

تحلیل پارامترهای هواشناسی با استفاده از مدل گردش عمومی جو CMIP6 (مطالعه موردی: شهرستان پلدختر - لرستان)

حمیدرضا باباعلی^{۱*}، رضا جعفری نیا^۲، غلامرضا گودرزی^۳، حمید توکلی^۴
۱- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، ایران
۲ و ۳- گروه مهندسی آب، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران.

چکیده

ضرورت شناخت نوسانات مکانی-زمانی دما و بارش، و پیش‌بینی‌های آتی آن‌ها، برای ارزیابی ریسک‌های زیست‌محیطی و تدوین برنامه‌های بلندمدت سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم، امری حیاتی است. این پژوهش با هدف پیش‌بینی حداقل و حداکثر دمای هوا و بارش در شهرستان پلدختر (استان لرستان)، از مدل‌های گردش عمومی *MPI-ESM1-2-LR* و *BCC-CSM2-MR* بهره برده است. تحلیل‌ها تحت دو سناریوی کلان *SSP1-2.6* (انتشار کم) و *SSP5-8.5* (انتشار بالا) انجام شده و نتایج با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری *SDSM* و الگوریتم *Lars Wg* به مقیاس منطقه‌ای (شهرستان پلدختر) ترسیم شده است. برای واسنجی مدل‌ها، از داده‌های دمایی و بارش ثبت‌شده بین سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳ استفاده گردید. نتایج حاکی از آن است که مدل *Can ESM5.0* در شبیه‌سازی دما عملکرد رضایت‌بخشی داشته، اما در پیش‌بینی بارش با محدودیت‌هایی مواجه است. تحلیل نوسانات پیش‌بینی‌شده نشان می‌دهد مدل *BCC-CSM2-MR* بارش قابل توجهی را از ژوئن تا اکتبر پیش‌بینی می‌کند، در حالی که سناریوی *SSP5-8.5* به طور کلی منجر به افزایش دمای بیشتری نسبت به *SSP1-2.6* می‌شود. یافته‌های این مطالعه بر افزایش دمای مورد انتظار در تمامی سناریوها، به ویژه سناریوهای با انتشار بالا (*SSP5-8.5*)، و همچنین وجود تفاوت‌های معنادار در پیش‌بینی بارش بین مدل‌ها تأکید دارد. این نتایج، چالش‌های اقلیمی پیش رو را برجسته کرده و بر لزوم برنامه‌ریزی دقیق برای سازگاری با این تغییرات تأکید می‌کند. در مجموع، یافته‌های این پژوهش می‌تواند به مدیریت بهینه منابع آب در آینده، تدوین راهکارهای مؤثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی، و فراهم آوردن بستری مناسب برای تصمیم‌گیری آگاهانه و برنامه‌ریزی استراتژیک کمک شایانی نماید.

کلید واژه‌ها: تغییرات آب و هوا، پلدختر، شبیه‌سازی، مدل گردش عمومی جو.

مقدمه

است. همچنین پیش بینی جریان در مقیاس سالانه و ماهانه در ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر افزایش می‌یابد. در پژوهشی دیگر شاهی و همکاران (۲۰۲۴) تاثیر 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 آب و هوا 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. در پژوهشی کومان و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات آینده بارش، دما و شرایط خشکسالی ناشی از آن را بر اساس شش مدل آب و هوای جهانی (GCM) از مدل‌های (CMIP6) تحت سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در کشور ساحل عاج مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تا سال ۲۱۰۰، بارش سالانه به طور متوسط ۱۳۳ میلی‌متر و ۱۷۷ میلی‌متر به ترتیب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 کاهش می‌یابد. در پژوهشی دیگر کروز گزنالس و همکاران (۲۰۲۵) به ارزیابی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) شامل ACCESS-MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL و 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. 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 برنامه ریزی‌های مرتبط با آن، در سطح منطقه ای مورد ارزیابی قرار گیرد. اهمیت این تحقیق از آنجا ناشی می‌شود که شهرستان پلدختر، واقع در استان لرستان،

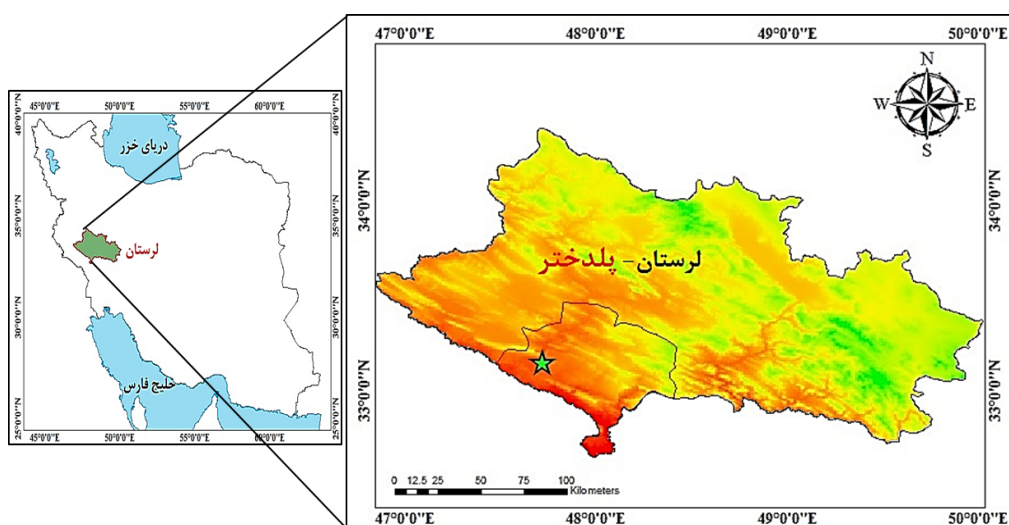
امروزه به دلیل تأثیرات شدید تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی بر ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های مختلف و سیستم‌های تولیدی، نگران‌کننده‌ترین اختلالات ناشی از فعالیت‌های انسانی برای بشر امروزی هستند (کامروزمان و همکاران، ۲۰۲۳؛ کروز-گونزالز و همکاران، ۲۰۲۱). فعالیت‌های طبیعی و انسانی سبب گرم شدن سطح زمین و به تبع آن افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌شود. با این حال؛ تغییرات اقلیمی از دهه ۱۹۷۰ به ویژه با مصرف سوخت‌های فسیلی، رشد جمعیت، صنعتی‌شدن، جنگل‌زدایی، کشاورزی گسترده و تغییر کاربری اراضی توسط انسان تقویت شده است. تأثیرات مستقیم تغییرات اقلیمی شامل پدیده‌های متعددی است. یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی، افزایش دما و نوسانات بارش است که با افزایش رویدادهای آب و هوایی شدید پدیده‌هایی مانند خشکسالی، سیل، تگرگ، امواج گرما، بالا آمدن سطح دریا، امواج سرما و آتش‌سوزی‌های جنگلی به وقوع می‌پیوندد (بوستوس و همکاران، ۲۰۲۴؛ ترنبرث و همکاران، ۲۰۱۵). در دهه‌های اخیر برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی بر روی سامانه‌های مختلف از جمله منابع آب و ... از مدل‌های گردش عمومی جو استفاده می‌شود. مدل‌های گردش عمومی برای شبیه‌سازی تغییرات در گردش جوی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده می‌شوند؛ هدف آن‌ها نمایش تمام فرآیندهای مرتبطی با پاسخ زمین به افزایش گاز CO2 می‌باشد و اصلی‌ترین گام برای ارزیابی حساسیت اقلیمی است (خان و نعیم ۲۰۲۳). این مدل‌ها نه تنها بینشی نسبت به پدیده‌های اقلیمی فعلی ارائه می‌دهند، بلکه اطلاعاتی را برای سیاست‌گذاری جهانی در مورد روندهای افزایشی این پدیده‌ها فراهم می‌کنند (بوستوس و همکاران ۲۰۲۴). 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 بصورت زیر تشریح می‌گردد. در پژوهشی فیزا و همکاران (۲۰۲۴) اثر تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی رودخانه آمو در اتیوپی اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP245 و SSP585) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد جریان پیش‌بینی‌شده حوضه به‌جز در ماه‌های مارس، آوریل و می تحت سناریوی SSP245 کاهش یافته

مواد و روش‌ها

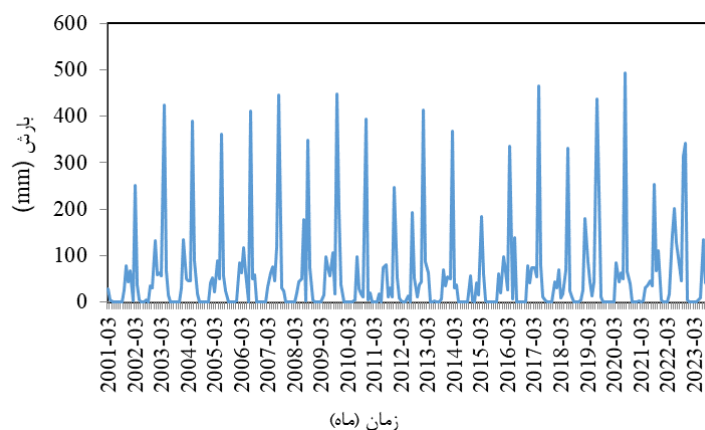
منطقه مورد مطالعه

شهرستان پلدختر یکی از شهرستان‌های استان لرستان با وسعتی معادل ۳۶۱۵ کیلومتر مربع که ۱۲/۹ درصد مساحت کل استان را تشکیل می‌دهد. در جنوب استان لرستان در محدوده میانی سلسله جبال زاگرس واقع شده است. این شهرستان در موقعیت جغرافیایی ۴۷ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۷۱۳/۵ متر می‌باشد. بارندگی متوسط سالانه دشت ۳۷۲/۶ میلیمتر و دمای متوسط سالانه ۲۲/۸ درجه سانتیگراد است. همچنین این شهرستان در تابستان دارای آب و هوایی گرم و خشک و در زمستان معتدل و نسبتاً سرد می‌باشد. 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.

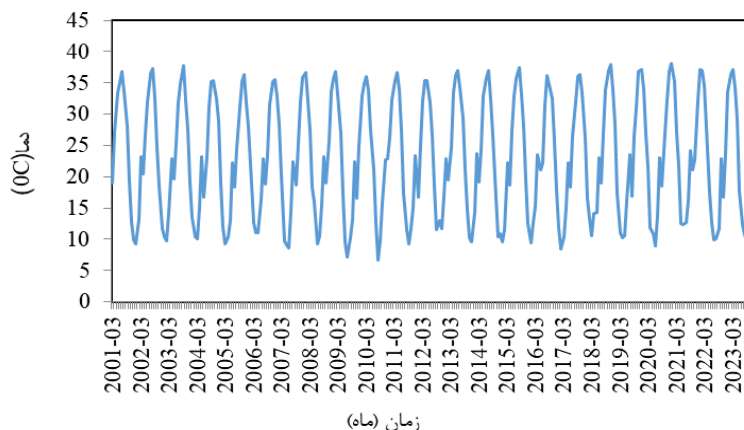
به دلیل موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی خاص خود، به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. تغییرات در دما و بارش می‌تواند منجر به افزایش خشکسالی، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و افزایش خطر سیلاب شود. بنابراین، ارزیابی دقیق اثرات تغییر اقلیمی بر این منطقه، برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و کشاورزی ضروری است. بنابراین، در این پژوهش به بررسی اثر تغییر اقلیمی بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شهرستان پلدختر واقع در استان لرستان با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی‌کننده CanESM5 و مدل ریز مقیاس نمایی SDSM و الگوریتم Lars-WG بر اساس سناریوهای انتشار طراحی شده در دوره پایه ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ برای پیش‌بینی وضعیت جوی طی دوره آتی، از دو سناریو خوش‌بینانه SSP1-2.6 و بدبینانه SSP5-8.5 برای دوره بیست‌ساله در آینده نزدیک طی سال‌های ۲۰۲۳ تا ۲۰۴۳ پرداخته خواهد شد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه



شکل ۲- وضعیت بارش منطقه مورد مطالعه



شکل ۳- وضعیت بارش منطقه مورد مطالعه

عمومی شبیه سازی نماید. این مدل بر پایه قوانین فیزیک بنا شده و از روابط ریاضی برای پیش بینی متغیرهای اقلیمی در هر یک از سلول‌های شبکه بهره می‌گیرند (ایروین و همکاران، ۲۰۱۲). مدل‌های GCM به سه دسته مدل‌های گردش عمومی جو (AGCM)، گردش عمومی اقیانوسی (OGCM) و گردش عمومی جوی- اقیانوسی (AOGCM) تقسیم می‌شوند (جهانگیر و همکاران، ۲۰۲۲). در حال حاضر معتبرترین ابزار برای مطالعات تغییرات اقلیمی مدل (AOGCM) است که مهم ترین ورودی این مدل‌ها، میزان انتشار گازهای گلخانه ای که در قالب سناریو انتشار برای دوره های آتی ارائه شده است. مدل‌های اقلیمی عملکرد متفاوتی در پیش بینی متغیرهای هواشناسی در نقاط مختلف دارند. از اینرو 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 (۲۰۲۲-۱۹۹۲) از سازمان هواشناسی استان لرستان اخذ خواهد شد. در ادامه با مقایسه خروجی این مدل‌ها با داده‌های 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 (جونس و نیل، ۲۰۱۶؛ سمونو و استراتونویچ، ۲۰۱۵؛ کریکلر و همکاران، ۲۰۱۶).

متد

ابتدا داده‌های هواشناسی شهرستان پلدختر از سازمان هواشناسی استان لرستان اخذ شد. سپس با جمع‌آوری سری داده‌های مشاهداتی دما و بارش روزانه در دوره پایه ۳۰ ساله (۲۰۲۳-۱۹۹۲) 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 تولید شده توسط مدل‌های مختلف دریافت شد. داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده این مدل‌ها برای استان لرستان با توجه به دامنه طول و عرض جغرافیایی قابل دریافت هستند. برای دستیابی به هدف این مطالعه داده های 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 نرم افزاری 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 داده های اقلیمی مورد نظر 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 بیست ساله آتی ۲۰۲۰-۲۰۵۰ ریز مقیاس نمایی آماری و پیش بینی شدند.

مدل گردش عمومی جو

مدل‌های گردش عمومی GCM قادر هستند تا تغییرات پارامترهای اقلیمی را در سناریوهای مختلف مدل گردش

ارتباط کمی بین متغیرهای بزرگ مقیاس و متغیرهای کوچک مقیاس 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 پیش بینی می‌کند. در این پژوهش اطلاعات مربوط به متغیرهای بارش، دمای بیشینه، دمای کمینه و تعداد ساعات آفتابی مربوط به ایستگاه هواشناسی پلدختر در طی سالهای ۲۰۰۲-۲۰۲۲ 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 دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استفاده خواهد شد. از آنجاییکه مدل‌های گزارش ششم در نرم‌افزار LARS WG تعریف نشده هستند بنابراین، نیاز است تا خروجی هر کدام از مدل‌ها با تعریف سناریو ریزمقیاس‌شود. به‌همین منظور داده‌های بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه مربوط به خروجی هر مدل برای دوره آتی تحت هر دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 استخراج شود. سپس برای پارامتر بارش، نسبت میانگین بلند مدت 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.

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 پلدختر 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.

در این پژوهش مطابق جدول ۱ از دو مدل زیر بدلیل ناقص بودن آمار و اطلاعات ماهانه سایر مدل‌ها استفاده شد. همچنین در این پژوهش از دو سناریوی خوش بینانه حالت (SSP1.2.6) و بحرانی (SSP5.8.5) برای دو مدل مذکور

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

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{n} \quad (4)$$

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 براساس ترکیب سناریوهای انتشار (RCPs) و سناریوهای اقتصادی-اجتماعی (SSPs) بررسی می‌شود. در واقع براساس 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.

ریزمقیاس‌نمایی

یکی از مشکلات استفاده از خروجی مدل‌های اقلیمی، بزرگ مقیاس بودن سلول‌های محاسباتی آنها است. از اینرو 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 (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷).

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

بدست آمده برای دو مدل GCM مورد بررسی، افزایش دمای حداقل و حداکثر را در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به دوره (۱۹۹۰-۲۰۱۹) نشان می‌دهد. با توجه به نتایج SSP دمای حداکثر و دمای حداقل در هر دو سناریوی بدبینانه (حد بالا ssp585) و خوش بینانه (ssp1.2.6) هر دو افزایش یافته و تقریباً یکسان هستند. اما میزان بارندگی در سناریوی بدبینانه نسبت به حد پایین یا خوش بینانه بیشتر کاهش یافته است.

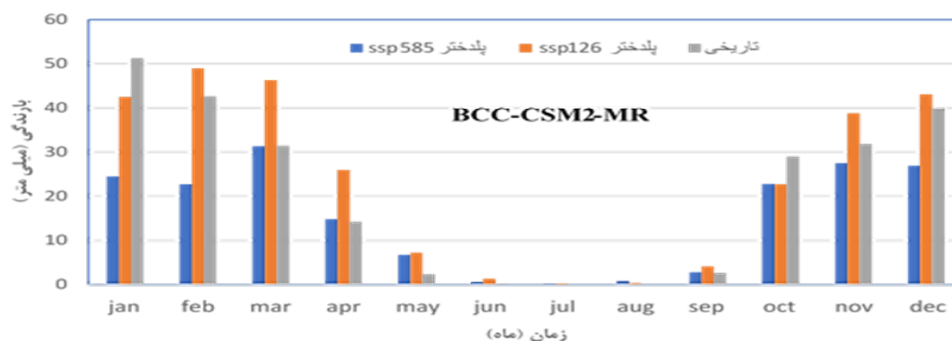
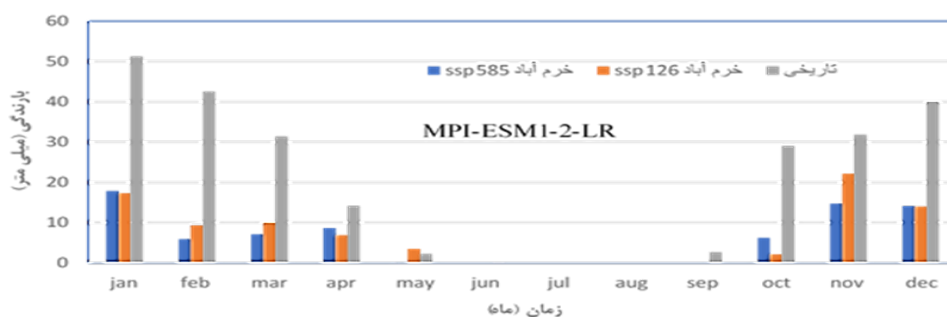
برای ایستگاه سینوپتیک پلدختر استخراج گردید. نتایج حاصل از مقیاس‌کاهی و اصلاح اریبی مدل‌های GCM مورد استفاده در این مطالعه تحت سناریوهای SSP برای متغیرهای اقلیمی (دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش) در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین، مقایسه نتایج تغییرات متغیرهای اقلیمی بارش و دمای حداقل و حداکثر در شرایط تغییر اقلیم برای سناریوهای مورد بررسی در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج

جدول ۱- مشخصات مدل‌های به کار برده شده CMIP6

ردیف	نام مدل	کشور توسعه دهنده	دقت مکانی مدل (درجه)
۱	BCC-CSM2-MR	China	1.12°*12°
۲	MPI-ESM1-2-LR	Germany	1.25°*0.94°

جدول ۲- تغییرات میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی سالانه مدل‌های GCM مورد استفاده تحت سناریوی SSP در دو مدل مختلف در دوره آینده (۲۰۲۰-۲۰۴۹) نسبت به دوره گذشته (۱۹۹۰-۲۰۱۹)

پلدختر		متغیرهای اقلیمی / مدل	
ssp126	ssp585		
۰/۲۱	۰/۲۲	دمای حداکثر	MPI-ESM1-2-LR
۰/۱۷	۰/۱۷	دمای حداقل	
۰/۲۵	۰/۲۶	بارندگی	
۰/۴۷	۰/۴۷	دمای حداکثر	BCC-CSM2-MR
۰/۳۳	۰/۳۳	دمای حداقل	
۰/۰۸	-۰/۱۳	بارندگی	



شکل ۴- میانگین بلندمدت متغیرهای اقلیمی مدل‌های GCM در دو سناریوی ssp126 و ssp585

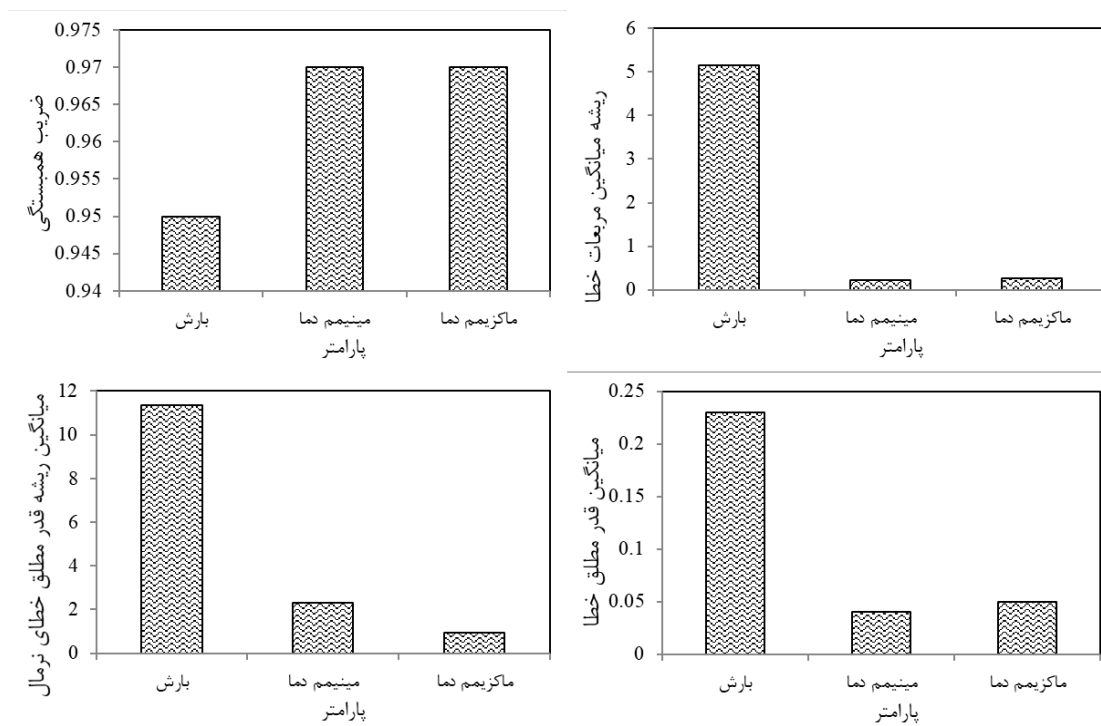
حال مدل در شبیه‌سازی بارش دقت کمتری را نشان می‌دهد که با یافته‌های حسینی و همکاران (۲۰۱۵) و دهقانی و همکاران (۲۰۲۲) مطابقت دارد.

همچنین در این پژوهش از مدل گردش عمومی جو CMIP6 جهت پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی نظیر بارش و دما طی سالهای ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ استفاده شد. بمنظور پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی در مدل گردش عمومی جو از دو سناریو اقلیمی SSP126 و SSP585 استفاده شد. همانطور که مشاهده می‌گردد سناریو SSP126 بصورت خوشبینانه و SSP585 بصورت بدبینانه در نظر نظر گرفته شد. همچنین از مدل اقلیمی Can esm 5 که بیشترین سازگاری با منطقه دارد، در نظر گرفته شد. جهت ریز مقیاس‌نمایی نیز از مدل Lars WG 8 استفاده شد.

آنالیز آماری شبیه‌سازی مدل برای پارامترهای بارندگی و دما در دوره تاریخی در جدول ۳ نشان داده شده است. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های تولید شده با استفاده از مدل LARS-WG و داده‌های مشاهده شده در دوره تاریخی در جدول ۳ و شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد مقدار ضریب تبیین در کلیه پارامترهای مورد بررسی بیشتر از ۰/۹۴۰ محاسبه گردید و میانگین خطای مطلق (MAE) برای شبیه‌سازی بارش، دمای حداقل، دمای حداکثر به ترتیب ۰/۲۴، ۰/۰۴، ۰/۰۵ بدست 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 ۵/۱۶ و ۱۱/۳۶) و خطای بیشتری را نشان می‌دهد. بنابراین توانایی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی تأیید شده ولی با این

جدول ۳- شاخص آماری ارزیابی مدل LARS-WG 8

پارامتر	R2	RMSE	NRMSE	MAE
بارش	۰/۹۵۰	۵/۱۶	۱۱/۳۶	۰/۲۳
مینیمم دما	۰/۹۷	۰/۲۱	۲/۳۱	۰/۰۴
ماکزیمم دما	۰/۹۷	۰/۲۷	۰/۹۵	۰/۰۵



شکل ۵- نمودارها شاخص‌های ارزیابی

(انتشار پایین) نشان می‌دهد که مدل‌ها در پیش‌بینی میزان بارش متفاوت هستند، اما روند کلی کاهش بارش در سناریوی انتشار بالا در هر دو مدل مشهود است. این کاهش بارش به‌ویژه در ماه‌های گرم سال بیشتر نمایان است که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش خطر خشکسالی در منطقه باشد.

در نمودار دما، مقایسه سناریوهای مختلف شامل SSP5-8.5 و SSP1-2.6 نشان‌دهنده روند گرمایش واضح در تمام سناریوهاست. اختلاف دمای پیش‌بینی شده بین سناریوی انتشار بالا و پایین به حدود ۲-۳ درجه سانتی‌گراد می‌رسد که نشان‌دهنده حساسیت شدید منطقه به میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای است. همچنین نوسانات دمایی در سناریوهای با انتشار بالا بیشتر است که می‌تواند به معنی افزایش فراوانی رویدادهای حدی گرمایی باشد.

تحلیل یکپارچه این نمودارها نشان می‌دهد که شهرستان پلدختر در دهه‌های آینده با چالش‌های اقلیمی مهمی روبرو خواهد بود. افزایش دما همراه با کاهش بارش می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی منطقه داشته باشد. تفاوت بین نتایج مدل‌های مختلف نیز بر اهمیت استفاده از چندین مدل برای ارزیابی جامع‌تر تغییرات اقلیمی در این منطقه تأکید دارد. این یافته‌ها لزوم برنامه‌ریزی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی و مدیریت پایدار منابع آب در منطقه را پررنگ می‌سازد.

نتایج این مطالعه نشان داد افزایش دما را در سراسر منطقه مورد مطالعه رخ داده است، به طور کلی با نتایج ناطقی و همکاران (۲۰۲۲) 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 سانتیگراد پیش‌بینی کردند که مشابه افزایش ۱۰ درجه سانتیگراد پیش‌بینی شده ما تحت سناریوی مشابه SSP126 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 (۲۰۲۰)، 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

جدول ۴ عملکرد سناریوهای گزارش ششم در پیش‌بینی میزان نوسانات دوره آبی نسبت به دوره پایه نشان داده شده است این جدول مقادیر پیش‌بینی شده بارش، حداکثر دما و حداقل دما را برای هر ماه از سال، بر اساس دو مدل مختلف آب و هوایی MPI-ESM1-2-LR و BCC-CSM2-MR و دو سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای ssp585 و ssp126 ارائه می‌دهد. این داده‌ها می‌توانند برای ارزیابی اثرات تغییرات آب و هوایی بر یک منطقه خاص و برنامه‌ریزی برای سازگاری با این تغییرات استفاده شوند. لازم به ذکر است که مدل BCC-CSM2-MR در مقایسه با مدل MPI-ESM1-2-LR، مقادیر بسیار بالاتری از بارش را در ماه‌های ژوئن تا اکتبر نشان می‌دهد.

هر دو مدل آب و هوایی الگوهای فصلی مشابهی را برای دما نشان می‌دهند، با افزایش دما در طول ماه‌های بهار و تابستان و کاهش آن در پاییز و زمستان. با این حال، تفاوت‌های قابل توجهی در مقادیر پیش‌بینی شده بارش بین دو مدل وجود دارد. مدل MPI-ESM1-2-LR بارش نسبتاً یکنواخت‌تری را در طول سال نشان می‌دهد، در حالی که مدل BCC-CSM2-MR بارش بسیار بیشتری را در ماه‌های خاص (به ویژه ژوئن تا اکتبر) پیش‌بینی می‌کند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تفاوت در نحوه مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی در هر مدل باشد.

به طور کلی، سناریوی ssp585 (سناریوی با انتشار بالاتر) منجر به پیش‌بینی دماهای بالاتر در مقایسه با سناریوی ssp126 (سناریوی با انتشار پایین‌تر) می‌شود. این تفاوت به ویژه در ماه‌های گرم‌تر سال مشهود است. در مورد بارش، تفاوت بین دو سناریو کمتر واضح است و بسته به مدل آب و هوایی و ماه مورد نظر، ممکن است مقادیر پیش‌بینی شده بارش در سناریوهای مختلف، متفاوت باشد.

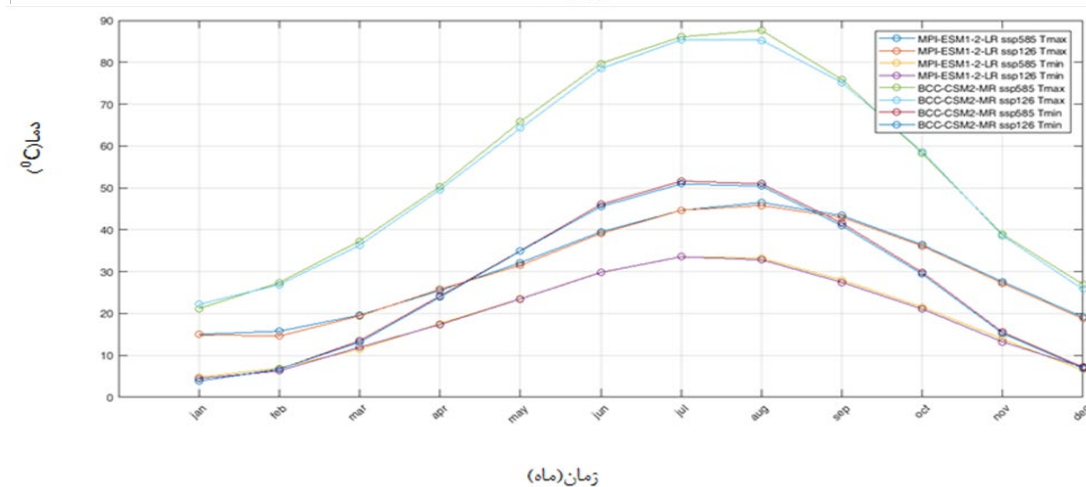
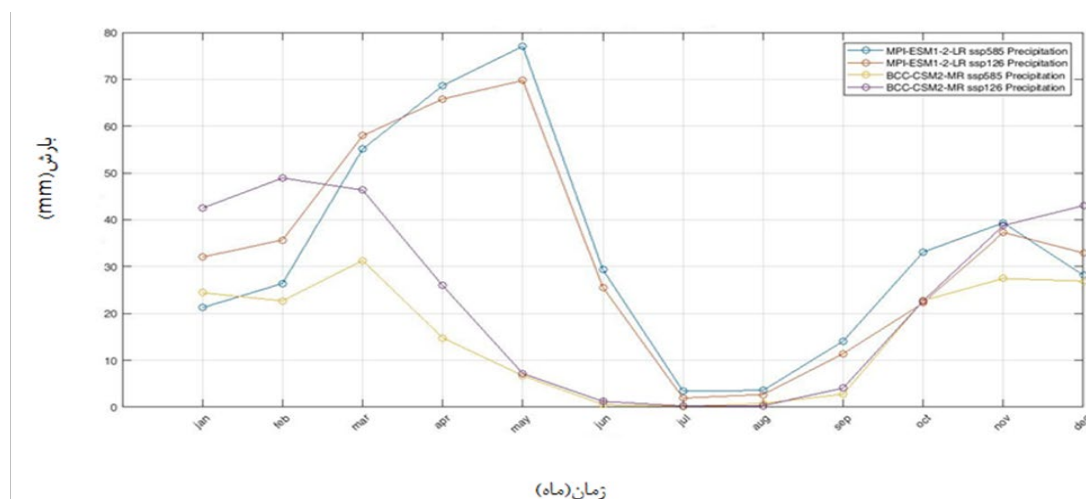
در شکل ۶ مقایسه روند نوسانات ماهانه پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک الشتر در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه نشان داده شده است نمودارهای ارائه شده از CMIP6 نشان‌دهنده تغییرات بارش و دما در شهرستان پلدختر تحت سناریوهای مختلف اقلیمی هستند. در نمودار بارش، مقایسه بین دو مدل MPI-ESM1-2-LR و BCC-CSM2-MR تحت سناریوهای SSP5-8.5 (انتشار بالا) و SSP1-2.6

برای تدوین استراتژی‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی سازگاری برای کشاورزی و ابتکارات بهداشت عمومی استفاده کنند.

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

جدول ۴- عملکرد سناریوهای گزارش ششم در پیش‌بینی میزان نوسانات دوره آبی نسبت به دوره پایه

BCC-CSM2-MR model						MPI-ESM1-2-LR model						month
دمای مینیمم		دمای ماکزیمم		بارش		دمای مینیمم		دمای ماکزیمم		بارش		
ssp126	ssp585	ssp126	ssp585	ssp126	ssp585	ssp126	ssp585	ssp126	ssp585	ssp126	ssp585	
3.89	3.88	22.17	21.17	42.50	24.43	4.50	4.78	14.97	15.01	32.04	21.23	jan
6.76	6.69	26.90	27.37	48.92	22.70	6.30	7.01	14.61	15.78	35.70	26.41	feb
13.14	13.50	36.29	37.31	46.36	31.31	11.95	11.49	19.45	19.61	57.96	55.10	mar
23.91	24.21	49.61	50.32	25.95	14.80	17.37	17.58	25.79	25.50	65.80	68.65	apr
34.93	34.98	64.24	65.81	7.18	6.72	23.49	23.53	31.53	32.15	69.76	77.05	may
45.53	46.05	78.49	79.74	1.24	0.56	29.80	29.82	39.11	39.49	25.58	29.38	jun
50.98	51.64	85.37	86.06	0.24	0.16	33.55	33.55	44.69	44.64	1.94	3.41	jul
50.43	50.98	85.26	87.63	0.32	0.80	32.83	33.25	45.81	46.52	2.69	3.58	aug
40.99	41.58	75.18	75.87	4.06	2.76	27.46	28.01	42.97	43.41	11.42	14.09	sep
29.39	29.83	58.67	58.25	22.70	22.77	21.08	21.55	36.13	36.42	22.24	33.12	oct
15.22	15.55	38.61	38.89	38.80	27.47	13.24	13.90	27.21	27.58	37.30	39.35	nov
6.88	7.25	25.78	26.95	43.04	26.90	7.15	6.48	18.77	19.14	32.92	28.15	dec



شکل ۶- مقایسه روند نوسانات ماهانه پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک پلدختر در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه

شد. در تابستان نیز تفاوت دمایی قابل توجه است (۱۳۰/۶۵ درجه در مقابل ۱۲۸/۳ درجه)، که می‌تواند امواج گرمایی شدیدتری را ایجاد کند.

الگوی دمای مینیمم نیز مشابه دمای ماکزیمم است، با این تفاوت که کاهش دما در سناریوی SSP1-2.6 محسوس‌تر است. به عنوان مثال، در زمستان، دمای مینیمم تحت SSP5-8.5 (۱۸/۲۷ درجه) نسبت به SSP1-2.6 (۱۵/۱۷ درجه) بالاتر است، که نشان دهنده کاهش شدت سرمای زمستانی و احتمالاً تأثیر بر چرخه حیات گونه‌های گیاهی و جانوری است. در بهار و تابستان نیز اختلاف دما بین دو سناریو مشهود است، اما با شیب کمتر. این نتایج بر اهمیت کاهش انتشار کربن برای جلوگیری از تغییرات شدید دما تأکید دارد. به طور کلی جدول و شکل زیر نشان می‌دهند که سناریوی SSP5-8.5 منجر به تغییرات اقلیمی شدیدتر، شامل کاهش بارش در فصول گرم و افزایش دما در تمام فصول می‌شود، در حالی که سناریوی SSP1-2.6 اثرات ملایم‌تری دارد. این تفاوتها لزوم برنامه ریزی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی را پررنگ تر می‌کند.

در جدول ۵ و شکل ۶ عملکرد سناریوهای گزارش ششم بصورت فصلی مورد بررسی قرار گرفت نتایج نشان داد میانگین بارش در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به زمان پایه و سناریوی SSP1-2.6 در فصل بهار افزایش یافته (۲۰۰/۸۰ نسبت به ۱۹۲/۲۳ میلیمتر)، در حالی که در تابستان و پاییز کاهش قابل توجهی نشان می‌دهد (۳۶/۳۷ نسبت به ۲۸/۱۲ میلیمتر در تابستان و ۸۶/۵۶ نسبت به ۶۸/۴ میلیمتر در پاییز). این الگو نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی و جابجایی فصل بارش‌ها است. در مقابل، زمستان در سناریوی SSP5-8.5 با کاهش بارش نسبت به SSP1-2.6 مواجه است (۷۵/۷۹ نسبت به ۱۰۲/۲۲ میلیمتر)، که احتمالاً ناشی از تأثیر گرمایش جهانی بر الگوهای اتمسفری است.

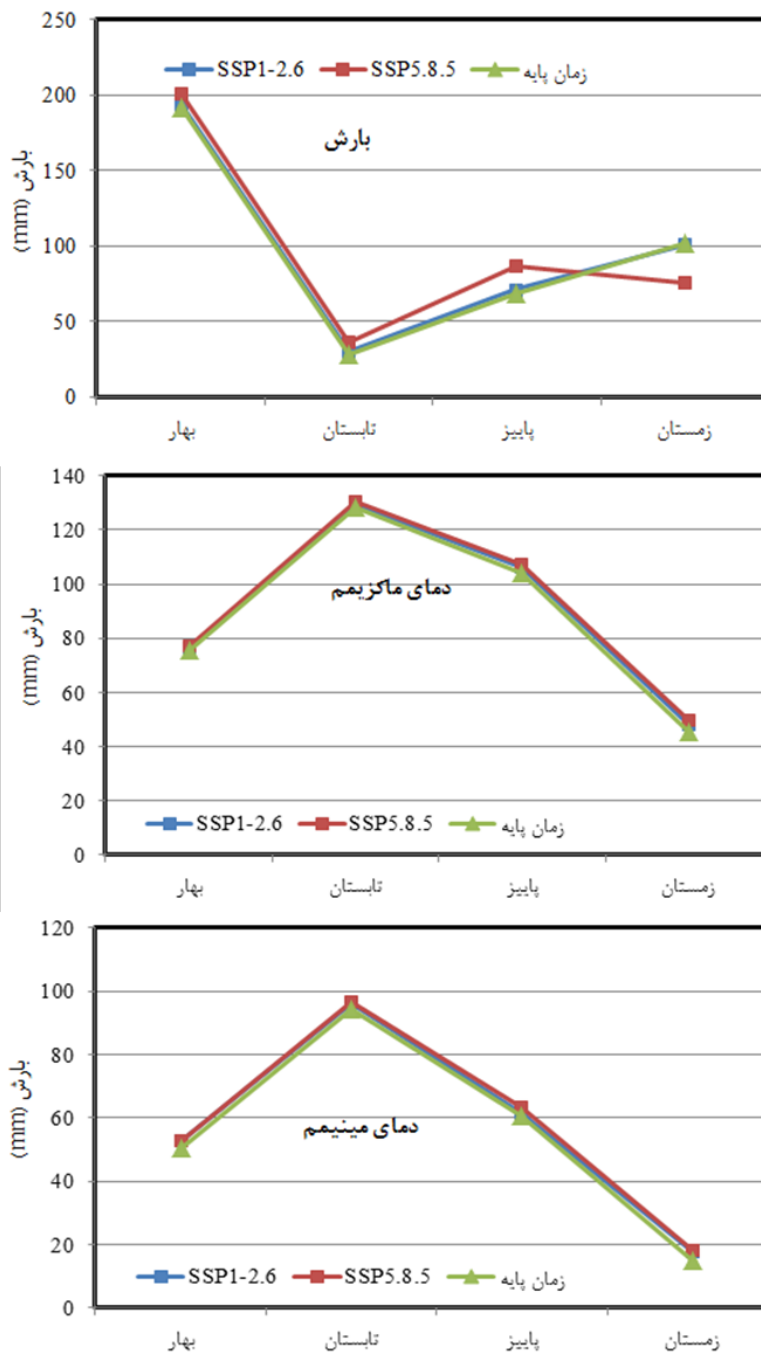
دمای ماکزیمم در تمام فصول تحت سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP1-2.6 افزایش یافته است، که نشان دهنده تشدید اثرات گرمایش جهانی در صورت عدم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. بیشترین اختلاف در فصل زمستان مشاهده می‌شود (۴۹/۹۳ درجه در SSP5-8.5 نسبت به ۴۵/۳ درجه در SSP1-2.6)، که احتمالاً منجر به ذوب زودرس برف‌ها و تغییر در رژیم آبدهی رودخانه‌ها خواهد

جدول ۵- عملکرد سناریوهای گزارش ششم بصورت فصلی در پیش بینی پارامترهای هواشناسی

بارش			
MPI-ESM1-2-LR model		زمان پایه	فصل
SSP5.8.5	SSP1-2.6		
200.80	193.52	192.23	بهار
36.37	30.21	28.12	تابستان
86.56	70.95	68.4	پاییز
75.79	100.66	102.22	زمستان

دمای ماکزیمم			
MPI-ESM1-2-LR model		زمان پایه	فصل
SSP5.8.5	SSP1-2.6		
77.25	76.77	75.5	بهار
130.65	129.61	128.3	تابستان
107.41	106.32	104.35	پاییز
49.93	48.35	45.3	زمستان

MPI-ESM1-2-LR model		زمان پایه	فصل
SSP5.8.5	SSP1-2.6		
52.61	52.81	50.31	بهار
96.62	96.17	94.12	تابستان
63.47	61.78	60.45	پاییز
18.27	17.94	15.17	زمستان



شکل ۷- مقایسه روند نوسانات فصلی پارامترهای هواشناسی ایستگاه سینوپتیک پلدختر در دوره زمانی آینده نسبت به دوره پایه

نتیجه گیری

منابع

- در این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی دما و بارش ثبت شده در ایستگاه سینوپتیک پلدختر واقع در استان لرستان با استفاده از مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی Can ESM5.0 در گزارش ششم CMIP6 و براساس سناریوهای طراحی شده دوره پایه ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳ و استفاده از آنها برای پیش‌بینی وضعیت جوی دوره‌های آبی بر مبنای دو سناریو خوشبینانه SSP1-2-6 و بدبینانه SSP5-8-5 طی دوره سی ساله در آینده‌ی نزدیک ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ پرداخته شد. نتایج بررسی خطای عملکرد مدل نشان داد که Can ESM5.0 با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای دمای حداکثر و دمای حداقل است، اما در شبیه‌سازی پارامتر بارش نسبت به دو پارامتر دیگر خطای بیشتری را نشان می‌دهد. نتایج تغییرات دمایی نشان داد در سطح دوره مورد بررسی این شهرستان متأثر از گرمایش جهانی می‌باشد بگونه‌ای که تغییرات دمایی حاکی از افزایش دما در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ به ترتیب در سناریوهای SSP126 و SSP585 بوده است. نتایج حاصل از پیش‌بینی نوسانات بارش و دما نشان داد دل BCC-CSM2-MR بارش بسیار بالاتری را در ماه‌های ژوئن تا اکتبر پیش‌بینی می‌کند، در حالی که سناریوی ssp585 به طور کلی منجر به دماهای بالاتری نسبت به ssp126 می‌شود. همچنین نتایج نشان داد افزایش دما در تمام سناریوهای مورد بررسی به خصوص در سناریوهای با انتشار بالاتر (ssp585)، و تفاوت‌های قابل توجهی در پیش‌بینی بارش بین مدل‌ها وجود دارد. این گزارش‌ها به عنوان یک منبع قابل اعتماد برای سازمان‌ها، سیاست‌گذاران و جامعه علمی برای اتخاذ تصمیمات مناسب در خصوص مدیریت و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین با توجه به خشک و نیمه خشک بودن این شهرستان، برای کاهش اثرات تغییر اقلیم می‌توان از راهکارهای لازم از قبیل تدابیری برای اصلاح نظام آبیاری، روش‌های بمنظور کاهش تبخیر و اصلاح الگوی کشت استفاده کرد.
- Annan, J.D. and Hargreaves, J.C. 2011. Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble. *J. Climate*, 24: 4529–4538.
 - Ashraf, S., Nazemi, A., AghaKouchak, A. 2021. Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Sci Rep* 11(1):1–10
 - Bustos DF, Torres RR, Rodríguez L, Castillo M, Bourrel L (2024) Observation and Projection of Marine heatwaves in the Caribbean Sea from CMIP6 models. *Remote Sens* 16(13). <https://doi.org/10.3390/rs16132357>
 - Cruz González, A., Arteaga-Ramirez, R., Soria-Ruiz, J. Sanchez Cohen, I., Monterroso Rivas, A.I. and Quevedo, A. 2025. Climate change projections in temperature and precipitation using cmip6 in Central Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*.
 - Cruz-González A, Sánchez-Cohen I, Macías-Corral MA, Velásquez- Valle MA, Trejo-Calzada R (2021) Hydrologic modeling to measure the impact of climate change in the Yaqui River basin. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 13(1):77–94. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2021.02.040>
 - Dehghani, R., Totabi Poudeh, H., Izadi, Z. 2022. The effect of climate change on groundwater level and its prediction using modern meta-heuristic model. *Groundwater for Sustainable Development*, 16(3), 822-845
 - Fazeli Khiavi, A., Salahi, B., & Goodarzi, M. (2020). Assessment effects of climate change on changes in potential evapotranspiration in the Moghan Plain by RCPs. *Watershed. Eng. Manage.*, 12(4), 977-993. DOI: 10.22092/ijwmse.2019.126245.1649
 - Feyissa, T.A., Demissie, T.A., Saathoff, F. and Gebissa, A. 2024. Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia, *Results in Engineering*, Volume 23, 102708.
 - Ghazi, B., Dutt, S., Torabi Haghighi, A. 2023. Projection of future meteorological droughts in Lake Urmia Basin. *Iran Water* 15(8):1558
 - Hashemi, S., Khosravi, M., Tavousi, T. 2015. Simulating the Longest Length of Dry Spells with Approach of Climate Change in Iran. *Arid Regions Geographic Studies*, 6(22), 18-33.
 - Hosseini, R., Takemura, A. and Hosseini, A. (2015a) Non-linear time-varying stochastic models for agroclimate risk assessment.

- 18- Kouman, K. D., Komlavi, A., Kouadio, B.H., Kabo-bah, A.T., Moctar, D., Siabi, E.K. and Mensah, J.K. 2024. Assessment of climate change in the North-East Region of Côte d'Ivoire: future precipitation, temperature, and meteorological drought using CMIP6 models. *Cogent Engineering*, 11(1): 2345506
- 19- Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K. and Sanderson, B.M. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.* 9: 3461–3482.
- 20- Nateghi, S., Rafiiei sardooi, E., Azareh, A., and Soleimani Sardoo, F. (2022). Predicting future changes in potential evapotranspiration based on RCP scenarios in Halilrood Watershed. *Watershed Eng. Manage.*, 13(4), 769-780. DOI: 10.22092/ijwmse.2021.353294.1874
- 21- O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy, and Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42(1): 169-180.
- 22- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., & Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environ. Change*, 42, 68-153. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Environmental and Ecological Statistics, 22(2):227–246.
- 12- IPCC. 2021. Climate change 2021 the physical science basis, AR6, Summary for policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- 13- Irwin, S.E., et al., 2012. Assessment of Climatic Vulnerability in the Upper Thames River Basin: Downscaling with LARS-WG. Water Resources Research Report. The University of Western Ontario, Department of Civil and Environmental Engineering.
- 14- Jahangir, M.H., Haghghi, P., Danekar, Sh., 2022. Downscaling climate parameters in Fars's province, using models of the fifth report and RCP scenarios. *Ecological Informatics* 68 (2022) 101558. journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolinf.
- 15- Jones, B., Neill, B.C.O. 2016. Spatially explicit global population scenarios consistent with the Shared Socioeconomic Pathways, *Environ. Res. Lett.* 11, 1–10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/8/084003>.
- 16- Kamruzzaman M, Wahid S, Shahid S, Alam E, Mainuddin M, Islam HMT, Cho J, Rahman MM, Chandra J, Thorp KR (2023) Pre- dicted changes in future precipitation and air temperature across Bangladesh using CMIP6 GCMs. *Heliyon* 9(5): e16274. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16274>.
- 17- Khan SF, Naeem UA (2023) Future climate projections using the LARS-WG6 downscaling model over Upper Indus Basin, Paki- stan. *Environ Monit Assess* 195(7). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11419-y>.