاریخی مدل بررسی گردید. در مرحله بعد داده‌های اقلیمی موردنظر در دوره آینده با استفاده از داده‌های بانک اطلاعاتی موجود در محیط نرم‌افزاری LARS-WG برای مدل Can ESM5.0 و بر مبنای گزارش ششم IPCC، برای دو دوره بیست‌ساله آتی ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ ریزمقیاس نمایی آماری و پیش‌بینی شدند.

۳-۲. مدل گردش عمومی جو

مدل‌های گردش عمومی GCM قادر هستند تا تغییرات پارامترهای اقلیمی را در سناریوهای مختلف مدل گردش عمومی شبیه‌سازی نماید. این مدل بر پایه قوانین فیزیک بنا شده و از روابط ریاضی برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در هریک از سلول‌های شبکه بهره می‌گیرند [۱۲]. مدل‌های GCM به سه دسته مدل‌های گردش عمومی جو (AGCM)، گردش عمومی اقیانوسی (OGCM) و گردش عمومی جوی اقیانوسی (AOGCM) تقسیم می‌شوند [۱۳]. در حال حاضر معتبرترین ابزار برای مطالعات تغییرات اقلیمی مدل (AOGCM) است که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای که در قالب سناریو انتشار برای دوره‌های آتی ارائه شده است.

مدل‌های اقلیمی عملکرد متفاوتی در پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی در نقاط مختلف دارند. از این رو می‌بایست قبل از استفاده از خروجی این مدل‌ها، توانایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار داده شود. در همین راستا، در مطالعه حاضر برای انتخاب مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه، ابتدا نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش و دما توسط مدل‌های اقلیمی (مربوط به نزدیک‌ترین سلول محاسباتی به شهرستان سلسله) در دوره پایه (۱۹۹۷-۲۰۲۲) از سازمان هواشناسی استان لرستان اخذ خواهد شد. در ادامه با مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های

نمی‌توان از اطلاعات خام این مدل‌ها در مطالعات مربوط به مقیاس‌های کوچک‌تر استفاده کرد. در همین راستا، باید خروجی این مدل‌ها با بهره‌گیری از روش‌های مناسب ریزمقیاس‌نمایی شود [۱۷].

ریزمقیاس‌نمایی به سه دسته روش‌های آماری، دینامیکی و تناسبی انجام می‌شود. در روش‌های آماری، ریزمقیاس‌نمایی با بهره‌گیری از روش‌های رگرسیونی و علم آمار و ایجاد ارتباط کمی بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای کوچک‌مقیاس انجام می‌شود. از جمله روش‌های آماری می‌توان به مدل LARS WG اشاره کرد. این مدل با دریافت اطلاعات تاریخی منطقه و شناخت ویژگی‌های آماری آن، وضعیت متغیرهای اقلیمی را در آینده پیش‌بینی می‌کند. در این پژوهش اطلاعات مربوط به متغیرهای بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و تعداد ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه هواشناسی سلسله در طی سال‌های ۱۹۹۷-۲۰۲۲ به مدل LARS ارائه خواهد شد و پس از اطمینان از توانایی مدل در شناخت ویژگی‌های آماری ایستگاه مذکور، از این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های اقلیمی تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP 2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده خواهد شد [۱۸]. از آنجایی که مدل‌های گزارش ششم در نرم‌افزار LARS WG تعریف نشده هستند بنابراین، نیاز است تا خروجی هر کدام از مدل‌ها با تعریف سناریو ریزمقیاس شود. به همین منظور داده‌های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به خروجی هر مدل برای دوره آتی تحت هر سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استخراج شود. سپس برای پارامتر بارش، نسبت میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی به دوره پایه و برای پارامترهای دمای بیشینه و دمای کمینه، اختلاف میانگین بلندمدت ماهانه دوره آتی و دوره پایه محاسبه شود. بنابراین، برای هر پارامتر در هر ماه ضریبی به دست خواهد آمد که از آن برای ایجاد سناریو در نرم‌افزار WG-LARS و ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گزارش ششم استفاده خواهد شد.

مشاهداتی، مدل‌هایی که عملکرد مناسبی داشته باشند جهت پیش‌بینی بارش دوره آتی انتخاب می‌شوند. در این پژوهش برای ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی از شاخص‌های ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE)، ریشه دوم میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE)، ضریب تبیین (R2) و میانگین خطای مطلق (MAE) استفاده شد که روابط آن‌ها در زیر آمده است [۱۴-۱۶].

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \quad (۱)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{O} \quad (۲)$$

$$NRMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n} \right]^{1/2} \times \frac{100}{O} \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (۴)$$

۲-۳-۱. سناریوهای گزارش ششم مدل گردش عمومی جو

جدیدترین سناریوهای ارائه شده برای بررسی پارامترهای اقلیمی، سناریوهای گزارش ششم (AR6) است. در این سناریوها چگونگی مدل گردش عمومی در دوره‌های آتی بر اساس ترکیب سناریوهای انتشار (RCPs) و سناریوهای اقتصادی-اجتماعی (SSPs) بررسی می‌شود. در واقع بر اساس این گزارش، سناریوهای آینده علاوه بر توصیف اقلیم‌های متفاوت، باید جنبه‌های پیشرفت اقتصادی و اجتماعی را نیز شامل شوند. در سناریوهای SSPs بر شبیه‌سازی چگونگی تغییر شرایط اقتصادی-اجتماعی مانند رشد جمعیت، رشد اقتصادی، آموزش، شهرنشینی، توسعه و تکنولوژی تأکید شده است.

۲-۳-۲. ریزمقیاس‌نمایی

یکی از مشکلات استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی، بزرگ‌مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آن‌ها است. از این رو

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش از مدل Can ESM5.0 برای تولید مقادیر بارندگی و درجه حرارت‌های حداکثر و حداقل روزانه در ایستگاه سینوپتیک سلسله واقع در استان لرستان در دوره تاریخی و آینده به کار گرفته شده است تا ارزیابی دقیقی از مدل انتخابی در شبیه‌سازی پارامترهای فوق در محدوده مطالعاتی صورت گیرد. آنالیز آماری شبیه‌سازی مدل برای پارامترهای بارندگی و دما در دوره تاریخی در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های تولیدشده با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های مشاهده شده در دوره تاریخی در جدول ۱ و شکل ۲ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین در کلیه پارامترهای موردبررسی بیشتر از ۰/۹۶ محاسبه گردید و میانگین خطای مطلق (MAE) برای شبیه‌سازی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر به ترتیب ۰/۲۵، ۰/۰۳، ۰/۰۴ به دست آمد که نشان می‌دهد خطای شبیه‌سازی بارش بیشتر از بقیه پارامترهاست. شاخص‌های RMSE و NRMSE نیز در شبیه‌سازی بارش نسبت به دیگر پارامترها به مراتب بیشتر بوده (به ترتیب ۵/۱۸ و ۱۲/۳۶) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأییدشده ولی با این حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد که با یافته‌های حسینی و همکاران [۱۸] و دهقانی و همکاران [۱۹] مطابقت دارد.

همچنین در این پژوهش از مدل گردش عمومی جو CMIP6 جهت پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی نظیر بارش و دما طی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۴۲ استفاده شد. به‌منظور پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی در مدل گردش عمومی جو از سه سناریو اقلیمی SSP126، SSP245 و SSP585 استفاده شد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد سناریو SSP126 به‌صورت خوش‌بینانه، SSP245 نرمال و SSP585 به‌صورت بدبینانه در نظر گرفته شد. همچنین از مدل اقلیمی Can esm 5 که بیشترین سازگاری با منطقه دارد، در نظر گرفته شد. جهت ریزمقیاس‌نمایی نیز از مدل Lars WG 8 استفاده شد.

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد داده‌های بارش نشان‌دهنده تغییرات محسوس در ماه‌های مختلف تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 هستند. در ماه‌های زمستانی (دسامبر، ژانویه و فوریه)، بارش در تمام سناریوها نسبت به دوره پایه افزایش یافته است، به‌ویژه در سناریوی SSP126 که بیشترین افزایش را نشان می‌دهد (مثلاً دسامبر از ۶۴/۸ به ۱۰۲/۹۴ میلی‌متر). در مقابل، در ماه‌های گرم مانند ژوئن، جولای و آگوست، بارش نزدیک به صفر باقی‌مانده که نشان‌دهنده تشدید خشکی تابستانه است. سناریوی SSP585 در برخی ماه‌ها (مانند مه و آوریل) بارش بیشتری نسبت به سایر سناریوها پیش‌بینی می‌کند، که احتمالاً ناشی از افزایش وقایع حدی بارشی در شرایط گرمایش شدید است.

دمای حداقل در تمام سناریوها نسبت به دوره پایه کاهش یافته یا افزایش جزئی داشته است. در ماه‌های سرد (ژانویه تا مارس)، دمای حداقل در سناریوها به زیر صفر رسیده (ژانویه در SSP126 به ۳/۹۴-)، که نشان‌دهنده افزایش نوسانات دمایی و احتمال تشدید یخبندان‌های زمستانی است. در ماه‌های گرم‌تر (مه تا سپتامبر)، افزایش دمای حداقل در سناریوها محافظه‌کارانه‌تر است. اما همچنان روند کلی کاهش نسبت به پایه دارد. این می‌تواند پیامدهای جدی برای کشاورزی و اکوسیستم‌ها داشته باشد.

دمای حداکثر در تمام سناریوها افزایش چشمگیری داشته است، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال. برای مثال، در ژوئیه، دمای پایه ۳۴/۰۷ درجه سانتی‌گراد در SSP585 به ۳۷/۹۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که افزایش ۳/۸۶ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. این روند در تمام سناریوها مشابه اما با شدت متفاوت است (SSP126 > SSP245 > SSP585). افزایش دما در زمستان نیز محسوس است (مثلاً دسامبر از ۱۰/۷۵ به ۱۲/۸۴ در SSP585)، که احتمال کاهش دوره یخبندان و تغییر الگوهای بارشی را مطرح می‌کند.

الگوی کلی نشان‌دهنده افزایش دمای حداکثر، کاهش نسبی دمای حداقل در برخی ماه‌ها، و تغییرات نامنظم بارش است. سناریوی SSP585 با شدیدترین تغییرات، افزایش بارش در زمستان و کاهش آن در تابستان را پیش‌بینی می‌کند که

۲۶۱/۰۸ می‌باشد همچنین بیشترین میزان دمای کمینه در فصل زمستان و دمای بیشینه در فصل تابستان رخ داده است. نتایج این مطالعه نشان داد افزایش دما را در سراسر منطقه مورد مطالعه رخ داده است، به طور کلی با نتایج ناطقی و همکاران [۲۰] که از سناریوهای انتشار RCP در حوضه آبخیز هلیل رود در جنوب شرقی استان کرمان استفاده کردند، مطابقت دارد. ناطقی و همکاران افزایش دما را در ۲۰ سال آینده تحت SSP 1-2.6، ۱۰ درجه سانتی گراد پیش‌بینی کردند که مشابه افزایش ۱۰ درجه سانتی گراد پیش‌بینی شده، تحت سناریوی مشابه SSP1-2.6 است. این سازگاری احتمالاً به دلیل استفاده مشترک از SSP126 و نزدیکی نسبتاً نزدیک حوضه آبخیز هلیل رود به منطقه مورد مطالعه ما است. به طور مشابه، فاضلی خیاوی و همکاران [۲۱]، با استفاده از سناریوهای CMIP5 در دشت مغان، افزایش دما را تحت همه سناریوهای RCP در دوره‌های آینده نیز نشان دادند همان‌طور که در تحقیقات مورد بررسی برجسته شده است، پیامدهای قابل توجهی برای بخش‌های مختلف دشت مغان، از جمله منابع آب، شیوه‌های کشاورزی (زمان کاشت، انتخاب محصول) و شرایط زندگی انسان دارد. بنابراین، مدیران، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند از نتایج این تحقیق برای تدوین استراتژی‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی سازگاری برای کشاورزی و ابتکارات بهداشت عمومی استفاده کنند.

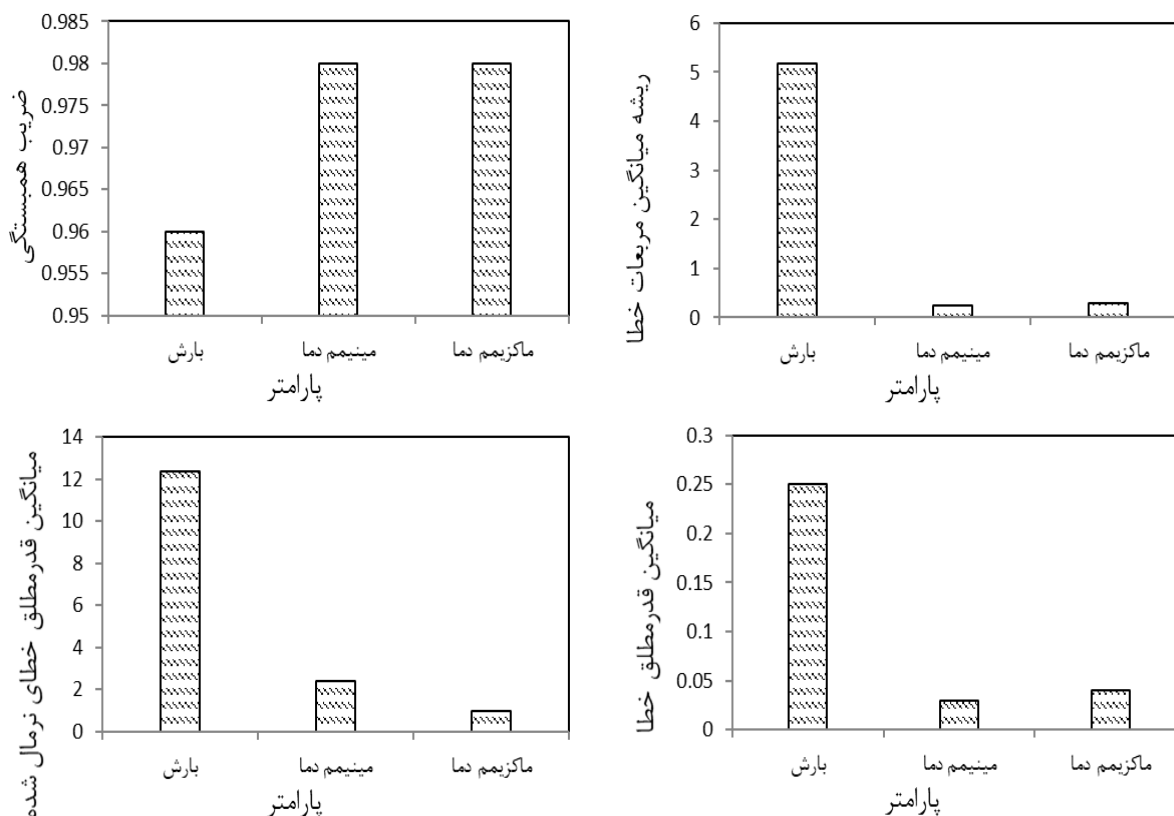
جدول ۱. شاخص آماری ارزیابی مدل LARS-WG 8

پارامتر	R2	RMSE	NRMSE	MAE
بارش	۰/۹۶۰	۵/۱۸	۱۲/۳۶	۰/۲۵
مینیمم دما	۰/۹۸	۰/۲۵	۲/۴۱	۰/۰۳
ماکزیمم دما	۰/۹۸	۰/۳۰	۰/۹۷	۰/۰۴

می‌تواند منجر به سیلاب‌های زمستانی و خشکسالی‌های تابستانه شود. همچنین، افزایش اختلاف بین دمای حداقل و حداکثر (به‌ویژه در تابستان) نشان‌دهنده تشدید استرس گرمایی است. این تغییرات برای برنامه‌ریزی منابع آب، کشاورزی و مدیریت ریسک بلایای طبیعی نیازمند مدل‌سازی دقیق‌تر است.

در شکل ۳ روند نوسانات ماهانه پارامترهای هواشناسی در دوره آینده نسبت به دوره پایه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد بارش ماهانه در ماه‌های ژانویه تا آپریل و اکتبر تا دسامبر روند افزایشی داشته است که بیشترین میزان افزایش در ماه‌های فوریه و دسامبر می‌باشد همچنین میزان بارش در سناریو SSP 126 روند افزایشی و در سناریو SSP585 روند کاهش نسبت به دوره آتی از خود نشان داده است. دمای کمینه نسبت به دوره پایه روند کاهشی داشته و کمترین میزان کاهش دما در سناریو SSP126 و بیشترین میزان آن در سناریو SSP585 مشاهده می‌شود. دمای بیشینه نیز نسبت به دوره پایه روند افزایشی از خود نشان داده است بطوری که کمترین میزان در سناریو SSP585 و بیشترین میزان در سناریو SSP126 رخ داده است.

در جدول ۳ پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی در سناریوهای آینده به صورت فصلی نشان داده شده است همان‌طور که مشخص است بیشترین میزان فصلی دمای کمینه در فصل تابستان تحت سناریو SSP585 و کمترین میزان در فصل زمستان تحت سناریو SSP126 برآورد شده است. بیشترین میزان دمای بیشینه نیز در فصل تابستان تحت سناریو SSP585 و کمترین آن در فصل زمستان تحت سناریو SSP126 رخ داده است. علاوه بر این بیشترین میزان بارش در فصل بهار تحت سناریو SSP126 و کمترین آن در فصل تابستان تحت سناریو SSP585 برآورد شده است. علاوه بر این بیشترین میزان بارش در فصل زمستان به ترتیب طی سناریوهای SSP125، SSP245 و SSP585 به میزان ۲۷۷/۹۹، ۲۵۴/۶۶ و



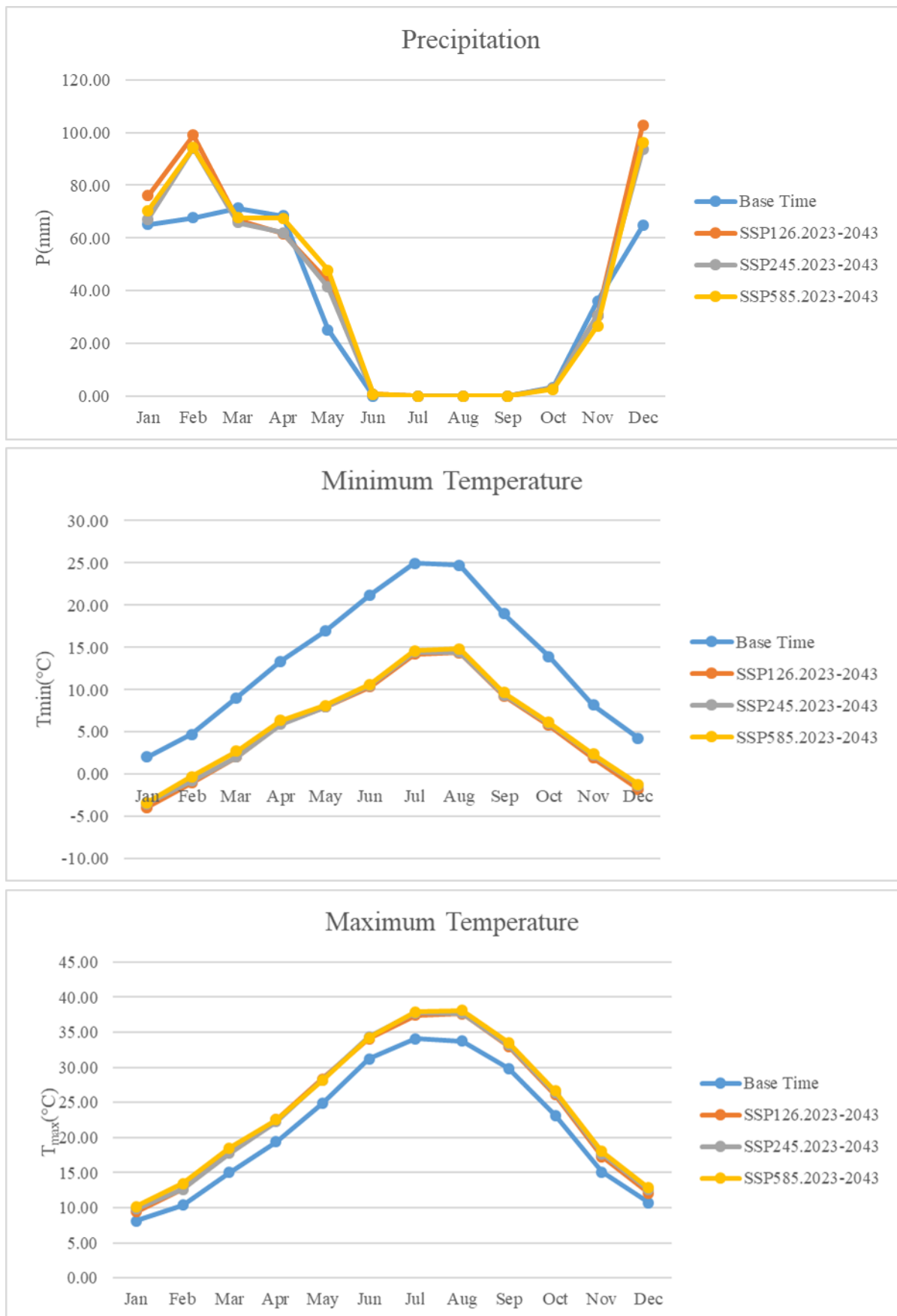
شکل ۲. نمودارها شاخص‌های ارزیابی

جدول ۲. عملکرد سناریوهای گزارش ششم در پیش‌بینی میزان نوسانات دوره آتی نسبت به دوره پایه پارامترهای هواشناسی

بارش				
Month	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Jan	۶۵/۱۲	۷۶/۰۹	۶۷/۰۸	۷۰/۵۰
Feb	۶۷/۷۷	۹۸/۹۷	۹۴/۰۶	۹۴/۳۰
Mar	۷۱/۴۲	۶۶/۹۶	۶۵/۹۰	۶۷/۶۴
Apr	۶۸/۴۱	۶۱/۷۵	۶۲/۰۵	۶۷/۵۳
May	۲۵/۲۷	۴۳/۵۷	۴۱/۴۹	۴۷/۸۵
Jun	۰/۱۱	۰/۸۴	۰/۶۸	۰/۶۰
Jul	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲
Aug	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
Sep	۰/۰۳	۰/۱۹	۰/۱۷	۰/۱۹
Oct	۳/۳۹	۳/۰۴	۲/۹۷	۲/۵۷
Nov	۳۶/۲۲	۳۰/۶۶	۳۰/۷۰	۲۶/۶۷
Dec	۶۴/۸۰	۱۰۲/۹۴	۹۳/۵۲	۹۶/۲۸

دمای مینیمم				
Month	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Jan	۲/۰۴	-۳/۹۴	-۳/۴۸	-۳/۳۲
Feb	۴/۷۲	-۱	-۰/۸۰	-۰/۳۰
Mar	۹/۰۲۵	۲/۰۶	۲/۰۵	۲/۷۳
Apr	۱۳/۳۹	۶/۰۱	۵/۹۴	۶/۳۸
May	۱۶/۹۶	۷/۹۹	۷/۹۴	۸/۱۵
Jun	۲۱/۲۰	۱۰/۳۷	۱۰/۵۲	۱۰/۶۲
Jul	۲۴/۹۷	۱۴/۲۴	۱۴/۴۲	۱۴/۶۱
Aug	۲۴/۷۳	۱۴/۴۰	۱۴/۴۴	۱۴/۸۳
Sep	۱۹	۹/۲۷	۹/۳۷	۹/۶۷
Oct	۱۳/۹۱	۵/۸۱	۶/۰۲	۶/۱۷
Nov	۸/۱۸	۱/۹۵	۲/۲۶	۲/۳۸

دمای ماکزیمم				
Month	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Jan	۸/۱۳	۹/۴۲	۹/۸۱	۱۰/۱۹
Feb	۱۰/۳۹	۱۲/۶۶	۱۲/۶۱	۱۳/۴۵
Mar	۱۴/۹۹	۱۷/۹۳	۱۷/۷۳	۱۸/۵۱
Apr	۱۹/۳۷	۲۲/۵۰	۲۲/۲۷	۲۲/۵۶
May	۲۴/۸۵	۲۸/۳۳	۲۸/۱۷	۲۸/۱۱
Jun	۳۱/۲۳	۳۴/۰۸	۳۴/۳۲	۳۴/۲۴
Jul	۳۴/۰۷	۳۷/۴۴	۳۷/۷۸	۳۷/۹۳
Aug	۳۳/۷۷	۳۷/۶۲	۳۷/۶۸	۳۸/۱۴
Sep	۲۹/۸۲	۳۳/۰۱	۳۳/۱۸	۳۳/۵۰
Oct	۲۳/۱۳	۲۶/۰۶	۲۶/۳۳	۲۶/۶۱
Nov	۱۵/۰۶	۱۷/۲۷	۱۷/۶۷	۱۸/۰۳
Dec	۱۰/۷۵	۱۲/۰۵	۱۲/۵۵	۱۲/۸۴



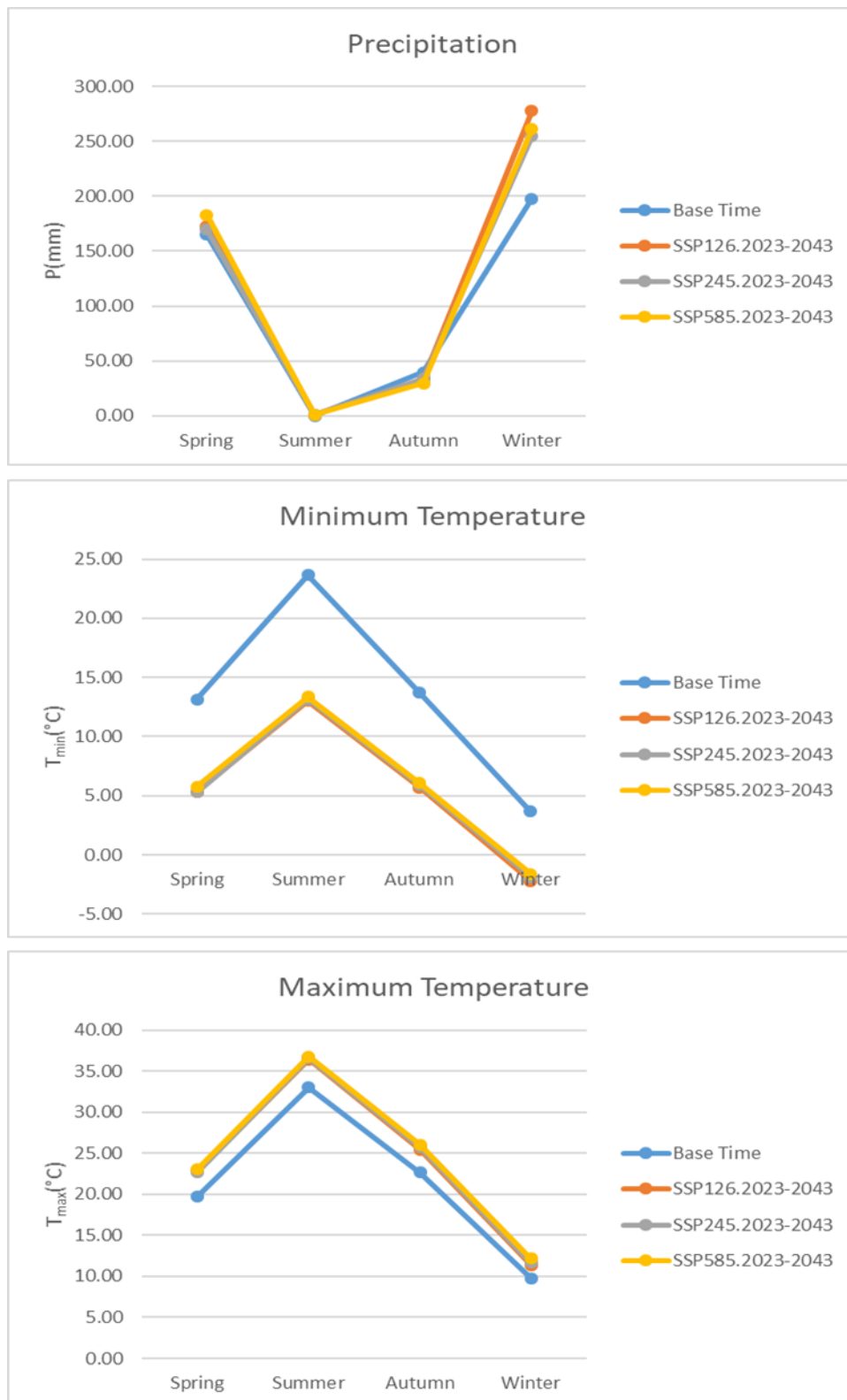
شکل ۳. مقایسه روند نوسانات ماهانه پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک الشتر در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه

جدول ۳. عملکرد سناریوهای گزارش ششم به صورت فصلی در پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی

بارش				
	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Spring	۱۶۵/۱۰	۱۷۲/۲۷	۱۶۹/۴۳	۱۸۳/۰۲
Summer	۰/۱۴	۰/۸۰	۰/۷۱	۰/۸۷
Autumn	۳۹/۶۴	۳۳/۸۹	۳۳/۸۳	۲۹/۴۲
Winter	۱۹۷/۶۹	۲۷۷/۹۹	۲۵۴/۶۶	۲۶۱/۰۸

دمای مینیمم				
	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Spring	۱۳/۱۳	۵/۳۵	۵/۳۱	۵/۷۶
Summer	۲۳/۶۳	۱۳	۱۳/۱۳	۱۳/۳۵
Autumn	۱۳/۷۰	۵/۶۸	۵/۸۸	۶/۰۷
Winter	۳/۶۷	-۲/۲۲	-۱/۸۷	-۱/۶۱

دمای ماکزیمم				
	Base Time	SSP126(2023-2043)	SSP245(2023-2043)	SSP585(2023-2043)
Spring	۱۹/۷۴	۲۲/۹۲	۲۲/۷۲	۲۳/۰۶
Summer	۳۳/۰۲	۳۶/۳۸	۳۶/۵۹	۳۶/۷۷
Autumn	۲۲/۶۷	۲۵/۴۵	۲۵/۷۳	۲۶/۰۵
Winter	۹/۷۵	۱۱/۳۸	۱۱/۶۶	۱۲/۱۶



شکل ۴. مقایسه روند نوسانات فصلی پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک الشتر در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه

لرستان با استفاده از مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی Can ESM5.0 در گزارش ششم CMIP6 و بر اساس سناریوهای طراحی شده دوره پایه ۱۹۹۷ تا ۲۰۲۲ و استفاده از آنها برای پیش‌بینی وضعیت جوی دوره‌های آبی بر مبنای سه سناریو

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی دما و بارش ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک سلسله واقع در استان

- Regional Environmental Change. 2017 Aug;17(6):1623-38.
- [2] Ashraf S, Nazemi A, AghaKouchak A. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific reports. 2021 Apr 28;11(1):1-10.
- [3] Ghazi B, Dutt S, Torabi Haghghi A. Projection of future meteorological droughts in Lake Urmia Basin, Iran. Water. 2023 Apr 16;15(8):1558.
- [4] Hashemi ANA SK, Khosravi M, Tavousi T. Simulating the Longest Length of Dry Spells with Approach of Climate Change in Iran. Journal of Arid Regions Geographic Studies. 2022 Nov 23;6(22):18-33.
- [5] Annan JD, Hargreaves JC. Understanding the CMIP3 multimodel ensemble. Journal of Climate. 2011 Aug 15;24(16):4529-38.
- [6] O'Neill B, Kriegler E, Ebi K, Kemp-Benedict E, Riahi K, Rothman D, Van Ruijven B, Van Vuuren D, Birkmann J, Kok K, Solecki W. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change. 2017; 42(1): 169-180.
- [7] IPCC. Climate change 2021 the physical science basis AR6 Summary for policymakers. 2021. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [8] Feyissa TA, Demissie TA, Saathoff F, Gebissa A. Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia. Results in Engineering. 2024 Sep 1;23:102708.
- [9] Shahi S, Hosseini K, and Mousavi SF. Assessing the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation using CMIP6 models (case study: Damghan Iran). Journal of Hydraulic and Water Engineering . 2024;1(2): 163-177.
- [10] Kouman KD, Komlavi A, Kouadio BH, Kabo-bah AT, Moctar D, Siabi EK, and Mensah JK. Assessment of climate change in the North-East Region of Côte d'Ivoire: future precipitation temperature and meteorological drought using CMIP6 models. Cogent Engineering . 2024; 11(1): 234-51.
- [11] Cruz González A, Arteaga-Ramirez R, Soria-Ruiz J, Sanchez Cohen I, Monterroso Rivas AI, and Quevedo A. Climate change projections in temperature and precipitation using cmip6 in Central Mexico. Theoretical and Applied Climatology. 2025; 8:242-56.
- [12] Irwin SE, Rubaiya S, Leanna M, King and Simonovic SP. Assessment of climatic خوش بینانه SSP1-2.6، حد متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5 طی دوره بیست ساله در آینده نزدیک ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ پرداخته شد. نتایج بررسی خطای عملکرد مدل نشان داد که Can ESM5.0 با دقت بالایی قادر به شبیه سازی پارامترهای دمای حداکثر و دمای حداقل است، اما در شبیه سازی پارامتر بارش نسبت به دو پارامتر دیگر خطای بیشتری را نشان می دهد. نتایج تغییرات دمایی نشان داد در سطح دوره مورد بررسی این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی می باشد به گونه ای که تغییرات دمایی حاکی از افزایش دما در دوره ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بوده است. همچنین بررسی تغییرات بارندگی نشان داد تحت سناریوهای ذکر شده کاهش می یابد، بطوریکه بیشترین کاهش در سناریو SSP585 رخ داده است. نتایج حاصل از بررسی تغییرات فصلی نشان داد بیشترین میزان بارش و کمترین میزان دما در فصل زمستان و کمترین میزان بارش و بیشترین میزان دما در فصل تابستان رخ می دهد. این گزارش ها به عنوان یک منبع قابل اعتماد برای سازمان ها، سیاست گذاران و جامعه علمی برای اتخاذ تصمیمات مناسب در خصوص مدیریت و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می گیرند. بنابراین با توجه به خشک و نیمه خشک بودن این شهرستان، برای کاهش اثرات تغییر اقلیم می توان از راهکارهای لازم از قبیل تدابیری برای اصلاح نظام آبیاری، روش های به منظور کاهش تبخیر و اصلاح الگوی کشت استفاده کرد.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله بر خود لازم می دانند از سازمان هواشناسی استان لرستان بابت در اختیار گذاشتن آمار و اطلاعات پارامترهای هواشناسی مورد بررسی تشکر نمایند.

منابع

- [1] Waha K, Krummenauer L, Adams S, Aich V, Baarsch F, Coumou D, Fader M, Hoff H, Jobbins G, Marcus R, Mengel M. Climate change impacts in the Middle East and Northern Africa (MENA) region and their implications for vulnerable population groups.

- vulnerability in the Upper Thames River basin: Downscaling with LARS-WG. Department of Civil and Environmental Engineering The University of Western Ontario London, Ontario, Canada;2012.
- [13] Jahangir MH, Haghghi P, Danehkar SH. Downscaling climate parameters in Fars province using models of the fifth report and RCP scenarios. *Ecological Informatics* . 2022; 68(4): 558-62.
- [14] Jones B, O'Neill BC. Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways. *Environmental Research Letters*. 2016 Jul 29;11(8):084003.
- [15] Semenov MA, Stratonovitch P. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*. 2015 Sep 28;65:123-39.
- [16] O'Neill BC, Tebaldi C, Van Vuuren DP, Eyring V, Friedlingstein P, Hurtt G, Knutti R, Kriegler E, Lamarque JF, Lowe J, Meehl GA. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*. 2016 Sep 28;9(9):3461-82.
- [17] Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill BC, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*. 2017 Jan 1;42:153-68.
- [18] Hosseini R, Takemura A, Hosseini A. Non-linear time-varying stochastic models for agroclimate risk assessment. *Environmental and Ecological Statistics*. 2015 Jun;22(2):227-46.
- [19] Dehghani R, Poudeh HT, Izadi Z. The effect of climate change on groundwater level and its prediction using modern meta-heuristic model. *Groundwater for Sustainable Development*. 2022 Feb 1;16:100702.
- [20] Nateghi S, Rafiiei Sardooi E, Azareh A, Soleimani Sardoo F. Predicting future changes in potential evapotranspiration based on RCP scenarios in Halilrood Watershed. *Watershed Engineering and Management*. 2022 Jan 21;13(4):769-80.
- [21] Fazeli Khiavi A, Salahi B, Goodarzi M. Assessment effects of climate change on changes in potential evapotranspiration in the Moghan Plain by RCPs. *Watershed Engineering and Management*. 2020 Dec 21;12(4):977-93.