

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو

سید نصرالله حسینی^۱، بهارک معتمدوزیری^۲، هادی کیادلیری^۳، حسن احمدی^۴

۱- دانشجوی دکتری گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲ و ۳- دانشیار گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۴- استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

چکیده مبسوط

مقدمه و هدف

تغییر اقلیم به معنای تغییرات بلندمدت و برگشت‌ناپذیر در میانگین شرایط آب و هوایی ناشی از عامل‌های طبیعی و انسانی است. تغییر اقلیم موجب افزایش دمای جهانی، ذوب شدن یخ‌های قطبی، افزایش سطح دریا و بروز رویدادهای شدید اقلیمی می‌شود. اثر زیاد این تغییرات بر متغیرهای هواشناسی مانند دما و بارش سبب اختلال در نظم آب‌ساختی می‌شود. با بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابزارهای پیشرفته و جامع برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌توان فرآیندهای پویایی و گرمای پویایی جوی را شبیه‌سازی کرد. از این‌رو، این پژوهش با هدف پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت مدل‌های گزارش ششم در آبخیز بختگان- مهارلو، انجام شد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از داده‌های روزانه بارش و دمای کمینه و بیشینه پنج ایستگاه هم‌دید ارسنجان، نی‌ریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید استفاده شد. سنجه‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم با استفاده از مدل LARS-WG ریزمقیاس شد. انتخاب نوع ایستگاه بر اساس کافی بودن داده‌ها، پراکندگی و تنوع اقلیمی در آبخیز بود. در این پژوهش، با بهره‌گیری از سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 از برونداد سه مدل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 استفاده شد. با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، ریزمقیاس‌نمایی و اصلاح داده‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها انجام شد. در پایان، پیش‌بینی اقلیمی برای دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ محاسبه شد.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات: bm vaziri@iau.ir

استناد: حسینی، س. ن.، معتمدوزیری، ب.، کیادلیری، ه.، احمدی، ح. ۱۴۰۵. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) در آبخیز بختگان- مهارلو. پژوهش‌های آبخیزداری، ۳۹(۲): ۱۹-۱.

شناسه دیجیتال: 10.22092/wmrj.2025.370599.1634

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۴، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۲۳، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۳۰، تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۱

پژوهش‌های آبخیزداری، سال ۱۴۰۵، دوره ۳۹، شماره ۲، شماره پیاپی ۱۵۱، تابستان ۱۴۰۵، صفحه‌های ۱ تا ۱۹.

© نویسندگان

ناشر: مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس



سپس، داده‌های روزانه بارش و دما ایستگاه‌های همدید آبخیز بختگان- مهارلو پردازش و با دوره پایه مقایسه شدند.

نتایج و بحث

نتایج مدل ACCESS-ESM1-5 نشان‌دهنده تفاوت میانگین بارش دوره پایه و آینده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود و بیشترین بارش پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دو مدل دیگر مربوط به مدل ACCESS-ESM1 بود و اندازه برآورد مدل‌های MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 به اندازه‌های دوره پایه نزدیک‌تر بود. روند دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده در تمام ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای افزایشی و در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود. میانگین سالانه دمای بیشینه از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. بیشترین دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده مربوط به مدل CNRM-CM6-1 بود. بیشترین دما مربوط به شیراز و تخت جمشید بود. روند دمای کمینه در همه ایستگاه‌ها افزایشی بود. میانگین دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد به ۱۱/۵ درجه (در سناریوی SSP585) افزایش یافت و این یافته نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است. بیشترین دمای کمینه پیش‌بینی‌شده در مقایسه با دیگر مدل‌ها مربوط به مدل CNRM-CM6-1 بود. دامنه تغییرات پیش‌بینی‌شده بارش آبخیز از ۲۴۸/۹ تا ۲۸۸/۷ میلی‌متر و دامنه تغییرات پیش‌بینی‌شده دمای بیشینه و کمینه نیز به ترتیب از ۲۶ تا ۲۶/۹ و ۱۱ تا ۱۱/۹ درجه سانتی‌گراد بود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

بر اساس نتایج این پژوهش، روند افزایشی بارش و دما (بیشینه و کمینه) با سناریوهای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای هم‌سو بود که بیانگر گرم‌تر و نسبتاً مرطوب‌تر شدن منطقه بختگان- مهارلو در آینده است. تفاوت میان مدل‌ها نشان‌دهنده نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌هاست که ضرورت استفاده از چند مدل و سناریو برای کاهش خطر تصمیم‌گیری است. این تغییرات نیازمند برنامه‌ریزی و سازگاری دقیق برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی در منطقه است. بر پایه نتایج این پژوهش در آبخیز بختگان- مهارلو، پیشنهاد می‌شود به منظور کاهش مصرف آب و افزایش تاب‌آوری اقلیم، الگوی کشت به سوی محصولات کم‌آب‌بر تغییر یابد. افزون بر این، بهره‌گیری از آبیاری هوشمند و اجرای طرح‌های آبخیزداری و آبخوان‌داری نیز پیشنهاد می‌شود. برای بهبود پایداری منابع زیرزمینی، مدیریت مشارکتی منابع، آموزش بهره‌برداران و پایش چاه‌های غیرمجاز پیشنهاد می‌شود. همچنین، برای سازگاری مؤثر با تغییرات اقلیمی، تنوع‌بخشی به معیشت روستایی با توسعه مشاغل سبز و پایدار، پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی

آبخیز بختگان- مهارلو، سناریوهای SSP، مدل LARS-WG، مدل‌های گزارش ششم

مقدمه

دریاها است. افزون بر این، شدت رویدادهای آب و هوایی مانند موج گرما، طوفان‌ها، خشک‌سالی‌ها و سیل‌ها تکرارپذیرتر و بیشتر شده است (ژای و همکاران ۲۰۲۵). از آنجایی که نخستین اثرات تغییر اقلیم روی متغیرهای هواشناسی بارندگی و دما است و تغییر در این متغیرها سبب برهم زدن نظم بسیاری از رخداد‌های آب‌شناسی می‌شود، بررسی دقیق تغییرات این سنج‌ها برای آینده و روش‌های شبیه‌سازی آن‌ها موضوع مهمی به‌شمار می‌آید (سنویراتنه و همکاران

تغییر اقلیم به معنای تغییرات بلندمدت و برگشت‌ناپذیر در میانگین شرایط آب و هوایی یک منطقه است و شامل تغییرات دما، بارندگی، رطوبت و دیگر عامل‌های جوی است. این تغییرات ممکن است ناشی از عامل‌های طبیعی یا فعالیت‌های انسانی باشند و معمولاً در بازه زمانی چند دهه یا بیشتر رخ می‌دهند (کوندزوچ و همکاران ۲۰۱۸). مشاهده‌ها بیانگر افزایش دمای جهانی زمین و اقیانوس‌ها، ذوب شدن یخ‌های قطبی و یخچال‌های طبیعی، افزایش سطح

پیوسته افزایشی پیش‌بینی شد. با این حال، تفاوت اندازه تغییرات پیش‌بینی شده در GCMها و SSPها متفاوت بود. در سال‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۹۰ بیشترین تغییرات میانگین دمای بیشینه در سطح استان به ترتیب ۲/۶۴ و ۴/۷۲ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل بهار و بیشترین تغییرات میانگین دمای کمینه، به ترتیب ۲/۹۷ و ۴/۳۸ درجه سانتی‌گراد افزایش در فصل پاییز محاسبه شد. نتایج بیانگر پیچیدگی تغییرات آینده بارش و نبودن قطعیت بیشتر در مقایسه با دما بود. بیشترین تغییرات افزایش حجم بارش در سطح استان در سال ۲۰۹۰ در سناریوهای SSP45 و SSP85 در ایستگاه رامسر برابر با ۴۰/۵ و ۵۱/۱۹٪ گزارش شد. فولکرن و همکاران (۲۰۱۸) برای بررسی اثرات بالقوه تغییرات آب و هوایی در آب‌خیز Huai Luang در شمال‌شرقی تایلند از دو مدل SEACAM و CanESM2 همراه با شش سناریوی اقلیمی بهره بردند. نتایج این پژوهش برای ۳۰ سال آینده نشان‌دهنده افزایش اندازه بارش به ترتیب ۲۰/۸۵ و ۱۸/۳۵٪ در مدل‌های CanESM2 و SEACAM بود. در پژوهشی، جهانگیر و همکاران (۲۰۲۲) سنجه‌های اقلیمی استان فارس را با استفاده از مدل‌های پنجم گزارش و سناریوهای RCP ریزمقیاس‌نمایی کردند. در این پژوهش نتایج تمام ایستگاه‌ها نشان‌دهنده تغییرات افزایشی دمای بیشینه و کمینه در سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 بود. افزون بر این، دوره‌های بازگشت بارش احتمالی تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 نیز افزایشی بود که نشان‌دهنده افزایش شدت بارش‌ها در چند دهه آینده است. چنگ و همکاران (۲۰۰۸) متغیرهای هواشناسی گوناگونی را در بخش‌های مرکزی-جنوبی کانادا، با استفاده از روش‌های ریزمقیاس سازی آماری سناریوهای اقلیمی روزانه و ساعتی سه مدل گردش عمومی، شبیه‌سازی کردند و دریافتند که عملکرد روش‌های آماری در تولید متغیرهای هواشناسی در مقیاس ایستگاهی مطلوب است. وانگ و همکاران (۲۰۲۴) تغییرات رواناب را شبیه‌سازی کردند. سپس، با بهره‌گیری از تغییرات اقلیمی، داده‌های CMIP6 و

(۲۰۱۲). با بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابزارهای پیشرفته برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی می‌توان فرآیندهای پویایی و گرم‌پویایی جوی را در شبکه‌های سه‌بعدی با استفاده از معادلات پایه حرکت در بازه‌های زمانی و مکانی مختلف مدل‌سازی کرد (عساکره ۲۰۰۲). مدل‌های گردش عمومی جو به‌عنوان ابتدایی‌ترین و جامع‌ترین مدل‌های اقلیمی شناخته شده‌اند و در طرح‌هایی مانند CMIP6 برای ارزیابی تغییرات اقلیمی آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای (مانند SSPها) به‌کار می‌روند (افشاری‌نیا و همکاران ۲۰۲۳). در این راستا، پژوهش‌های پرشماری در زمینه تغییرات اقلیمی در داخل و خارج کشور با استفاده از برونداد مدل‌های مختلف انجام شده است. زند و همکاران (۲۰۲۳) با تحلیل روند رخدادهای حدی اقلیمی در غرب و جنوب‌غرب ایران دریافتند که در دوره ۲۰۱۷-۱۹۸۸، روند شاخص‌های گرم مانند شب‌های گرم، روزهای گرم، تعداد روزهای تابستانی و شب‌های حاره‌ای در بیشتر ایستگاه‌ها افزایشی بود. از سوی دیگر، روند شاخص‌های سرد مانند روزها و شب‌های سرد و تعداد روزهای یخبندان کاهش‌ی بود که بیانگر حاکمیت گرمایش اقلیمی در این بازه زمانی است. در ایران، رضایی و همکاران (۲۰۲۴) عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) را ارزیابی کردند. نتایج این پژوهش بیانگر قابلیت روش LSBC در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در منطقه مطالعه شده بود. بر اساس این نتایج از میان الگوهای گوناگون CMIP6 بررسی شده، بهترین عملکرد در زمینه شبیه‌سازی بارش و دما در کشور به ترتیب مربوط به مدل‌های MPI-ESM1-2- و LR و MRI-ESM2-0 بود. در پژوهشی، آقاجانلو و فتحی‌المالو (۲۰۲۴) خشک‌سالی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آبی تحت مدل CMIP6 در استان مازندران را به شکل منطقه‌ای تحلیل کردند. بر اساس نتایج تجزیه و تحلیل تغییرات اقلیمی در آینده با هر پنج GCM دما در منطقه مطالعه شده به‌طور

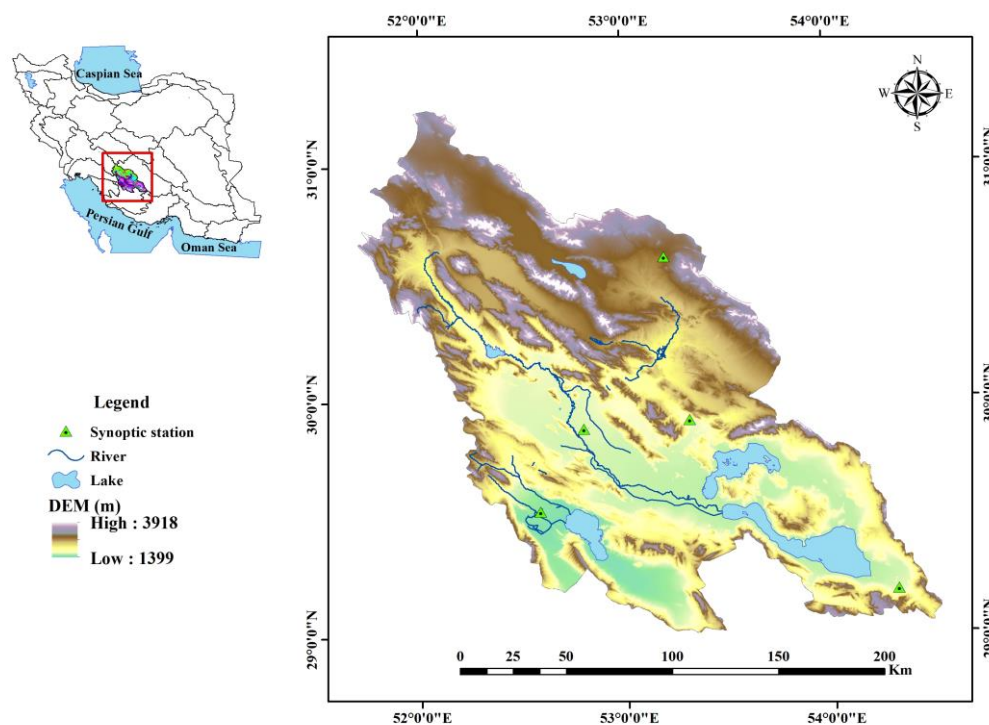
ریزان منابع آب فراهم آورد. از آنجایی که لزوم آشکارسازی و ارزیابی اثرات گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر سنجه دما، بارش و رخداد پدیده‌های حدی اقلیمی، به خاطر تنوع اقلیمی در هر منطقه‌ای ضروری است؛ خشک‌سالی و تغییرات اقلیمی از پدیده‌های اقلیمی ویران‌گر است که در آبخیز بختگان-مه‌ارلو به دلیل شرایط راهبردی منطقه و وجود دریاچه‌های مه‌ارلو و بختگان اهمیت بیشتری دارند. از این رو، در این پژوهش با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، فرآیند ریزمقیاس‌نمایی روی داده‌های مدل بزرگ‌مقیاس جوی، تحت سناریوهای SSP، انجام شد و عملکرد مدل‌های تغییر اقلیم در پیش‌بینی بارش و دمای کمینه و بیشینه در آبخیز بختگان-مه‌ارلو بررسی شد.

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعه‌شده

آبخیز مه‌ارلو-بختگان در فلات مرکزی ایران و استان فارس است و مساحت آن بیش از ۳۱ هزار کیلومتر مربع است. این آبخیز شامل چندین دریاچه و رود مهم چون طشک، بختگان، مه‌ارلو، کر و سیوند است. آبخیز مه‌ارلو-بختگان در مجاورت آبخیزهای هنديجان، مند، سیرجان و کارون بزرگ است. این منطقه میان عرض‌های شمالی ۲۹/۰۱ تا ۳۱/۲۴ درجه و طول شرقی ۵۱/۰۷ تا ۵۴/۵۱ درجه است. مساحت بلندی‌های این آبخیز بیش از ۱۷۴۵۸ کیلومتر مربع (معادل ۵۵/۴۵٪) و مساحت دشت‌های آن معادل ۱۴۰۲۸ کیلومتر مربع (معادل ۴۴/۵۵٪) است. موقعیت آبخیز بختگان-مه‌ارلو و ایستگاه‌های همدید منتخب در شکل ۱ ارائه شده است. در این پژوهش به‌منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در آبخیز بختگان-مه‌ارلو از آمار و اطلاعات دما و بارش روزانه پنج ایستگاه همدید استفاده شد.

مدل SWAT این شبیه‌سازی را ارزیابی کردند. نتایج ارزیابی مدل‌های اقلیمی CMIP6 برای شبیه‌سازی رواناب سطحی تاریخی و آینده در آبخیز رود یانگ‌تسه نشان‌دهنده عملکرد مطلوب این مدل‌ها بود. نتایج پیش‌بینی‌شده در این پژوهش نیز مانند بیشتر مدل‌ها، مؤید افزایش رواناب سالانه و تغییرات فصلی بیشتر تحت سناریوهای انتشار SSP بود که این یافته با پیامدهایی برای مدیریت خطر سیل و خشک‌سالی در آینده همراه خواهد بود. در پژوهشی، غفور و همکاران (۲۰۲۴) مدل‌های گردش عمومی جو و اثرات تغییرات اقلیمی بر آب‌شناسی در آبخیز رود گویاس (اکوادور) تحلیل کردند. در این پژوهش از مدل اقلیمی منطقه‌ای CanRCM4 برای پیش‌بینی تغییرات رواناب سطحی برای آبخیزهای رودهای اصلی کانادا تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش رواناب زمستانی بود و اندازه‌های بیشینه بهاری زودتر رخ داد که دلیل آن به‌ویژه در آبخیزهای شمالی، ناشی از افزایش دما و الگوهای بارش تغییر یافته بود. در ایران نیز پژوهش‌هایی برای بررسی اثر تغییرات اقلیمی روی آبخیزهای ایران و مؤلفه‌های درجه حرارت و بارش در این مناطق در دوره‌های اخیر و آتی بر اساس مدل‌های ارزیابی گزارش چهارم و پنجم انجام شده است؛ که در این گزارش‌ها قدرت تفکیک-پذیری کمتر است و از سناریوهای انتشار قدیمی‌تر در مقایسه با گزارش ارزیابی ششم استفاده می‌شود. از این رو، به نظر می‌رسد که انجام پژوهش‌های تغییر اقلیم در آبخیزهای ایران با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی با وضوح زیاد و به‌ویژه با استفاده از مدل‌های گزارش ششم و تحت سناریوهای انتشار SSP ضروری است. زیرا، با بهره‌گیری از مدل‌های نامبرده می‌توان درکی بهتر از این مناطق در دوره‌های زمانی آتی در مقایسه با مدل‌های پیشین هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (گزارش چهارم و پنجم) برای مدیران و برنامه-



شکل ۱- موقعیت آبخیز بختگان-مهارلو و ایستگاه‌های همدید منتخب.

Figure 1- Location of the Bakhtegan-Maharlu watershed and selected synoptic stations.

ریزمقیاس شد. به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی سنجه‌های اقلیمی در آبخیز بختگان-مهارلو ۵ ایستگاه همدید بر اساس کافی بودن داده‌ها، پراکندگی و تنوع اقلیمی در آبخیز، انتخاب شدند. موقعیت جغرافیایی پنج ایستگاه همدید آبخیز بختگان-مهارلو در جدول (۱) ارائه شده است.

در این پژوهش از آمار و اطلاعات روزانه از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۲۴ مربوط به پنج ایستگاه همدید ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید استفاده شد. از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نیز برای بررسی توزیع داده‌ها استفاده شد. سپس، اندازه‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه بر پایهٔ جدیدترین گزارش IPCC

جدول ۱- مشخصات پنج ایستگاه همدید منتخب آبخیز بختگان-مهارلو.

Table 1- Characteristics of five selected synoptic stations in the Bakhtegan-Maharlu Watershed.

Station Name	Longitude (degrees)	Latitude (degrees)	Elevation above sea level (m)	Year of establishment
Arsanjan	53.33	29.9	1676	2006
Takhtejamshid	52.89	29.92	1605	2002
Shiraz	52.60	29.56	1488	1951
Safashhar	53.16	30.59	2251	2006
Neyriz	54.39	29.19	1632	2000

متفاوتی درباره آینده اقتصادی و اجتماعی ارائه می‌دهند. عامل دوم، تفاوت‌های ساختاری و سنجهٔ مدل‌های گردش عمومی جو است که باعث تفاوت در پیش‌بینی دما و بارش می‌شود. عامل سوم نوسانات طبیعی سامانهٔ اقلیم و محدودیت‌های داده‌های ورودی

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی

مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار SSP نبودن قطعیت در مدل‌های گزارش ششم ناشی از چند عامل اصلی است. عامل اول تفاوت در سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSPها) که فرضیات

تولید داده‌های آب‌وهوایی^۳

داده‌های آب و هوایی مصنوعی با استفاده از پرونده‌های به‌دست‌آمده از داده‌های آب و هوایی دوره دیدبانی شده تولید می‌شوند؛ که خصوصیات آماری آنها مشابه با دوره دیده‌بانی است.

در این پژوهش به‌منظور ارزیابی مدل از آماره‌های آزمون ضریب تعیین^۴ (R^2) میانگین مربعات خطا^۵ (RMSE) استفاده شد. این آماره‌ها با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ محاسبه شدند (حسن و همکاران، ۲۰۱۴).

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

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)(Q_s - \bar{Q}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_o - \bar{Q}_o)^2 \sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \quad (2)$$

R^2 : ضریب تعیین بدون بعد و بیانگر رابطه خطی میان داده‌های بزرگ‌مقیاس و کوچک‌مقیاس است. Q_o : اندازه‌های مشاهده‌ای، Q_s : اندازه‌های محاسبه‌شده به‌وسیله مدل، \bar{Q}_o : اندازه میانگین داده‌های مشاهده‌ای، N : تعداد نمونه‌ها است.

هر چه اندازه R^2 به عدد ۱ و اندازه RMSE به عدد صفر نزدیک‌تر باشد، دقت مدل بیشتر است.

پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های مشاهده‌ای، داده‌های اقلیمی با سه مدل ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 و تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث

اعتبارسنجی مدل LARS-WG

و روش‌های ریزمقیاس‌سازی که دقت نتایج را در مقیاس‌های محلی کاهش می‌دهد. برای کاهش این نبودن قطعیت‌ها، معمولاً از چند مدل و سناریو همراه با تحلیل‌های آماری بهره‌گیری می‌شود. از این‌رو، در این پژوهش از سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 و سه مدل CMIP6 استفاده شد. مشخصات مدل‌های CMIP6 استفاده‌شده در این پژوهش در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 استفاده‌شده در پژوهش.

Table 2- Specifications of CMIP6 models used in the research.

Model	Developer Country	Spatial Accuracy (degrees)
ACCESS-ESM1-5	Australia	1.25*1.875
CNRM-CM6-1	France	1.4*1.4
MRI-ESM2-0	Japan	1.12*1.12

ریزمقیاس‌نمایی

در این پژوهش از مدل آماری LARS-WG استفاده شد. در انگلیس اولین بار یک مؤسسه تحقیقات کشاورزی با عنوان LARS این مدل را تدوین کرد. در نسخه اولیه این مدل برای هر ایستگاه بایستی به‌طور مجزا اجرا می‌شد اما در نسخه‌های جدیدتر آن توانستند پهنه‌بندی کل منطقه یا کشور مطالعه‌شده را نیز انجام دهند. در این مدل فرایند تولید داده‌های مصنوعی آب و هوایی در سه مرحله به شرح زیر انجام می‌شود.

واسنجی کردن مدل^۱

در این مرحله داده‌های آب و هوایی دیدبانی‌شده برای تعیین خصوصیات آماری‌شان تحلیل می‌شوند.

صحت‌سنجی مدل^۲

در این مرحله خصوصیات آماری داده‌های دیده‌بانی و مصنوعی تولیدشده به‌وسیله مدل برای تعیین اینکه آیا تفاوت‌های آماری قابل‌توجهی میان این دو گروه داده‌ها وجود دارد یا خیر تجزیه و تحلیل می‌شود (سمنوف ۲۰۰۳).

3- Generator

4- Coefficient of Determination

5- Root Mean of Square Error

1- SITE ANALYSIS

2- Q test

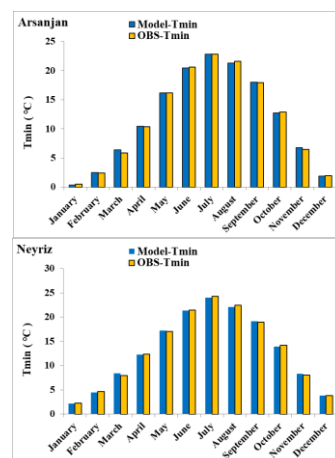
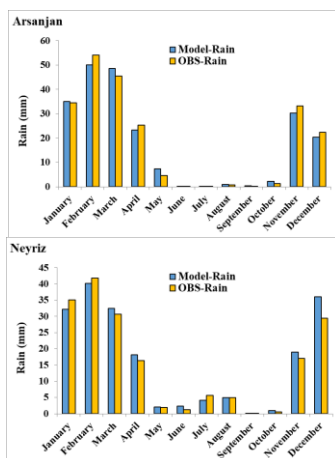
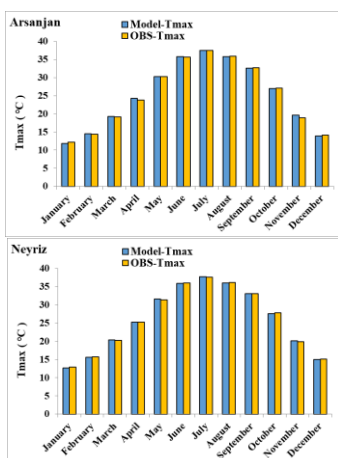
واسنجی و صحت‌سنجی در جدول ۳ نشان‌داده شده است. به‌منظور ارزیابی مدل از اندازه‌های RMSE و R^2 (معیارهای آزمون خطا) استفاده شد. نتایج بیانگر آن بود که دقت مدل در پیش‌بینی دمای کمینه، بیشینه بیشتر از بارش است که معمولاً دلیل آن ماهیت پیچیده‌تر بارش در مقایسه با دما است. مقایسه اندازه‌های پیش‌بینی‌شده و مشاهده‌ای برای پنج ایستگاه ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت جمشید برای سنج‌های دمای کمینه، بیشینه و بارش در شکل ۲ ارائه‌شده است.

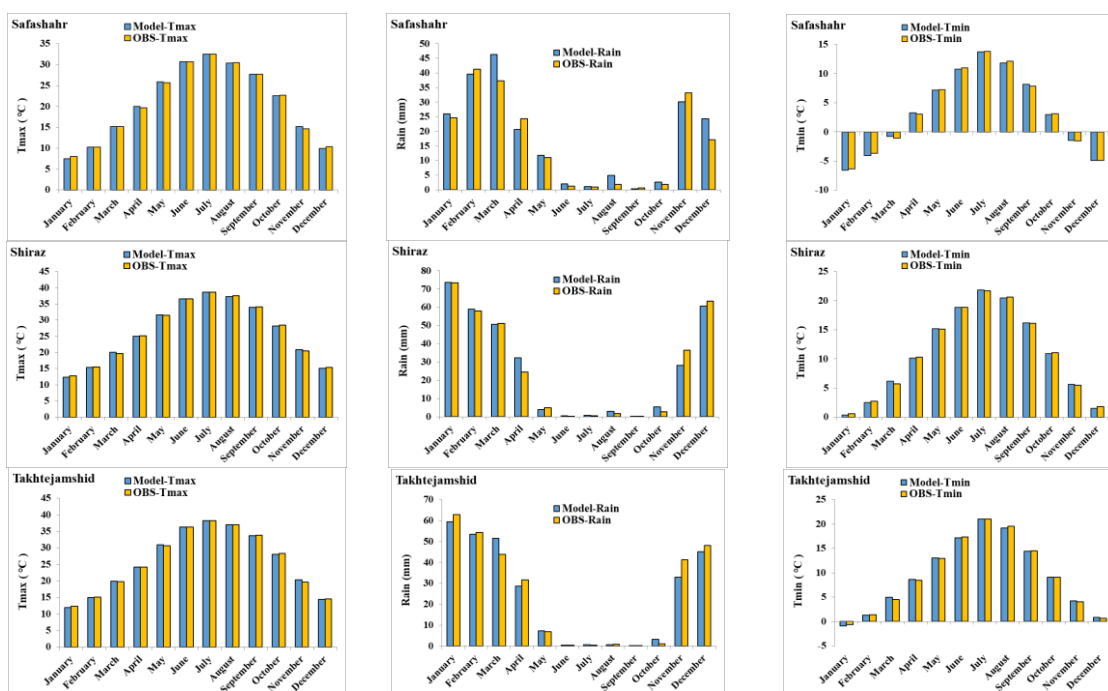
نخست به‌منظور بررسی توزیع داده‌ها از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده توزیع بهنجار داده‌های بارش، دمای کمینه و بیشینه در هر پنج ایستگاه هم‌دید در سطح اطمینان ۹۵٪ بود. در این پژوهش اعتبارسنجی مدل LARS-WG بر اساس مقایسه میان داده‌های آماری مشاهده‌ای و داده‌های پیش‌بینی‌شده انجام شد. ابتدا داده‌ها به دو دسته واسنجی و صحت‌سنجی تقسیم شدند. سپس، ۷۰٪ داده‌ها در مرحله واسنجی (۲۰۱۸-۲۰۰۶) و ۳۰٪ در مرحله صحت‌سنجی (۲۰۲۴-۲۰۱۹) استفاده شدند. نتایج ارزیابی مدل Lars WG در مرحله

جدول ۳- ارزیابی مدل Lars WG در مرحله واسنجی و صحت‌سنجی.

Table 3- Evaluation of the Lars WG model in the calibration and validation phase.

Station	Verification		Calibrated		
	R ²	RMSE	R ²	RMSE	
Rain	Arsanjan	0.71	5.01	0.72	4.98
	Neyriz	0.62	6.32	0.64	6.33
	Safashahr	0.66	3.87	0.69	3.74
	Shiraz	0.78	3.21	0.73	3.28
	Takhtejamshid	0.67	3.99	0.65	4.01
Tmax	Arsanjan	0.90	0.25	0.91	0.24
	Neyriz	0.87	0.33	0.86	0.35
	Safashahr	0.94	0.27	0.92	0.29
	Shiraz	0.98	0.19	0.97	0.21
	Takhtejamshid	0.89	0.29	0.86	0.33
Tmin	Arsanjan	0.92	0.28	0.93	0.25
	Neyriz	0.89	0.41	0.91	0.34
	Safashahr	0.94	0.32	0.93	0.32
	Shiraz	0.95	0.23	0.97	0.21
	Takhtejamshid	0.91	0.29	0.88	0.35

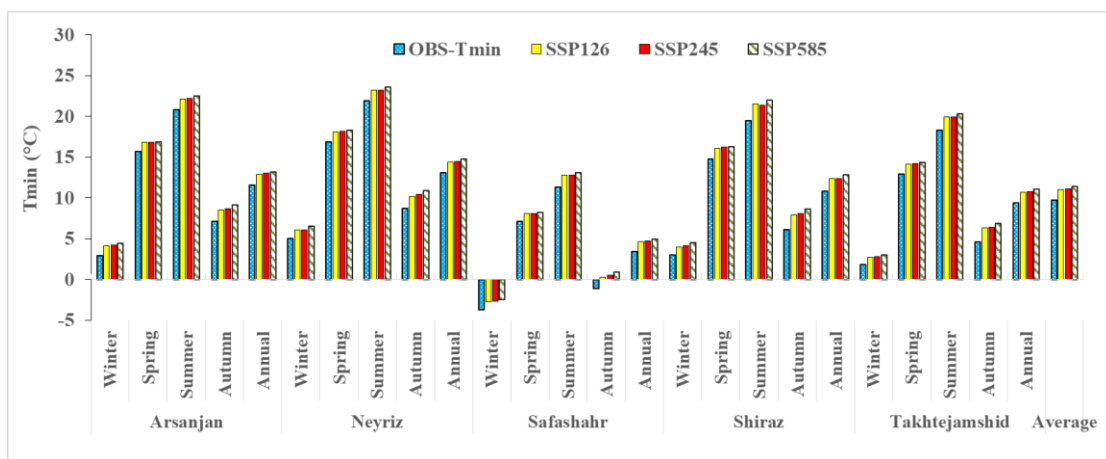
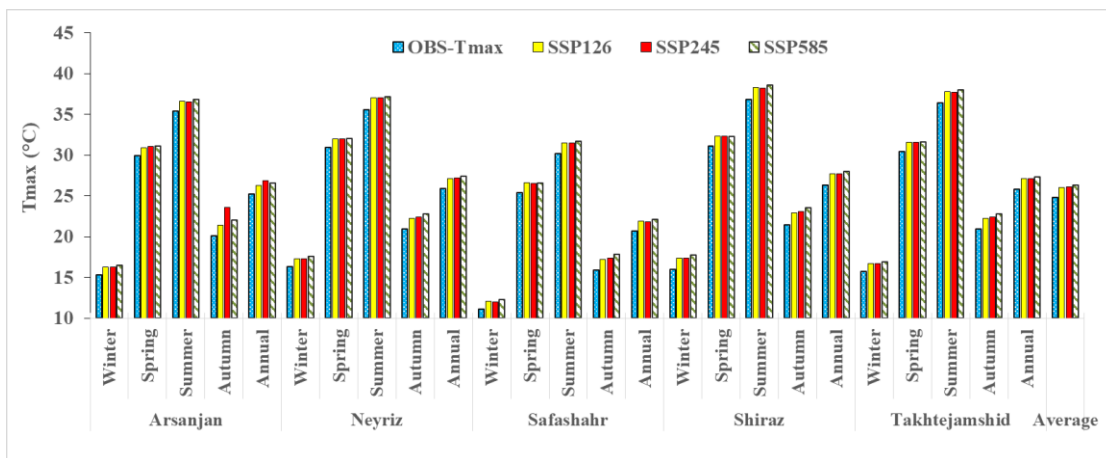
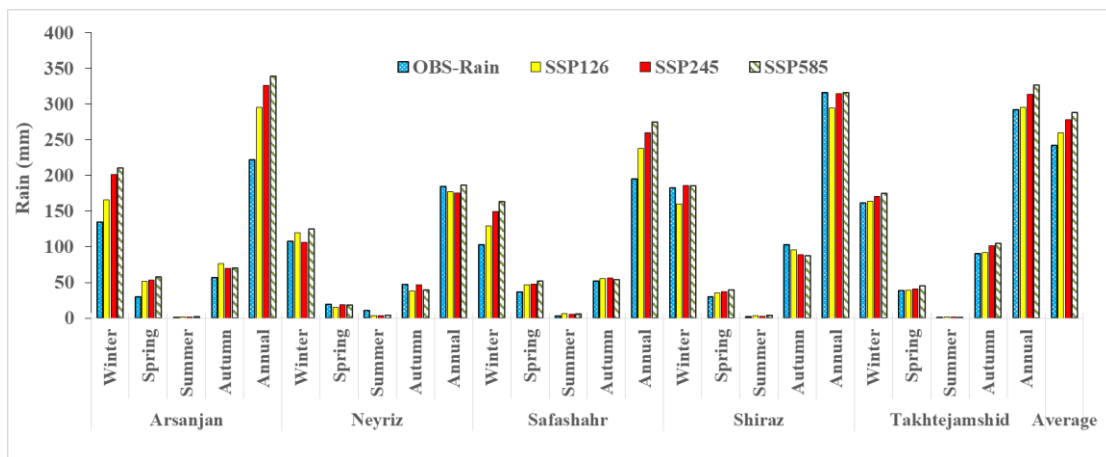




شکل ۲- مقایسه اندازه‌های پیش‌بینی شده مدل Lars WG و مشاهده‌ای پنج ایستگاه همدید آبخیز بختگان -مهارلو.
Figure 2 - Comparison of Lars WG model Predicted values and observational values of five synoptic stations in the Bakhtegan-Maharloo Watershed.

۲۴۲ میلی‌متر مشاهده‌شده به ۲۶۰ تا ۲۸۸ میلی‌متر پیش‌بینی‌شده در سطح ۹۵٪ معنادار بود. میانگین سالانه دمای بیشینه نیز از ۲۵ درجه مشاهده‌شده به ۲۶ تا ۲۷ درجه پیش‌بینی‌شده افزایش یافت. میانگین سالانه دمای کمینه از ۹/۷ درجه مشاهده‌شده به ۱۱ تا ۱۱/۵ درجه افزایش یافت. بیشترین افزایش بارش و دما مربوط به ایستگاه ارسنجان و تخت‌جمشید بود. تغییرات در ایستگاه نی‌ریز کم و در برخی شرایط در این ایستگاه بارش کاهش یافت. تغییرات بارش و دما باعث تغییر در وضعیت آبی و بوم‌شناختی منطقه خواهد شد که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق مدیریت منابع آب است. افزایش دماهای کمینه سبب کاهش سرمای شب و تغییرات رشد گیاهان می‌شود. از این رو، تحلیل فصلی و سالانه خروجی مدل ACCESS-ESM1-5 نشان داد روند تغییرات منطقه مطالعه‌شده گرم‌تر شدن تدریجی و تغییرات بارشی است که باید برای سازگاری با تغییرات اقلیمی اقدامات مدیریتی مناسب انجام شود.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان -مهارلو با مدل ACCESS-ESM1-5
 تحلیل خروجی پیش‌بینی دوره آینده نزدیک (۲۰۴۵-۲۰۲۶) مدل ACCESS-ESM1-5 در مقایسه با دوره پایه به‌طور فصلی و سالانه در شکل ۳ ارائه‌شده است. در اکثر ایستگاه‌ها، اندازه داده‌های بارش پیش‌بینی‌شده در هر سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بیشتر بود، به‌ویژه در فصل زمستان که بیشترین اندازه بارش در تمام ایستگاه‌ها ثبت شد. به‌طور کلی، روند دمای بیشینه در همه ایستگاه‌ها و فصل‌ها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای افزایشی بود. افزایش دما در تابستان و بهار قابل مشاهده بود و بیشترین اندازه‌های پیش‌بینی‌شده دما مربوط به سناریوی SSP585 بود. دمای فصل تابستان در همه ایستگاه‌ها بیشتر از دیگر فصل‌ها بود که با روند گرمایش جهانی مطابقت دارد. در تمام ایستگاه‌ها، روند دمای کمینه نیز افزایشی بود که بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها است. افزایش این دما بیشتر در تابستان و بهار مشاهده شد. افزایش میانگین سالانه بارش آبخیز از

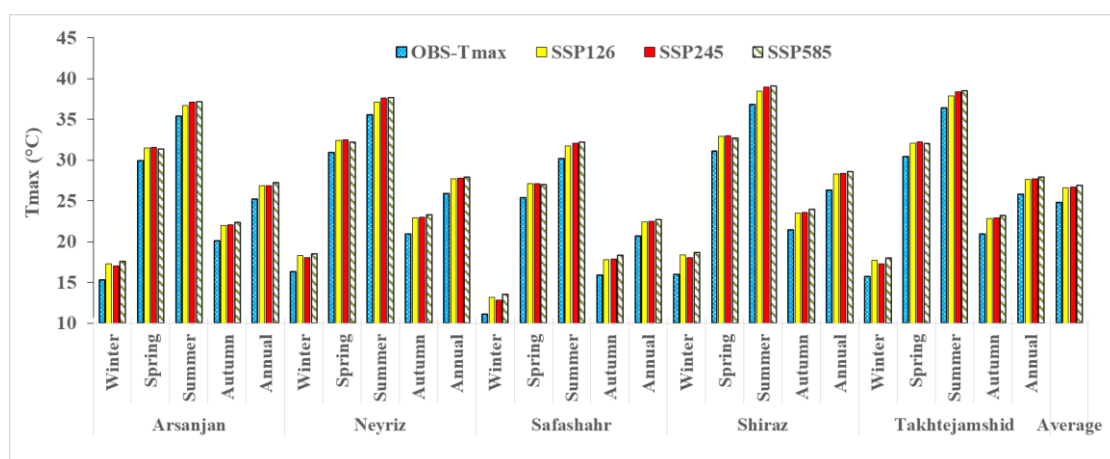
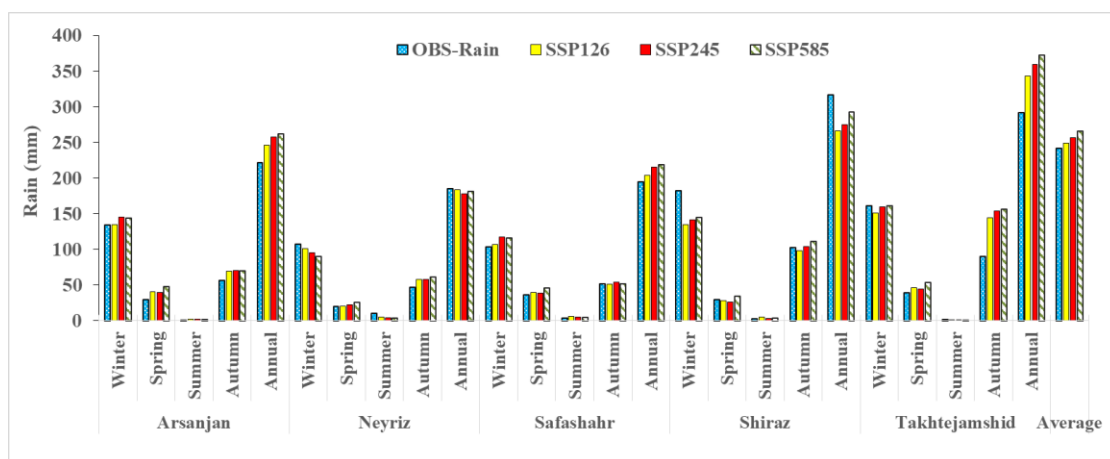


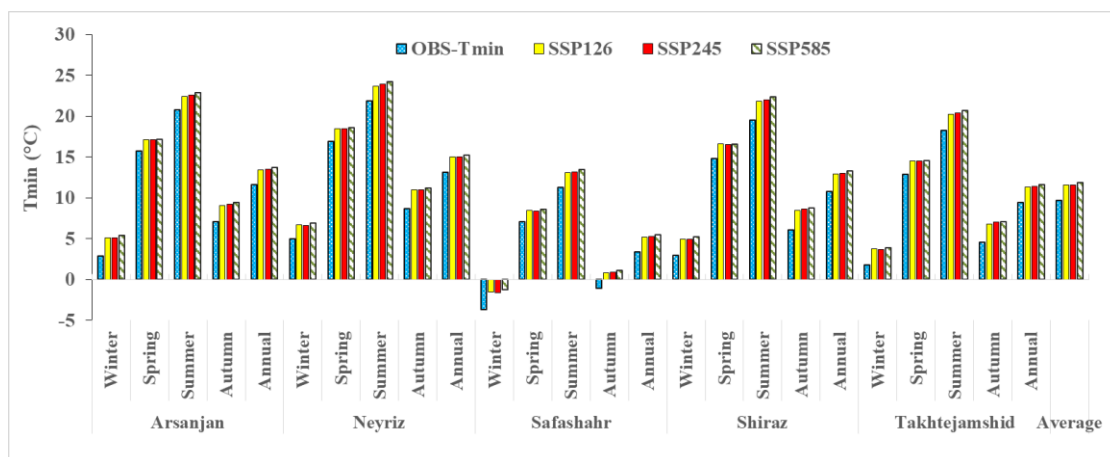
شکل ۳- تغییرات سنجه های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل ACCESS-ESM1-5.

Figure 3- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the ACCESS-ESM1-5 model.

بیشینه ایستگاه‌ها در تمام سناریوها افزایش یافت (در ارسنجان از ۲۵/۲ به ۲۷/۲ درجه سانتی‌گراد). افزایش تدریجی دما در بهار و زمستان نیز مشاهده شد که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن سالانه است. دمای کمینه در ارسنجان از ۱۱/۶ به ۱۳/۷ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. روند دمای کمینه در تابستان و بهار نیز افزایشی بود. در ایستگاه تخت‌جمشید نرخ شدت تغییرات به‌ویژه در بارش و دمای کمینه بیشتر بود. تغییرات بارش در نی‌ریز در مقایسه با دیگر ایستگاه‌ها کمتر بود. اما، دماهای آن به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافت.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان-مهارلو تحت مدل CNRM-CM6-1 تحلیل خروجی پیش‌بینی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) مدل CNRM-CM6-1 در مقایسه با دوره پایه به‌طور فصلی و سالانه در شکل ۴ ارائه شده است. تغییرات سالانه بارش در ایستگاه ارسنجان و تخت‌جمشید به‌طور تدریجی افزایشی بود و بیشترین بارش‌ها مربوط به سناریوی SSP585 بود (ارسنجان از ۲۲۲/۰۲ به ۲۶۲/۵۴ میلی‌متر و تخت‌جمشید از ۲۹۱/۷۰ به ۳۷۲/۵۸ میلی‌متر). اما در نی‌ریز، تغییرات سالانه بارش نسبتاً کاهشی بود که نشان‌دهنده تغییرات متفاوت منطقه‌ای است (از ۱۸۴/۹۱ به ۱۸۱/۵۴ میلی‌متر). به‌طور کلی دمای



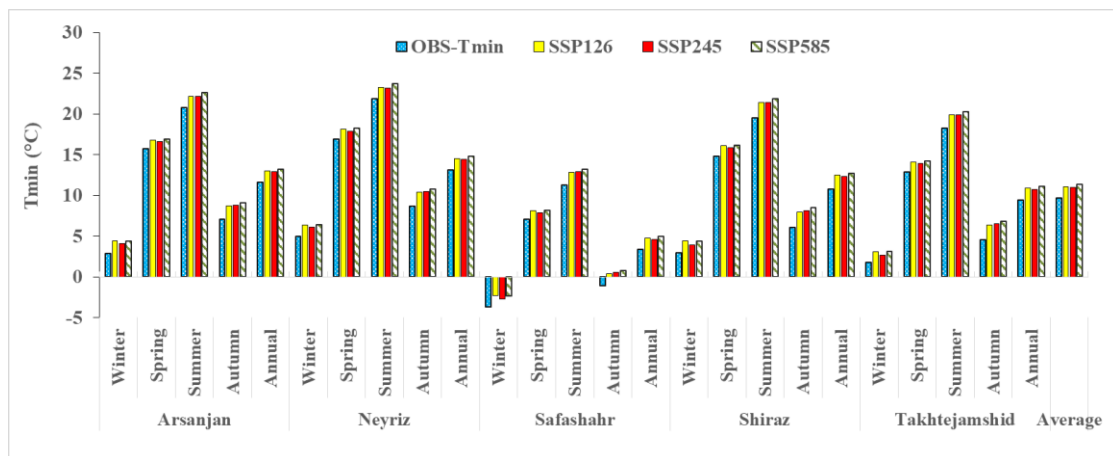
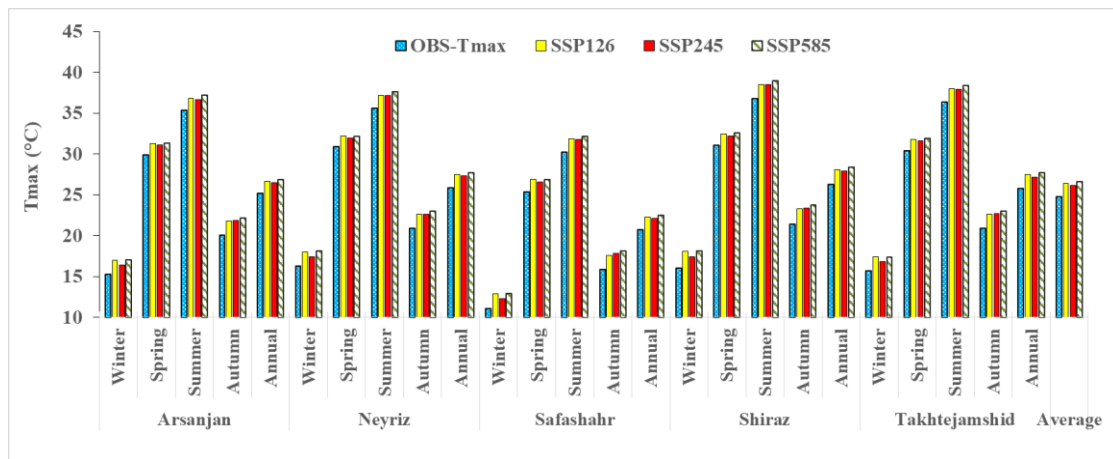
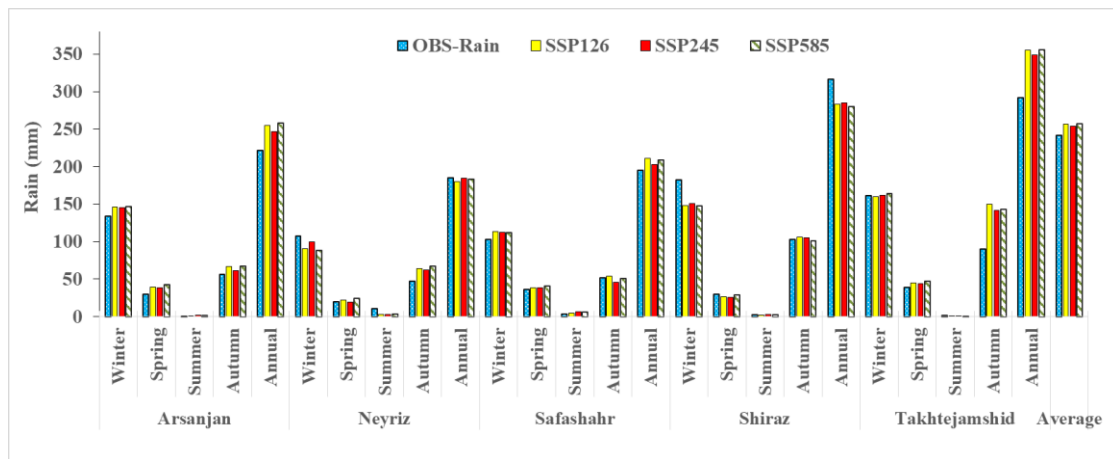


شکل ۴- تغییرات سنج‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل CNRM-CM6-1.

Figure 4- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the CNRM-CM6-1 model.

دما ۲۸/۳ درجه سانتی‌گراد بود. افزایش دما در سناریوی بدبینانه SSP585 در مقایسه با SSP126 آهسته و تدریجی بود. این یافته نشان‌دهنده روند گرم شدن هوا با افزایش شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای است. روند دمای کمینه افزایشی بود که نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است. مثلاً، میانگین سالانه دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه مشاهده‌ای به ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد در سناریوی SSP585 افزایش یافت. این روند در ایستگاه‌هایی مانند نیریز و ارسنجان برجسته‌تر بود.

تحلیل تغییرات اقلیم آبخیز بختگان-مهارلو تحت مدل MRI-ESM2-0 نتایج اندازه‌های پیش‌بینی شده بارش، دمای بیشینه و دمای کمینه در پنج ایستگاه (ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز، تخت‌جمشید) با سه سناریوی تغییر اقلیم SSP126، SSP245 و SSP585 مربوط به مدل MRI-ESM2-0 همراه با داده‌های مشاهده‌ای در شکل ۵ ارائه شده است. افزایش دمای بیشینه در تمام ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با دوره مشاهده‌ای در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار بود. بیشترین تغییرات دما مربوط به ایستگاه‌های شیراز و تخت‌جمشید بود. در سناریوی SSP585 برای شیراز



شکل ۵- تغییرات سنج‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در مدل

MRI-ESM2-0.

Figure 5- Changes in climate parameters for the near future period (2026-2045) compared to the base period in the MRI-ESM2-0 model.

برآیند پیش‌بینی آبخیز بختگان-مهارلو در شرایط تغییر اقلیم

تغییرات سالانه سنجه‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در آبخیز بختگان-مهارلو در جدول ۷ نشان داده شده است. میانگین بارش آبخیز در سناریوی SSP126 برابر با ۲۵۵/۲ میلی‌متر بود، در SSP245 به ۲۶۲/۹ میلی‌متر و در SSP585 به ۲۷۰/۶ میلی‌متر افزایش یافت که این افزایش در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. مدل ACCESS-ESM1-5 در بیشتر سناریوها بارش بیشتری در مقایسه با دو مدل دیگر پیش‌بینی کرد. مدل MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 اندازه‌های کمتر و نزدیک به هم پیش‌بینی کردند. این تفاوت نشان‌دهنده ناسازگاری و نبودن قطعیت در خروجی مدل‌های مختلف است. به‌طور کلی میانگین بارش مشاهده‌شده آبخیز ۲۴۲ میلی‌متر بود و تمام پیش‌بینی‌های مدل‌ها در هر سه سناریو بارش بیشتر از اندازه مشاهده‌شده بود. اما، فقط بر پایه مدل ACCESS-ESM1-5 و سناریوی SSP585 روند بارش دوره پایه و مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده برای تمام ایستگاه‌ها در هر سه سناریو در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای فعلی (OBS-Tmax) افزایش یافت. این روند افزایشی نشان‌دهنده گرمایش منطقه‌ای در طول دوره پیش‌بینی‌شده است. شدت افزایش به‌تدریج با رفتن از سناریوی خوش‌بینانه (SSP126) به سناریوی بدبینانه‌تر (SSP585) افزایش یافت. تفاوت دمای بیشینه میان SSP126 و SSP245 در اغلب ایستگاه‌ها اندک بود. اما در سناریوی SSP585 افزایش دما ملایم‌تر از سناریوی SSP245 بود. میانگین سالانه دمای بیشینه در کل آبخیز از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد در داده‌های مشاهده‌ای به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد در داده‌های پیش‌بینی‌شده افزایش یافت. مدل CNRM-CM6-1 به‌طور معمول بیشترین دمای بیشینه را در میان سه مدل پیش‌بینی کرد که دلیل آن می‌تواند تأثیر سنجه‌های مختلف فیزیکی و پویایی مدل باشد.

دماهای پیش‌بینی‌شده مدل‌های ACCESS-ESM1-5 و MRI-ESM2-0 نزدیک به هم و کمی کمتر از مدل CNRM-CM6-1 بود. بیشترین دمای بیشینه مربوط به ایستگاه‌های شیراز و تخت‌جمشید بود که با شرایط اقلیمی گرم‌تر این مناطق همخوانی دارد. افزایش دمای بیشینه می‌تواند سبب افزایش تبخیر، تغییر در نیاز آبی کشاورزی و افزایش احتمال پدیده‌های امواج گرمایی شود. این موضوع مؤید ضرورت برنامه‌ریزی دقیق برای سازگاری با تغییرات اقلیمی در مناطق مطالعه‌شده است. بر پایه داده‌های پیش‌بینی‌شده سناریوهای شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای در این پنج ایستگاه برای دهه‌های آینده می‌توان نتیجه گرفت که با گرمایش چشم‌گیر دمای روزانه مواجه خواهیم بود. این موضوع بر مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی اثرگذار است. روندی دمای کمینه در پنج ایستگاه (ارسنجان، نیریز، صفاشهر، شیراز و تخت‌جمشید) بر پایه داده‌های مشاهده‌ای و پیش‌بینی‌شده هر سه مدل اقلیمی ACCESS-ESM1-5، CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 تحت سه سناریوی SSP126، SSP245 و SSP585 در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار افزایشی بود. میانگین سالانه دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد در داده‌های مشاهده‌ای فعلی به ۱۱/۲ درجه در سناریوی SSP126 و تا ۱۱/۵ درجه در سناریوی SSP585 افزایش یافت. این افزایش به‌ویژه در ایستگاه نیریز (از ۱۳/۱ به ۱۴/۹ درجه سانتی‌گراد) و ارسنجان (از ۱۱/۶ به ۱۳/۴ درجه سانتی‌گراد) مشاهده شد. روند افزایش دمای کمینه بیانگر گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است که می‌تواند بر محیط‌زیست، کشاورزی، نیاز آبی گیاهان و بوم‌سازگان منطقه اثرگذار باشد. شایان ذکر است در ایستگاه صفاشهر نیز که کمترین دمای کمینه را داشت نیز افزایش‌هایی مشاهده شد، هرچند که اندازه‌های اولیه و افزایشی آن کمتر از دیگر ایستگاه‌ها بود. مدل CNRM-CM6-1 دمای کمینه بیشتری در مقایسه با دو مدل دیگر پیش‌بینی کرد. اما، می‌توان با میانگین سه مدل برآوردی متعادل‌تر و قابل‌اطمینان‌تر

ارائه داد. نتایج افزایش دمای کمینه در این پژوهش با یافته‌های پژوهش‌های اقلیمی منطقه جنوب و جنوب‌شرق ایران همسو است. این یافته‌ها نشان‌دهنده روند گرم شدن تدریجی هوا و افزایش میانگین دما به‌ویژه در شب‌ها است. این روند افزایشی دمای کمینه ناشی از تغییرات اقلیمی و افزایش گازهای گلخانه‌ای است که در سناریوهای بدبینانه (SSP585) به‌طور واضح‌تری مشاهده شد. این یافته مؤید ضرورت برنامه‌ریزی مناسب برای مدیریت منابع آب و سازگاری با شرایط اقلیمی جدید در منطقه است. اندازه‌های ضخیم‌شده نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میانگین دوره پایه با اندازه‌های پیش‌بینی‌شده در سطح احتمال ۹۵٪ است (جدول ۴). روند تغییرات سنجه‌های اقلیمی در آبخیز نشان داد فقط در مدل ACCESS-ESM1-5 با سناریوی SSP585 تفاوت برآورد سنجه بارش در

دوره پایه و پیش‌بینی‌شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود و در دیگر مدل و سناریوها این تفاوت در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. اما تفاوت داده‌های مشاهده‌ای دمای کمینه و بیشینه با داده‌های پیش‌بینی‌شده (آینده نزدیک) در تمام مدل‌ها و سناریوها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. نتایج پژوهش‌های فلاح کلاکی و همکاران (۲۰۲۱)، حقیقی و همکاران (۲۰۲۵)، جهانگیر و همکاران (۲۰۲۲) نیز مؤید افزایش دمای منطقه مطالعه‌شده است. تفاوت میان مدل‌ها نشان‌دهنده نبودن قطعیت در پیش‌بینی‌هاست که مؤید ضرورت استفاده از چند مدل و سناریو برای کاهش خطر تصمیم‌گیری است. این تغییرات نیازمند برنامه‌ریزی و سازگاری دقیق برای مدیریت منابع آب، کشاورزی و سلامت عمومی در منطقه است.

جدول ۴- برآیند تغییرات سنجه‌های اقلیمی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۴۵) در مقایسه با دوره پایه در آبخیز بختگان-مهارلو.

Table 4- Result of changes in climatic parameters in the near future period (2026-2045) compared to the base period in the Bakhtegan-Maharloo watershed.

	Model	Arsanjan	Neyriz	Safashahr	Shiraz	Takhtejamshid	Average	
Rain (mm)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	295.7	177	237.9	294.6	295.2	260.1
		CNRM-CM6-1	246.6	184.2	203.5	266.5	343.5	248.9
		MRI-ESM2-0	254.6	179.7	210.7	283.3	355.5	256.8
		Average	265.6	180.3	217.4	281.5	331.4	255.2
	SSP245	ACCESS-ESM1-5	326.2	175.2	260.3	314.7	313.7	278.0
		CNRM-CM6-1	257.9	178.3	215.2	275.1	359.2	257.1
		MRI-ESM2-0	246.5	184.5	202.4	285.2	348.9	253.5
		Average	276.8	179.4	225.9	291.7	340.6	262.9
	SSP585	ACCESS-ESM1-5	339.3	186.2	275.3	315.9	326.7	288.7
		CNRM-CM6-1	262.5	181.5	219.1	293.0	372.6	265.7
		MRI-ESM2-0	258.4	183.6	208.8	280.2	355.4	257.3
		Average	286.7	183.8	234.4	296.3	351.6	270.6
OBS-Rain		222	184.9	195.1	316.5	291.7	242	
Tmax (°C)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	26.3	27.1	21.9	27.8	27.1	26.0
		CNRM-CM6-1	26.9	27.7	22.4	28.3	27.6	26.6
		MRI-ESM2-0	26.7	27.5	22.3	28.1	27.5	26.4
		Average	26.6	27.5	22.2	28.1	27.4	26.3
	SSP245	ACCESS-ESM1-5	26.9	27.2	21.9	27.7	27.1	26.1
		CNRM-CM6-1	27.0	27.8	22.5	28.4	27.7	26.7
		MRI-ESM2-0	26.5	27.3	22.1	27.9	27.2	26.2
		Average	26.8	27.4	22.1	28.0	27.3	26.3
	SSP585	ACCESS-ESM1-5	26.6	27.4	22.1	28.0	27.3	26.3
		CNRM-CM6-1	27.2	27.9	22.7	28.6	27.9	26.9
		MRI-ESM2-0	26.9	27.7	22.5	28.4	27.7	26.6
		Average	26.9	27.7	22.5	28.3	27.6	26.6
OBS-Tmax		25.2	25.9	20.7	26.3	25.8	24.8	
Tmin (°C)	SSP126	ACCESS-ESM1-5	12.9	14.4	4.6	12.4	10.7	11.0
		CNRM-CM6-1	13.4	15.0	5.2	13.0	11.3	11.6
		MRI-ESM2-0	13.0	14.5	4.8	12.5	10.9	11.1

Model	Arsanjan	Neyriz	Safashahr	Shiraz	Takhtejamshid	Average
Average	13.1	14.6	4.9	12.6	11	11.2
ACCESS-ESM1-5	13.0	14.5	4.7	12.4	10.8	11.1
CNRM-CM6-1	13.5	15.0	5.3	13.0	11.4	11.6
MRI-ESM2-0	12.9	14.4	4.6	12.3	10.7	11.0
Average	13.1	14.6	4.9	12.6	11.0	11.2
ACCESS-ESM1-5	13.2	14.8	4.9	12.8	11.1	11.4
CNRM-CM6-1	13.7	15.2	5.5	13.3	11.6	11.9
MRI-ESM2-0	13.2	14.8	5.0	12.7	11.1	11.4
Average	13.4	14.9	5.1	12.9	11.3	11.5
OBS-Tmin	11.6	13.1	3.4	10.8	9.4	9.7

*اعداد پررنگ نشان‌دهنده تفاوت معنی‌دار میان میانگین دوره پایه و اندازه‌های پیش‌بینی‌شده در سطح احتمال ۹۵٪ است.

*Bold values represent a significant difference between the baseline mean and the predicted values at the 95% confidence level.

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

ارزیابی تغییرات اقلیمی در دهه‌های آینده، به‌ویژه با هدف برنامه‌ریزی مدیریتی مناسب برای سازگاری و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی، امری ضروری و مهم است. افزایش دما و تغییر الگوهای بارش اثرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، تنوع زیستی و سلامت عمومی دارند. از این‌رو، برای پیش‌بینی آینده نیازمند استفاده از مدل‌های اقلیمی پیشرفته و دقیق هستیم. در این پژوهش با استفاده از مدل آماری LARS-WG8، امکان ریزمقیاس کردن و اصلاح داده‌های بارش و دمای کمینه و بیشینه به‌منظور افزایش دقت پیش‌بینی‌ها فراهم شد. این شیوه در پژوهش‌های پرشماری برای تحلیل تغییرات اقلیمی آینده در مناطق مختلف از جمله آبخیز بختگان-مه‌ارلو به‌کارگرفته شده است. در این پژوهش با پردازش داده‌های روزانه بارش و دما از ایستگاه‌های هم‌دید منطقه و مقایسه آن‌ها با دوره پایه، امکان تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی برای بازه زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۴۵ فراهم شد. برآیند تغییرات سنج‌های اقلیمی در آبخیز نشان داد فقط در مدل ACCESS-ESM1-5 با سناریوی SSP585 تفاوت برآورد سنج‌های بارش در دوره پایه و پیش‌بینی‌شده در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود و در دیگر مدل و سناریوها این تفاوت در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار نبود. اما تفاوت داده‌های مشاهده‌ای دمای کمینه و بیشینه با داده‌های پیش‌بینی‌شده (آینده نزدیک) در تمام مدل‌ها و سناریوها در سطح اطمینان ۹۵٪ معنی‌دار و افزایشی بود. اندازه‌های دمای بیشینه پیش‌بینی‌شده در تمام

ایستگاه‌ها و سناریوها در مقایسه با داده‌های مشاهده‌ای بیشتر بود و با افزایش شدت سناریوها این افزایش نیز بیشتر شد. میانگین سالانه دمای بیشینه آبخیز از ۲۴/۸ درجه سانتی‌گراد به ۲۶/۹ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت. مدل CNRM-CM6-1 بیشترین دمای بیشینه را پیش‌بینی کرد. بیشترین دماها مربوط به ایستگاه شیراز و تخت‌جمشید بود. روند دمای کمینه در همه ایستگاه‌ها افزایشی بود و میانگین دمای کمینه آبخیز از ۹/۷ درجه سانتی‌گراد به ۱۱/۵ درجه (در سناریوی SSP585) افزایش یافت. این نشان‌دهنده گرم‌تر شدن شب‌ها و کاهش سرمای شبانه است که بر کشاورزی، بوم‌سازگان و منابع آب اثرگذار است. مدل CNRM-CM6-1 دمای کمینه بیشتری در مقایسه با دیگر مدل‌ها پیش‌بینی کرد. در آبخیز بختگان-مه‌ارلو به‌دلیل رویارویی با چالش‌های شدید ناشی از تغییرات اقلیمی و خشک‌سالی‌های پیاپی و کاهش سطح آب زیرزمینی، اجرای راهکارهای جامع و هماهنگ ضروری است. بر پایه نتایج این پژوهش پیشنهاد می‌شود الگوی کشت به‌سوی محصولات کم‌آب‌بر و مقاوم به خشکی مانند زعفران، پسته و گیاهان دارویی تغییر یابد. این موضوع بر کاهش مصرف آب کشاورزی بسیار تأثیرگذار است. افزون بر این، پیشنهاد می‌شود از روش‌های نوین آبیاری تحت‌فشار و هوشمند استفاده شود تا از هدر رفت منابع آبی جلوگیری شود. احیای پوشش گیاهی و اجرای طرح‌های آب‌خیزداری و آبخوان‌داری سبب مهار سیلاب‌ها، افزایش نفوذ آب و تغذیه سفره‌های زیرزمینی می‌شود. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود با

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در زمینه نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: انجام آزمون‌ها و نگارش مقاله
نویسنده دوم: تحلیل نتایج و همکاری در نگارش مقاله
نویسنده سوم: بررسی صحت خروجی مدل
نویسنده چهارم: مفهوم‌سازی و تدوین چارچوب کلی مقاله

مدیریت دقیق و مشارکتی تقاضای آب، همراه با آموزش بهره‌برداران، مصرف بهینه‌سازی شود تا فشار بر منابع کاهش یابد. پیشنهاد می‌شود از سامانه‌های هشدار زودهنگام برای موج‌های گرمایی و خشک‌سالی بهره‌برداری شود تا توان تطابق کشاورزان با شرایط اقلیمی جدید افزایش یابد. همچنین، پایش و حفاظت از کیفیت منابع آبی با مهار ورود پساب‌های آلوده و مصرف بی‌رویه کود و سم اهمیت ویژه‌ای دارد. بازنگری در سیاست‌های بهره‌برداری، نظارت بر چاه‌های غیرمجاز و توقف اضافه برداشت نیز از گام‌های مهم است. همچنین همزمان با این اقدامات، پیشنهاد می‌شود با توسعه مشاغل جایگزین و پایدار مانند گردشگری طبیعی و صنایع دستی، سبب تنوع‌بخشی به معیشت جوامع محلی شد تا تاب‌آوری منطقه در برابر تغییرات اقلیمی افزایش یابد. مشارکت جوامع محلی، نهادهای دولتی و پژوهشگران در قالب مدیریت جامع آب‌خیز، شرط موفقیت این راهکارهاست.

فهرست منابع

- Afsharinia M, Panahi F, ehteram M. 2023. Investigation of climate change using CMIP6 models outputs (Case study: Kashan Plain). *Irrigation and Water Engineering*. 14(2): 237-256. doi: 10.22125/iwe.2023.383176.1704
- Aghajanloo K, Fathi Almalou H. 2024. Local analysis of drought and climate change projection in future periods under the CMIP6 Model (Case study: Mazandaran Province). *Journal Watershed Manage Research*. 15(2):32-48. doi:10.61186/jwmr.15.2.32
- Asakareh H. 2002. Models of general circulation of atmosphere. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*. 11(41): 21-23.
- Cheng CS, Li G, Li Q, Auld H. 2008. Statistical downscaling of hourly and daily climate scenarios for various meteorological variables in south-central Canada. *Theoretical and Applied Climatology*. 91(1): 129-147. doi: 10.1007/s00704-007-0302-8
- Fallah Kalaki M, Shokri Kuchak V, Ramezani Etedali H. 2021. simulating the effects of climate change on runoff using the CMIP5 and CMIP6 climate models by SWAT hydrological model (Case study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*. 17(3): 345-359.
- Ghafoor J, Forio MAE, Nolivos I, Arias-Hidalgo M, Goethals PL. 2024. Model-based analysis of the impact of climate change on hydrology in the Guayas River Basin (Ecuador). *Journal of Water and Climate Change*. 15(10): 5021-5040. doi:10.2166/wcc.2024.064
- Haghighi P, Soleimanpour SM, Moradi A. 2025. The effects of climate change on precipitation and temperature using SSP scenarios (case study: Fars province). *Water and Soil Management and Modelling*. 5(2): 199-218. doi: 10.22098/mmws.2024.14691.1425
- Hassan Z, Shamsudin S, Harun S. 2014. Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and Applied Climatology*. 116:243-257. doi:10.1007/s00704-013-0951-8
- Jahangir MH, Haghighi P, Danehkar S. 2022. Downscaling climate parameters in Fars province, using models of the fifth report and RCP scenarios. *Ecological Informatics*. 68(4):101558. doi: 10.1016/j.ecoinf.2022.101558
- Kundzewicz ZW, Krysanova V, Benestad RE, Hov, Piniewski M, Otto IM. 2018. Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science and Policy*. 79: 1-8. doi: 10.1016/j.envsci.2017.10.008

Pholkern K, Saraphirom P, Srisuk K. 2018. Potential impact of climate change on groundwater resources in the Central Huai Luang Basin, Northeast Thailand. *Science of the Total Environment*. 633: 1518-1535. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.300

Rezaei H, Pashapour H, Sadeghi F. 2024. Performance evaluation of CMIP6 models and forecasting of temperature and precipitation changes under shared socioeconomic pathways (SSP) scenarios in Iran. *Strategic Futures Studies*. 3(10): 7-30.

Semenov MA, Barrow EM, Lars-Wg A. 2002. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Man Herts UK*. pp. 1-27.

Seneviratne S, Nicholls N, Easterling D, Goodess C, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo

J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M. 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.

Wang S, Zhang HJ, Wang TT, Hossain S. 2024. Simulating runoff changes and evaluating under climate change using CMIP6 data and the optimal SWAT model: A case study. *Scientific Reports*. 14(1): 23228. doi:10.1038/s41598-024-74269-9

Zand M, Gholamrezaei S, Daryabari SJ, Alijani B. 2023. Detection of climate change by analyzing the occurrence of Extreme-climatic events in the west and southwest of Iran. *Journal of Climate Research*. 1402(54): 37-54.

Zhai J, Dillon J, Dawson V. 2025. Climate Change Education: Cross-Cultural Perspectives. *ECNU Review of Education*. 8(1): 49-52. doi: 10.1177/2096531124123724



Climate Change Prediction under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios in the Bakhtegan-Maharloo Watershed

Seyyed Nasrallah Hosseini¹, Baharak Motamedvaziri^{2*}, Hadi Kiadaliri³
Hasan Ahmadi⁴

1- Ph.D. Candidate, Department of Natural Resources and Environment, SRB.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

2 and 3- Associate Professor, Department of Natural Resources and Environment, SRB.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

4- Professor, Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, University of Tehran, Karaj, Iran

Extended Abstract

Introduction and Goal

Climate change means long-term, irreversible changes in average climate conditions caused by natural and human factors. Climate change is causing global temperature increases, melting of polar ice caps, rising sea levels, and extreme weather events. The significant impact of these changes on meteorological variables such as temperature and precipitation, which disrupt hydrological order. By using general atmospheric circulation models as advanced and comprehensive tools for simulating and predict climate changes, dynamic and thermodynamic atmospheric processes can be modeled. Therefore, this study aimed to predict climate change under the Sixth Report models in the Bakhtegan-Maharloo watershed.

Materials and Methods

In this study, daily precipitation and minimum and maximum temperature data from five synoptic stations of Arsanjan, Neyriz, Safashar, Shiraz and Takht Jamshid were used. Climatic parameters were downscaled using the models of the Sixth Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change using the LARS-WG model. The selection of station type was selected based on data adequacy, dispersion and climatic diversity in the watershed. In this study, using three scenarios SSP126, SSP245 and SSP585, the output of three models ACCESS-ESM1-5, CNRM-CM6-1, and MRI-ESM2-0 was used. Using the LARS-WG8 statistical model, downscaling and correction of precipitation and minimum and maximum temperature data were performed to increase the accuracy of the predictions. Finally, the climate projection was calculated for the period 2026 to 2045. Then, daily precipitation and temperature data from the Bakhtegan-Maharloo synoptic stations were processed and compared them with the base period.

Article Type: Research Article

***Corresponding Authors' E-mail:** bmvaziri@iau.ir

Citation: Hosseini, S. N., Motamedvaziri, B., Kiadaliri, H., Ahmadi, H. 2026. Climate Change Prediction under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) Scenarios in the Bakhtegan-Maharloo Watershed. Watershed Management Research. 39(2): 1-19.

DOI: 10.22092/wmrj.2025.370599.1634

Received: 26 September 2025, **Received in revised form:** 15 October 2025, **Accepted:** 21 December 2025

Published online: 22 June 2026

Watershed Management Research, Vol. 39, No. 2, Ser. No. 151, Summer 2026, pp. 1-19.

Publisher: Fars Agricultural and Natural Resources and Education Center

© Author(s)



Results and Discussion

The results of the ACCESS-ESM1-5 model showed that the difference between the average precipitation of the base period and the future was significant at the 95% confidence level, and predicted higher precipitation compared to the other two models was related to the ACCESS-ESM1 models, and the estimated magnitude of the CNRM-CM6-1 and MRI-ESM2-0 models was closer to the baseline values. The trend of predicted maximum temperature at all stations and scenarios was increased compared to the observational data and was estimated to be significant and upward at the 95% confidence level. The average annual maximum temperature increased from 24.8°C to 26.9°C. The highest predicted maximum temperature was for the CNRM-CM6-1 model. Shiraz and Persepolis have the highest temperatures. The trend of minimum temperature was increasing in all station. The watershed average minimum temperature increased from 9.7°C to 11.5°C (in the SSP585 scenario), indicating warmer nights and a decrease in nighttime cold. The highest predicted minimum temperature compared to other models was for the CNRM-CM6-1 model. The range of predicted changes in watershed precipitation was from 248.9 to 288.7 mm, and the range of predicted changes in maximum and minimum temperature was from 26 to 26.9 and 11 to 11.9 °C, respectively.

Conclusion and Suggestion

Based on the results of this study, the increasing trend in precipitation and temperature (maximum and minimum) was consistent with the severity of greenhouse gas emission intensity scenarios, indicating that the Bakhtegan-Maharlu region will become warmer and relatively wetter in the future. The differences between the models indicates the lack of certainty in the projections, which necessitates the use of multiple models and scenarios to reduce decision-making risk. These changes require careful planning and adaptation for water resource management, agriculture, and public health in the region. Based on the results of this research in the Bakhtegan-Maharloo watershed, it is suggested that the cultivation pattern be changed towards low-water-intensive crops in order to reduce water consumption and increase climate resilience. In addition, the use of smart irrigation and the implementation of watershed and aquifer management plans are also recommended. To improve the sustainability of underground resources, participatory resource management, operator training, and monitoring of unauthorized wells are recommended. Also, for effective adaptation to climate change, it is suggested to diversify rural livelihoods by developing green and sustainable jobs.

Keywords: Bakhtegan-Maharlu watershed, SSP scenarios, LARS-WG model, Sixth Report models

Article Type: Research Article

Conflicts of interest

The authors of this article declared that they have no conflict of interest in writing and publishing the materials and results of this research.

Data Availability Statement

All information and results are presented in the text of the article.

Authors' Contribution

First Author: Conducted the tests and wrote the article

Second Author: Analyzing the results and collaboration in wrote the article

Third Aauthor: Verified the accuracy of the model output

Fourth Author: Conceptualization and development of the general framework of the article