

مقاله علمی-پژوهشی

ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای حدی دما و بارش در حوضه آبریز تجن تحت سناریوهای SSP

الناز آقایی کهلیک بلاغی^۱، رامین فضل‌اولی^{۲*}، محسن مسعودیان^۳، مهدی یاسی^۴، مهدی نادری^۵

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

چکیده

انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم و ازدیاد غلظت گازهای گلخانه‌ای سبب تغییر دمای منطقه‌ای و جهانی، الگوی بارندگی و دیگر شرایط اقلیمی شده‌است. در این پژوهش از گزارش ششم (AR6) و مدل SDSM برای ریزمقیاس‌سازی دما و بارش در دو دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۴۸-۲۰۲۵) و آینده دور (۲۰۸۸-۲۰۶۵) استفاده شده‌است. شاخص‌های آماری مورد استفاده کارایی خوب مدل در شبیه‌سازی دما را نشان دادند. همچنین برای بارش، به غیر از شاخص RMSE، سایر شاخص‌ها در محدوده مناسب بوده‌اند. نتایج نشان داد که دمای بیشینه ایستگاه سلیمان‌تنگه بین ۱/۸ تا ۰/۴ و ۱/۸ تا ۰/۶ و ایستگاه قراخیل ۱/۸ تا ۰/۷ و ۱/۸ تا ۰/۶ درجه و دمای کمینه ایستگاه سلیمان‌تنگه به ترتیب ۰/۱ تا ۱ و ۰/۱ تا ۱/۱ و ایستگاه قراخیل ۰/۱ تا ۱/۵ و ۰/۵ تا ۱/۶ درجه به ترتیب در آینده نزدیک و دور افزایش خواهند یافت. مدل SSP5-85 بیشترین بارندگی‌ها را برای ماه‌های سرد پیش‌بینی نموده‌است و این افزایش می‌تواند منجر به وقوع سیلاب‌ها و تغییرات شدید در الگوی بارندگی گردد که ضرورت اجرای برنامه‌های جامع مدیریت منابع آب و خاک، بازنگری و به‌روزرسانی طراحی سازه‌های مهندسی مرتبط با کنترل سیلاب و اتخاذ راهکارهای موثر برای مواجهه با مخاطرات اقلیمی را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: تغییرات آب و هوایی، سلیمان‌تنگه، قراخیل، مدل اقلیمی

مقدمه

تا ۵/۸ درجه سانتیگراد در ۱۰۰ سال آینده افزایش دهد، گرم شدن کره زمین بخشی از تغییر اقلیم قلمداد می‌شود. تغییر اقلیم، تغییرات کلی و گسترده دمای منطقه‌ای و جهانی، تغییر در رژیم بارندگی، میزان رواناب، سرعت باد، تابش خورشیدی و دمای هوا است (Maslin, 2014). با آغاز انقلاب صنعتی در قرن ۱۹ غلظت کربن دی اکسید (CO_2) موجود در جو حدود ۵۰ درصد افزایش یافت (IPCC, 2013). بر اساس گزارش پنجم ارزیابی (AR5) هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) دمای متوسط جهانی در دوره ۱۸۰۰ تا ۲۰۱۲ بین ۰/۶۵ تا ۱/۰۶ و در طی سال‌های ۱۹۰۶ تا ۲۰۰۵ بین ۰/۷۴ تا ۰/۱۸۱± افزایش می‌یابد (IPCC, 2013 و IPCC, 2007). همچنین طبق نظر هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در قرن بیستم، دمای کره زمین ۰/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و این مقدار بین ۱/۴ تا ۵/۸ درجه سانتی‌گراد تا سال ۲۱۰۰ افزایش می‌یابد (IPCC, 2007). دمای سطح زمین در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۱۱، ۱/۰۹ درجه سانتی‌گراد (۱۸۵۰-۱۹۰۰ دوره) آغاز انقلاب صنعتی) افزایش یافته است این افزایش دما در سطح زمین ۱/۵۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سطح اقیانوس‌ها که ۰/۸۸ می‌باشد، بوده‌است (IPCC, 2021). یک GCM از تعداد زیادی

در قرن ۲۱، تغییرات آب و هوایی یکی از بزرگ‌ترین تهدیدات زیست‌محیطی برای جهان شناخته می‌شود و تخمین زده می‌شود که تغییرات در وقایع حدی آب و هوایی تأثیرات منفی بیشتری بر جامعه انسانی و محیط زیست طبیعی نسبت به تغییرات میانگین آب و هوا داشته باشد (Mahmood and Babel, 2014). میانگین بلند مدت شرایط آب و هوایی یک منطقه در طول دوره ۳۰ سال یا بیشتر اقلیم نامیده می‌شود. گرمایش زمین می‌تواند گرمای سیاره زمین را بین ۱/۴

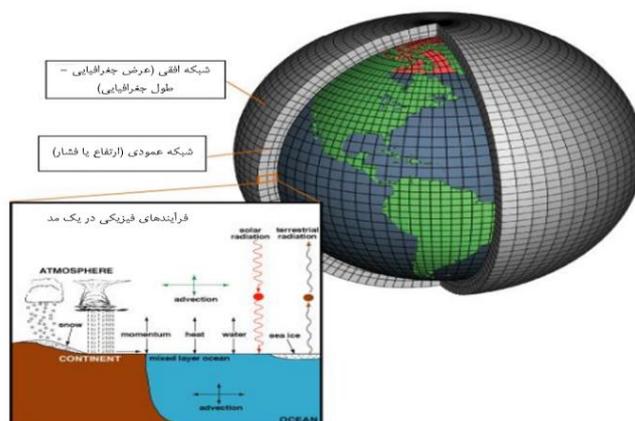
- ۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ۳- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
- ۴- استاد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران
- ۵- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

(* نویسنده مسئول)

(Email: raminfazl@yahoo.com)

ذخیره‌سازی گرما در خاک و اقیانوس‌ها، سطوح شار گرما و رطوبت و انتقال گرما در مقیاس بزرگ به‌وسیله جو و اقیانوس‌ها را نشان می‌دهند (Wilby, 2009).

سلول‌های شبکه‌ای که مناطق افقی و عمودی در سطح زمین را نشان می‌دهند، تشکیل شده است (شکل ۱). در هر یک از سلول‌ها، GCM ها بخار آب و فعل و انفعالات جوی ابر، اثرات مستقیم و غیر مستقیم ذرات معلق در هوا بر تشعشع و بارش، تغییرات پوشش برف و یخ،



شکل ۱- سلول‌های شبکه‌ای GCM، NOAA. (2012)

سطح حوزه آبخیز نیاز به وضوح مکانی بالاتری دارد و در نتیجه استفاده کارآمد از خروجی GCM را محدود می‌کند. نیاز عملی برای پر کردن شکاف بین مقیاس‌های فضایی و زمانی مختلف، منطقه‌ای‌سازی را ایجاب کرده است. این روش‌ها به عنوان روش‌های ریزمقیاس‌سازی نیز شناخته می‌شود، که در آن اطلاعات منطقه‌ای از داده‌های تولید شده توسط GCMs تولید می‌شود (Varis et al., 2004). دو روش برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های خروجی‌های مدل‌های GCM وجود دارد: الف) ریزمقیاس‌سازی دینامیکی، ب) ریزمقیاس‌سازی آماری.

مسعود و همکاران (۲۰۱۵) اثرات تغییرات آب و هوا (با در نظر گرفتن مسیر انتشار بالا) بر رواناب، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک با استفاده از پنج GCM (مدل‌های گردش عمومی) CMIP5 برای سه دوره کنونی (۲۰۰۳-۱۹۷۹)، آینده نزدیک (۲۰۳۹-۲۰۱۵) و آینده دور (۲۰۷۵-۲۰۹۹) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد تا پایان قرن ۲۱، الف) کل حوضه GBM حدود ۴/۳ درجه سانتی‌گراد گرم شود؛ ب) تغییرات میانگین بارندگی (رواناب) به ترتیب برابر ۱۶/۳٪+، ۱۶/۲٪+، ۱۹/۸٪+ و ۳۳/۱٪+ و ۲۹/۶٪+ و ۳۹/۷٪+ در برهماپوترا، گنگ و مگنا باشد؛ و ج) تبخیر و تعرق برای کل حوضه (برهماپوترا: ۱۶/۴٪+، گنگ: ۱۳/۶٪+، مگنا: ۱۲/۹٪+) به دلیل افزایش تابش خالص و همچنین دمای گرم‌تر افزایش یابد. شو و همکاران برای اولین بار عملکرد روش ریزمقیاس‌سازی مبتنی بر فیزیک سطح زمین (LSP-DS^۱) با کارایی محاسباتی بالا برای پیش‌بینی تغییرات آب و

وضوح فضایی GCMها به طور کلی بسیار گسترده بوده و با یک شبکه با اندازه حدود ۵۰۰-۱۰۰ کیلومتر هر شبکه مدل‌سازی شده است علاوه بر این، برای مقیاس‌های زمانی ماهانه و سالانه هستند. GCMها برآوردهای کمی از تغییرات آب و هوایی آینده را ارائه می‌دهد که در مقیاس جهانی و قاره‌ای معتبر است اما بدلیل گستردگی که دارند قادر به تبیین ناهمگونی دقیق در تنوع و تغییرات اقلیمی نیستند. عوارض مختلف زمین مانند آبراهه‌ها، کوه‌ها، ویژگی‌های پوشش زمین، زیرساخت‌ها و اجزای آب و هوا سیستم‌هایی مانند ابرهای همرفتی و نسیم‌های ساحلی، مقیاس‌هایی بسیار ظریف‌تر از ۵۰۰ تا ۱۰۰ کیلومتر دارند. چنین ناهمگونی‌هایی برای تصمیم‌گیری‌های گوناگونی که به اطلاعاتی در مورد اثرات بالقوه بر تولید محصول، هیدرولوژی، توزیع گونه‌ها، و غیره در مقیاس ۵۰۰-۱۰۰ کیلومتر آن نیاز دارند، مهم هستند. از این روی اطلاعات خروجی از این مدل‌ها به ریزمقیاس‌نمایی احتیاج دارند (Trzaska and Schnarr, 2014). تکنیک‌های موسوم به "ریزمقیاس‌سازی" به عنوان وسیله‌ای برای پر کردن شکاف بین آنچه مدل‌سازان اقلیم در حال حاضر قادر به ارائه آن هستند و آنچه ارزیابان اثرات نیاز دارند، ظهور کرده‌اند (Wilby and Wigley, 1997). مدل‌های گردش عمومی (GCMs) برای تولید پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی آینده در مقیاس فضایی و زمانی بزرگ (چندین دهه) استفاده می‌شوند. حتی اگر اندازه‌های شبکه GCM به سمت یک یا دو درجه میل کند، هنوز هم ناسازگاری قابل توجهی با مقیاسی که بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی و منابع آب در آن انجام می‌شوند، وجود دارد. ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی در

1- Landsurface-physics-based downscaling

۰/۴۴ و ۰/۴۵ است (Zakizadeh et al., 2021). چالا و رنگاناتان، مدل MPI-ESM1-2-HR عملکرد برتر برای پیش‌بینی حداکثر دما، حداقل دما و بارندگی برای دوره‌های ۲۰۵۴-۲۰۲۴ و ۲۰۸۵-۲۰۵۵ تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 در مدل ریزمقیاس‌گر SDSM دارد و نتایج ریزمقیاس‌شده تغییرات قابل‌توجهی را در الگوهای هواشناسی نشان داد و حساسیت حوضه را به مسیرهای مختلف اجتماعی-اقتصادی و شرایط آب و هوایی آینده برجسته کرد (Challa and Renganathan, 2025). ژائو و همکاران با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری، داده‌های اقلیمی آینده منطقه پکن، تیانجین و هبی تحت سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 نشان دادند که نرخ رشد تبخیر و تعرق مرجع در این منطقه افزایش یافته که بیشترین افزایش در هبی و کمترین در پکن رخ می‌دهد. در مصرف آب صنعتی نسبت به ارزش افزوده، روند کاهشی در پکن و روند افزایشی در تیانجین و هبی مشاهده شده است (Zhou et al, 2023). رانا و همکاران تأثیر تغییرات اقلیمی بر دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش در مقیاس فصلی و سالانه در منطقه شمال غربی بنگلادش طی سه دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۲۵، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) را با استفاده از مدل SDSM مورد بررسی قرار دادند. پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش میانگین دما و بارش در همه فصول (به جز بارش زمستان) و افزایش سالانه Tmax به میزان ۰/۴۹ درجه، Tmin به میزان ۱/۳۶ درجه و بارش تا ۴۹ درصد در سناریوی RCP8.5 بوده است (Rana et al, 2024). خان و همکاران روندهای آب و هوایی آینده را در منطقه پوتوهار و پاسخ‌های هیدرولوژیکی آن با استفاده از آخرین مدل‌های گردش عمومی جهانی (GCM) و مدل ارزیابی خاک و آب (SWAT) را تحت سه سناریو (SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP5-8.5) مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد دما در تمام سناریوها افزایش مداوم نشان می‌دهد، با پیش‌بینی‌هایی از ۰/۶۰ درجه سانتیگراد تا ۳/۳۸ درجه سانتیگراد برای SSP245، ۰/۴۷ درجه سانتیگراد تا ۳/۸۴ درجه سانتیگراد برای SSP370 و ۰/۵۷ درجه سانتیگراد تا ۶/۲۶ درجه سانتیگراد برای SSP585، که تا انتهای قرن افزایش می‌یابد. پیش‌بینی‌های بارندگی برخلاف دما، تغییرات زمانی و مکانی قابل توجهی را نشان می‌دهد. با این حال، اکثر SSPها افزایش بارندگی در طول موسم بارندگی (JJAS) و کاهش آن در زمستان (DJF) را نشان می‌دهند (Khan et al., 2025). حق و همکاران ریزمقیاس‌سازی دمای شهر بونتر با استفاده از داده‌های NCEP در ایالت هیمچال به وسیله سه روش یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و SDSM انجام شد. در این مطالعه SDSM بالاترین مقدار همبستگی را در بین تمام روش‌های انجام شده دارد و کارآمدترین روش ثابت شده است (Haq, et al., 2025). مجرلو و همکاران (۱۳۹۸) با بررسی دقیق عملکرد و خطای مدل ریزمقیاس‌سازی SDSM از آزمون ناپارامتری من - ویتنی نشان دادند کارایی مدل SDSM کارایی خوبی در

هوای شهری با ریزمقیاس‌سازی دینامیکی متداول (D-DS^۱) مورد بررسی قرار دادند. LSP-DS از سیستم مدل‌سازی سطح زمین آفلاین HRLDAS و D-DS از مدل اقلیمی منطقه‌ای WRF استفاده می‌کند. نتایج نشان می‌دهد که LSP-DS می‌تواند اثر جزیره گرمایی شهری (UHI^۲) را با وضوح بالا به طور دقیق بازسازی کند و پتانسیل بالای LSP-DS را به عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر برای ریزمقیاس‌سازی آب و هوای شهری، در مورد تغییرات آب و هوا و شهرها، برجسته می‌کند (Xue et al., 2025). چن و همکاران به ارزیابی دقیق و مقایسه تفاوت در شبیه‌سازی‌های تراز آب با استفاده از تکنیک‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی، مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) و مدل‌های هیدرولوژیکی در حوضه آبریز بالادست هانجیانگ در چین پرداختند. این پژوهش نشان داد (۱) برای یک GCM، رواناب‌های شبیه‌سازی‌شده هنگام استفاده از بارندگی ارائه شده توسط تکنیک‌های مختلف ریزمقیاس‌سازی آماری به عنوان ورودی به مدل‌های هیدرولوژیکی بسیار متفاوت است؛ (۲) اگرچه بیشتر آمارها در مرور منابع برای ارزیابی روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری نشان می‌دهد که SDSM^۳ عملکرد بهتری نسبت به SSVM^۴ در ریزمقیاس‌سازی بارندگی دارد، به جز راندمان نش-ساتکیلف (NSC) و نسبت انحراف استاندارد ریشه میانگین مربعات خطا به مشاهدات (RSR^۵)، اما راندمان شبیه‌سازی رواناب ایجاد شده توسط بارندگی SDSM بسیار کمتر از SSVM است؛ و (۳) ضرایب NSC و RSR بین بارندگی شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده را می‌توان به عنوان آمارهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد مدل‌های ریزمقیاس‌سازی آماری هنگام استفاده از سناریوهای بارندگی ریزمقیاس‌شده به عنوان ورودی برای مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده کرد (Chen et al, 2012). یانگ و همکاران با بررسی تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی روی رواناب فلات تبت با استفاده از مدل WEP-L نشان دادند سهم تغییر اقلیم و تأثیر کاربری اراضی در تغییرات رواناب برای دو حوضه مورد بررسی ۸۱/۷ و ۷۱/۵ درصد است. سهم باقیمانده تأثیر مربوط به فعالیت‌های انسانی است. (Yang et al., 2020). زکی‌زاده و همکاران تغییر اقلیم در حوضه آبخیز داراباد با هر دو مدل SDSM و SWAT در شبیه‌سازی اقلیم و شبیه‌سازی هیدرولوژیکی افزایش بارندگی را نشان می‌دهد و رواناب در طول دوره مشاهده برابر ۰/۲۹ مترمکعب است، اما برای دوره‌های پیش‌بینی شده با توجه به تغییرات اقلیم در سناریوهای RCP8.5، RCP4.5، RCP2.6 برابر با ۰/۴۳،

- 1- Dynamical downscaling
- 2- Urban heat island
- 3- Statistical Downscaling Model
- 4- Smooth Support Vector Machine
- 5- Root mean square error-observations standard deviation ratio

شیرین رود (زیر حوضه دودانگه)، زیر حوضه چهار دانگه، لاجیم دره، زارم رود و تجن تقسیم می‌شود.

برای مدل‌سازی با مدل ریزمقیاس گر^۱ SDSM داده‌های مدل گردش عمومی جو از سایت کانادایی^۲ برای گزارش ششم تهیه شد. در جدول ۱ اطلاعات مورد استفاده ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و دما آورده شده است.

مدل گردش عمومی - MPI-ESM1-2-HR_historical_1979-2014

مدل‌های گردش عمومی جهانی (GCMs) نشان می‌دهند که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای پیامدهای قابل توجهی برای اقلیم در مقیاس‌های جهانی و منطقه‌ای خواهد داشت. متأسفانه، GCMs به دلیل وضوح مکانی بزرگ مقیاس خود (معمولاً در حدود ۵۰,۰۰۰ کیلومتر مربع) و عدم توانایی در حل ویژگی‌های زیر شبکه مهم مانند ابرها و توپوگرافی، دارای محدودیت محلی هستند. در نتیجه، دو تکنیک به عنوان ریزمقیاس‌سازی آماری و دینامیکی برای ارتباط متغیرهای پیش‌بینی‌کننده جو در مقیاس منطقه‌ای با آب و هوای سطح زمین در مقیاس محلی ظهور کرده‌اند. استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو یا GCM یکی از معتبرترین روش‌های شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آینده است. این مدل‌ها تمامی فرآیندهای اقلیمی را در ابعاد جهانی یا قاره‌ای به طور نسبتاً دقیقی پیش‌بینی می‌نمایند (Rezaei et al., 2014). حتی اگر مدل‌های آب و هوایی جهانی در آینده با رزولوشن بالا اجرا شود همچنان نیاز به «کاهش مقیاس» نتایج این مدل‌ها، به محل‌های مورد مطالعه وجود خواهد داشت (Department of the Environment, 1996; p. 34). مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های GCM به‌وجود آمده‌اند که خروجی‌های مدل‌های عددی را تا مقیاس ایستگاه مدل می‌نمایند. از جمله مدل‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی مدل SDSM می‌باشد. این مدل که ترکیبی از رگرسیون خطی چندگانه و تصادفی است برای شبیه‌سازی دما و بارندگی استفاده می‌شود. دو نوع داده اقلیمی مشاهده شده محلی و داده‌های جوی بزرگ مقیاس استفاده می‌شود. فهرست متغیرهای ECMWF_ERA5_1979-2014 در جدول ۲ نشان داده شده است.

ریزمقیاس‌سازی دما و بارش در حوضه تجن داشت. اکثر مطالعات انجام شده در حوضه تجن تا کنون بر اساس مدل‌سازی تغییر اقلیم با استفاده از داده‌ها و سناریوهای گزارش‌های چهارم و پنجم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم IPCC AR4 و AR5 صورت گرفته است. با توجه به بهبود دقت مدل‌های اقلیمی در گزارش ششم (AR6)، به‌روزرسانی این اطلاعات برای دستیابی به پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و قابل اعتمادتر از پارامترهای اقلیمی نظیر دمای کمینه و بیشینه و بارندگی در حوضه تجن ضروری به نظر می‌رسد. هدف این مطالعه، ارزیابی کارایی مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی گزارش ششم و تحلیل روند تغییرات دمای کمینه و بیشینه و بارندگی در دو دوره آینده نزدیک (۲۰۱۵-۲۰۴۸) و آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۸۸) با استفاده از سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP بوده است. نتایج حاصل، می‌تواند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در حوزه مدیریت منابع آب، کشاورزی و کاهش مخاطرات ناشی از تغییرات اقلیمی در حوضه تجن مورد استفاده قرار گیرد و گامی موثر در جهت توسعه سازگاری‌های پایدار در برابر چالش‌های اقلیمی فراهم آورد.

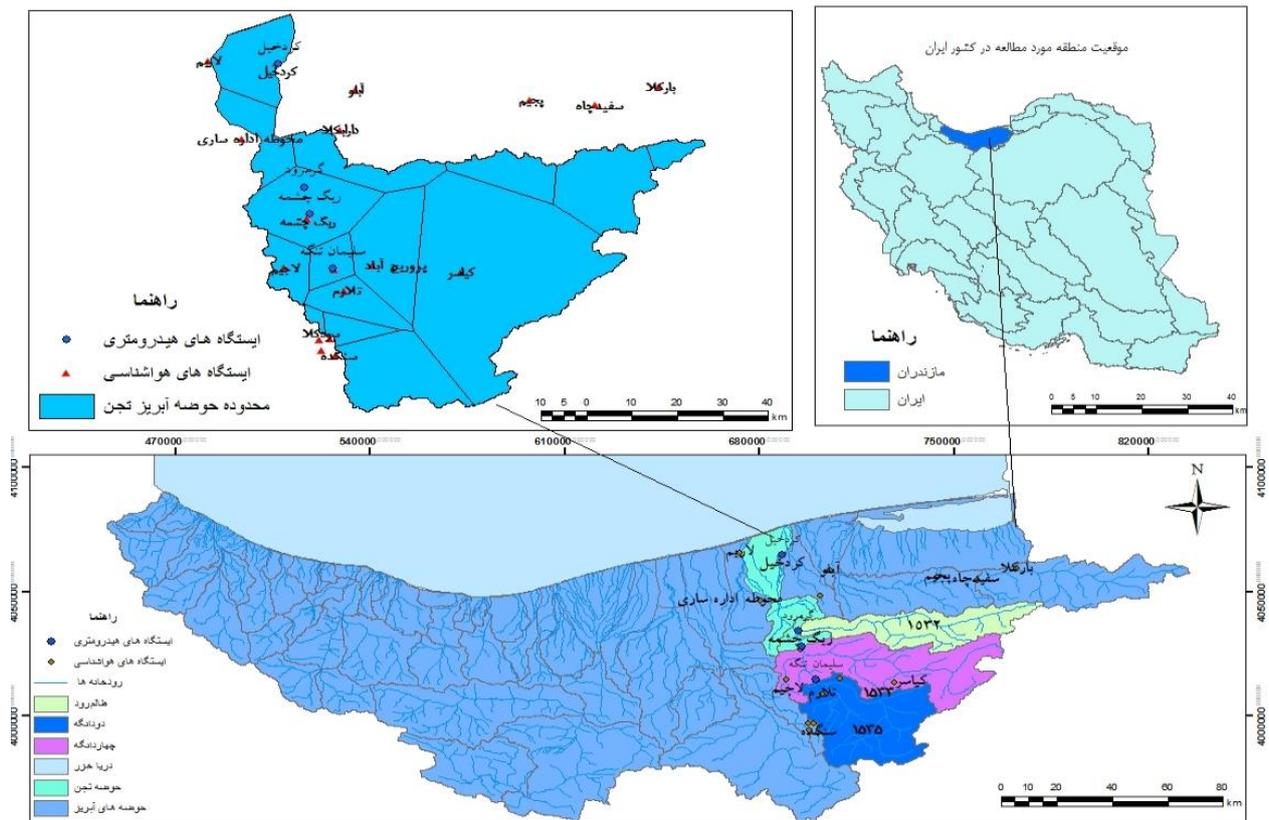
مواد و روش‌ها

محدوده مطالعاتی و داده‌ها

حوضه آبریز رودخانه تجن با وسعتی حدود ۴۰۱۵/۸۸ کیلومتر مربع و مختصات جغرافیایی ۵۶° ۵۲' تا ۵۴° ۵۹' طول شرقی و ۳۵° ۵۶' تا ۳۶° ۴۹' عرض شمالی در زون 39N سیستم UTM و بیضوی WGS84 در استان مازندران قرار دارد. بیش از ۶۰ درصد حوضه از مناطق کوهستانی، حدود ۲۵ درصد آن از اراضی جلگه‌ای و دشتهای ساحلی و بقیه آن از تراس‌های رودخانه‌ای، اراضی کوهپایه‌ای و تپه ماهورها تشکیل شده است. ویژگی‌های عمومی این حوضه مشابه با ویژگی‌های کلی حوضه‌های شمالی البرز بوده و ژئومورفولوژی عمومی آن مشابه با سایر مناطق شمال ایران یعنی البرز شمالی و سواحل دریای خزر است. سرشاخه‌های حوضه در کوه‌های مرتفع البرز قرار دارد و بخش ساحلی که مسطح است، اغلب به طور ناگهانی آغاز شده و تا دریا ادامه دارد. بلندترین نقطه ارتفاعی در محدوده حوضه تجن کوه شاه دژ با ارتفاع ۳۲۵۰ متر و پایین‌ترین نقطه منطقه فرح آباد با ارتفاع ۲۶- متر در ساحل دریای خزر می‌باشد. ارتفاعات این ناحیه از البرز، روند شمال شرقی-جنوب غربی داشته و شکل حوضه به شکل نامتقارن گسترش یافته است. محیط حوضه به علت گستردگی و کشیدگی زیاد حدود ۴۱۴ کیلومتر است. شاخه بندی رودخانه به صورت ترکیبی از شاخه‌بندی دندردی و موازی می‌باشد (مطالعات شناسایی توجیهی طرح آبخیزداری تجن (حوضه آبریز سد شهید رجایی)، ۱۳۳۲). حوضه آبریز تجن به پنج زیر حوضه سفید رود و

1- Statistical Down Scaling Model

2- <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=predcmp16#dlinterface>



شکل ۲- نقشه زیر حوضه‌ها و ایستگاه‌های هیدرومتری و هواشناسی رودخانه تجن (قایناتی و همکاران، ۱۳۹۷)

جدول ۱- اطلاعات مورد استفاده ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و دما

ایستگاه	نوع داده	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع (متر)	دوره پایه	منبع داده
سلیمان تنگه	بارش	۵۳/۱۳	۳۶/۱۵	۳۸۶	۱۹۷۹-۲۰۱۴	شرکت آب منطقه‌ای استان
قراخیل	بارش و دما	۵۲/۷۷	۳۶/۴۵	۱۴/۷	۱۹۹۰-۲۰۱۴	سازمان هواشناسی
مازندران	دما	۵۳/۱۳	۳۶/۱۵	۳۸۶	۱۹۹۰-۲۰۱۴	مازندران

جدول ۲. فهرست متغیرهای ECMWF_ERA5_1979-2014

پیش‌بینی کننده	تعریف	پیش‌بینی کننده	تعریف
mslp	فشار سطح دریا	p5zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
p1_f	سرعت باد در تراز 1000 هکتوپاسکال	p850	ژئوپتانسیل در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1_u	مؤلفه منطقه‌ای باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_f	سرعت باد در تراز 850 هکتوپاسکال
p1_v	مؤلفه نصف‌النهاری باد در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_u	مؤلفه منطقه‌ای باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8_v	مؤلفه نصف‌النهاری باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1th	جهت باد در تراز 1000 هکتوپاسکال	p8_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p1zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال	p8th	جهت باد در تراز 850 هکتوپاسکال
p500	ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	p8zh	واگرایی باد واقعی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p5_f	سرعت باد در تراز 500 هکتوپاسکال	prcp	بارش کل
p5_u	مؤلفه منطقه‌ای باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	s500	رطوبت ویژه در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
p5_v	مؤلفه نصف‌النهاری باد در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	s850	رطوبت ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال
p5_z	ورتیسیته نسبی باد واقعی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال	shum	رطوبت ویژه در تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال
p5th	جهت باد در تراز 500 هکتوپاسکال	temp	دمای هوا در ارتفاع ۲ متر

استفاده از داده‌های بزرگ‌مقیاس آینده (خروجی مدل‌های GCM تحت سناریوهای مختلف) داده‌های اقلیمی محلی را برای دوره‌های آینده تولید کند (Wilby and Dawson, 2007) و Wilby and Harris, 2006). مدل SDSM اولین بار توسط ویلی و همکاران با عنوان نسخه ۲/۱ معرفی شد. نسخه‌های ۲/۲، ۳/۲ و ۴/۲ آن در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۷ ارائه شد (Wilby et al., 2002)، در این مطالعه از نسخه ۶/۱ مدل ریزمقیاس‌گر SDSM استفاده شد. تکنیک ریزمقیاس‌سازی آماری یک روش ترکیبی از رگرسیون خطی چندگانه و تولید داده‌های تصادفی است که عمدتاً برای شبیه‌سازی بارندگی، دما و رطوبت استفاده می‌شود. این روش بر اساس تولید آب و هوای مشروط ترکیبی است و عوامل پیش‌بینی‌کننده جوی بزرگ‌مقیاس را به داده‌های مشاهده‌شده برای ایستگاه مورد نظر مرتبط می‌کند. روش اصلی SDSM را می‌توان به چهار مرحله کنترل کیفیت (Gulacha and Mulungu, Wilby and Dawson, 2007)، انتخاب پیش‌بینی‌کننده‌ها کالیبراسیون مدل و ریزمقیاس‌سازی آماری تقسیم کرد (Han et al., 2023). در این پژوهش از گزارش ششم و مدل ریزمقیاس‌گر SDSM به دلیل کارایی بهتر در تولید داده‌های دمایی و بارندگی استفاده شد. متغیرهای بزرگ‌مقیاس منطقه مطالعاتی در مقیاس روزانه در دوره مشاهداتی حاصل از MPI-ESM1 به عنوان متغیرهای مستقل و بارندگی و دمای ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل به عنوان متغیرهای وابسته به طور جداگانه وارد مدل شده و نتایج حاصل از مدل با نتایج مشاهده شده مقایسه و عملکرد مدل مورد ارزیابی قرار گرفت. برای بررسی میزان قابل اعتماد بودن اطلاعات شبیه‌سازی شده از شاخص‌های آماری ضریب کارایی نش-ساتکیلف (NSE^1)، ریشه میانگین مربعات خطا ($RMSE^2$)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب (R) استفاده شد. در این روابط \bar{O} میانگین داده‌های مشاهداتی، \bar{S} میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده، O_i داده‌های مشاهداتی هر ماه در کل دوره و S_i داده‌های شبیه‌سازی شده هر ماه در کل دوره می‌باشد.

سناریوهای انتشار SSP^f

از سناریوهای انتشار مختلفی برای پیش‌بینی مقدار انتشار این گازها استفاده می‌شود. سناریوها برای انتشار گازهای گلخانه‌ای مخاطرات مرتبط با آن و استراتژی‌های کاهش احتمالی این اثرات و سازگاری با آن استفاده می‌شود. این سناریوها بر اساس طیف وسیعی از مفروضات از جمله متغیرهای اجتماعی-اقتصادی و گزینه‌های

در این پژوهش، از مدل MPI-ESM1-2-HR به عنوان یکی از مدل‌های معتبر و پرکاربرد CMIP6 که توسط مؤسسه هواشناسی ماکس پلانک (Max Planck Institute for Meteorology) توسعه یافته، استفاده شده است. برتری این مدل نسبت به نسخه‌های استاندارد، شامل: قابلیت تفکیک‌پذیری مکانی بالا و شبیه‌سازی دقیق برهم‌کنش‌های اقیانوس-اتمسفر و عملکرد مناسب در بازتولید شرایط اقلیمی است.

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

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

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

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) \cdot (S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (4)$$

ریزمقیاس‌نمایی

تغییرات اقلیمی نیازمند بررسی و پیش‌بینی دقیق اثرات آن در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی است. مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) قادر به شبیه‌سازی شرایط اقلیمی در مقیاس‌های بزرگ هستند و دقت GCMها در مقیاس‌های کوچک‌تر دارای محدودیت می‌باشد. بنابراین خروجی‌های مدل گردش عمومی جو، باید برای منطقه مورد نظر کوچک مقیاس شوند. از روش‌های پرکاربرد ریزمقیاس‌سازی آماری، استفاده از مدل SDSM (Statistical DownScaling Model) که توسط ویلی و همکاران توسعه یافته، یک ابزار قدرتمند برای تولید داده‌های اقلیمی در مقیاس محلی با استفاده از داده‌های بزرگ‌مقیاس ارائه شده توسط مدل‌های GCM است. SDSM بر پایه دو فرض اصلی الف) برقراری ارتباط آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و محلی و ب) پایداری این ارتباط در طول زمان، استوار است. این مدل از روش‌های رگرسیون خطی چندگانه بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس و متغیرهای محلی استفاده می‌کند و شامل دو مرحله اصلی، واسنجی: (Calibration) در این مرحله، روابط آماری بین متغیرهای بزرگ‌مقیاس (پیش‌بینی‌کننده‌ها) و متغیرهای محلی (پیش‌بینی‌شونده‌ها) با استفاده از داده‌های تاریخی شناسایی و تعیین می‌شوند و تولید: (Generation) پس از واسنجی، مدل می‌تواند با

1- Nash-Sutcliffe Efficiency

2- Root Mean Square Error

3- Coefficient of Determination

4- Shared Socioeconomic Pathways

نتایج و بحث

نتایج صحت سنجی پارامترهای دمای بیشینه، دمای کمینه و بارش در مدل SDSM

داده‌های مشاهده شده در طول دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ برای دمای روزانه ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل و داده‌های از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ برای بارندگی روزانه ایستگاه سلیمان‌تنگه و ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ برای بارندگی روزانه ایستگاه قراخیل، برای وارد کردن به مدل ریزمقیاس‌گر SDSM آماده سازی شد. به منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل، داده‌های بارندگی و دما از ایستگاه‌های منتخب در دو بخش استفاده شد. برای بارندگی ایستگاه سلیمان‌تنگه، ۷۰ درصد داده‌ها مربوط به دوره‌ی آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۳ جهت واسنجی و ۳۰ درصد داده‌ها مربوط به دوره‌ی ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ برای صحت‌سنجی به کار گرفته شد. برای دما در ایستگاه سلیمان‌تنگه و همچنین بارندگی و دما در ایستگاه قراخیل، داده‌های دوره‌ی ۱۹۹۰ تا ۲۰۰۶ برای واسنجی و داده‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۱۴ برای صحت‌سنجی استفاده شد. انتخاب این بازه‌های زمانی بر اساس دسترسی به داده‌ها انجام شد. از شاخص‌های ضریب کارایی نش-ساتکیلف (NSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب (R) برای بررسی کارایی مدل استفاده شد. جدول ۳ ضرایب فوق را برای دمای کمینه و حداکثر و جدول ۴ ضرایب بارش را نشان می‌دهند.

جدول ۳. نتایج واسنجی و ارزیابی گردش عمومی ECMWF_ERA5_1979-2014 برای دمای اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و ایستگاه

قراخیل

ایستگاه	متغیر اقلیمی	سال دوره	NSE	RMSE	R^2	R
سلیمان‌تنگه	دمای کمینه	۲۰۱۴-۱۹۹۰	۰/۷۷	۰/۰۵۸	۰/۷۸	۰/۸۸
	دمای بیشینه	۲۰۱۴-۱۹۹۰	۰/۵۶	۰/۰۵۷	۰/۶۵	۰/۸۰
قراخیل	دمای کمینه	۲۰۱۴-۱۹۹۰	۰/۸۳	۰/۰۷۸	۰/۷۸	۰/۹۱
	دمای بیشینه	۲۰۱۴-۱۹۹۰	۰/۷۶	۰/۰۳۲	۰/۶۵	۰/۸۸

جدول ۴. نتایج واسنجی و ارزیابی گردش عمومی ECMWF_ERA5_1979-2014 برای بارش اندازه‌گیری شده ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل

ایستگاه	متغیر اقلیمی	سال دوره	NSE	RMSE	R^2	R
سلیمان‌تنگه	بارش	۲۰۱۴-۱۹۷۹	۰/۹۵	۲/۴۹	۰/۹۸	۰/۹۹
قراخیل	بارش	۲۰۱۴-۱۹۹۰	۰/۸۸	۹/۰۵	۰/۸۸	۰/۹۴

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب تعیین (R^2) و ضریب (R) نشان می‌دهد عملکرد خوبی در شبیه‌سازی دما دارد. برای بارش ضرایب نش-ساتکیلف NSE، ضریب تعیین (R^2) و ضریب (R) نشان دهنده عملکرد قابل قبول SDSM در شبیه‌سازی بارش دارد. به منظور پیش‌بینی مقدار دمای روزانه از مدل گردش عمومی MPI-ESM1 و سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP5-8.5 طبق گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر

کاهش اثرات سوء تغییر اقلیم به عنوان پیش‌نگری (Projection) هستند و پیش‌گویی (Prediction) یا پیش‌بینی (Forecast) نیستند. طبق گزارش ششم (AR6) سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای بالا و بسیار بالا SSP3-7.0 و SSP5-8.5 مقدار انتشار گاز کربن دی‌اکسید CO_2 در سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۱۰۰ نسبت به سطح فعلی دو برابر می‌شود. در انتشار سناریوهای متوسط گازهای گلخانه‌ای SSP2-4.5 مقدار انتشار CO_2 تا اواسط قرن در سطح فعلی می‌باشد. سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای بسیار کم و کم SSP1-1.9 و SSP1-2.6 نیز کاهش انتشار این گاز و رسیدن آن به صفر خالص به ترتیب در سال‌های ۲۰۵۰ تا ۲۰۷۰ و پس از این سال‌ها سطوح مختلفی از انتشار خالص منفی CO_2 را در بر می‌گیرند. در این مطالعه از چهار سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، SSP5-8.5 استفاده شد. سناریوهای SSP1-2.6 نشان‌دهنده مسیره‌ای مختلف توسعه آینده می‌باشند که با مقادیر مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای مرتبط هستند. سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP3-7.0 به ترتیب نشان‌دهنده سناریوی اول با آهنگ گرمایش ۲/۶ وات بر متر مربع، سناریوی دوم ۴/۵ و سناریوی سوم با آهنگ ۷/۰ وات بر متر مربع و سناریوی SSP5-8.5 سناریوی چهارم و با آهنگ گرمایش ۸/۵ وات بر متر مربع و نشان‌دهنده بیشترین مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای است (IPCC, 2021).

R^2 (ضریب تعیین) نشان دهنده ارتباط خطی بین داده‌های مشاهده شده و شبیه‌سازی شده است هرچه مقدار R^2 به یک نزدیکتر باشد نتایج شبیه‌سازی قابل اعتماد است. ضریب نش-ساتکیلف در حالتی که مقدار بیشتر از ۰/۷۵ داشته باشد شبیه‌سازی خوب و مقادیر ۰/۳۶-۰/۷۵ شبیه‌سازی قابل قبول و مقدار کمتر از ۰/۳۶ شبیه‌سازی غیر قابل قبول است (Motovilov et al., 1999). نتایج شبیه‌سازی و به دست آمده از ضرایب نش-ساتکیلف NSE،

اقلیم استفاده شد. نتایج به دست آمده از پیش‌بینی‌های دما در دو دوره آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و آینده دور ۲۰۶۵-۲۰۸۸ ارائه شد.

تغییرات دما

در این بررسی، دمای بیشینه و کمینه روزانه ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل مورد تحلیل قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که هم دمای بیشینه و هم دمای کمینه در هر دو ایستگاه طی دوره‌های آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و آینده دور ۲۰۶۵-۲۰۸۸ افزایش خواهند یافت. همانطور که جداول ۵ و ۶ نشان می‌دهند بازه

تغییرات دمای بیشینه ایستگاه سلیمان‌تنگه بین ۰/۴ تا ۱/۸ درجه سانتی‌گراد طی سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و ۰/۶ تا ۱/۸ درجه در طی سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸ و حداکثر دمای ایستگاه قراخیل ۰/۷ تا ۱/۸ درجه طی سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و ۰/۶ تا ۱/۸ درجه در سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸ افزایش خواهند یافت. دمای کمینه ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه ۰/۱ تا ۱ درجه سانتی‌گراد طی سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و ۰/۱ تا ۱/۱ درجه سانتی‌گراد طی سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸ و دمای کمینه ایستگاه قراخیل ۰/۵ تا ۱/۵ درجه طی سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸ و ۰/۵ تا ۱/۶ درجه در سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸ افزایش خواهد یافت.

جدول ۵. تغییرات میانگین دمای روزانه در آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۸ مدل MPI-ESM1

ایستگاه	دما	میانگین دوره مشاهده‌ای		میزان تغییرات دمای روزانه (ΔT) و میانگین دما در سناریوهای مختلف (درجه سانتیگراد)			
		۱۹۹۰-۲۰۱۴	(درجه سانتیگراد)	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
		(ΔT)	میانگین	(ΔT)	میانگین	(ΔT)	میانگین
سلیمان‌تنگه	دمای کمینه	۹/۶	۹/۷	+۰/۱	+۱	+۱	+۰/۴
	دمای بیشینه	۲۲/۷	۲۳/۱	+۰/۴	+۱/۸	+۰/۹	+۰/۶
قراخیل	دمای کمینه	۱۲/۶	۱۳/۵	+۰/۹	+۰/۵	+۰/۸	+۱/۵
	دمای بیشینه	۲۱/۸	۲۳/۶	+۱/۸	+۱/۱	+۱/۱	+۰/۷

جدول ۶. تغییرات میانگین دمای روزانه در آینده دور ۲۰۶۵-۲۰۸۸ مدل MPI-ESM1

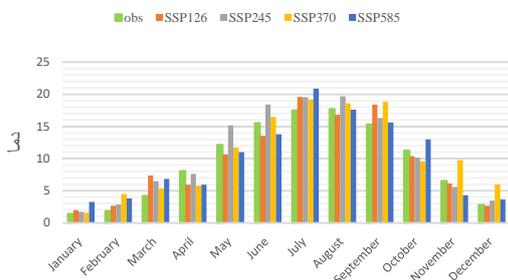
ایستگاه	دما	میانگین دوره مشاهده‌ای		میزان تغییرات دمای روزانه (ΔT) و میانگین دما در سناریوهای مختلف (درجه سانتیگراد)			
		۱۹۹۰-۲۰۱۴	(درجه سانتیگراد)	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
		(ΔT)	میانگین	(ΔT)	میانگین	(ΔT)	میانگین
سلیمان‌تنگه	دمای کمینه	۹/۶	۹/۹	+۰/۳	+۱/۰	+۱/۱	+۰/۱
	دمای بیشینه	۲۲/۷	۲۳/۳	+۰/۶	+۱/۸	+۰/۹	+۰/۷
قراخیل	دمای کمینه	۱۲/۶	۱۳/۴	+۰/۸	+۰/۵	+۰/۸	+۱/۶
	دمای بیشینه	۲۱/۸	۲۳/۶	+۱/۸	+۱/۱	+۱	+۰/۶

تغییرات و میزان دمای ماهانه ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل برای دوره‌های آتی، آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۸ در شکل‌های ۳، ۴ و ۵ ارائه شده است. در ابتدا نمودار دمای کمینه ایستگاه‌های سلیمان‌تنگه و قراخیل در آینده نزدیک و سپس نمودار دمای کمینه در آینده دور و سپس نمودارهای دمای بیشینه ترسیم شده‌اند. در این نمودارها دمای پیش‌بینی شده توسط سناریوهای انتشار مدل گردش عمومی جو در محور افقی و مقدار آنها توسط محور عمودی قابل استخراج است. دمای مشاهداتی هر ایستگاه به صورت نمودار خطی ارائه شده است و مقدار دمای هر ماه را محور عمودی نشان می‌دهد. نمودار ارائه شده در شکل ۲ تغییرات میانگین دمای کمینه ماهانه در ایستگاه سلیمان‌تنگه و قراخیل را بر اساس داده‌های مشاهده شده (OBS) و پیش‌بینی‌های مختلف سناریوهای تغییر اقلیم (SSP) در دوره آینده نزدیک ۲۰۲۵-۲۰۴۸ نشان می‌دهد. خط سبز میانگین ماههای کمینه واقعی ثبت شده در طول دوره مشاهداتی هستند و به

عنوان مبنایی برای مقایسه با پیش‌بینی‌ها عمل می‌کنند. محور عمودی دما (°C) و محور افقی ماه‌های میلادی را نشان می‌دهد. سناریوهای SSP370 و SSP585 که نشان‌دهنده انتشار بالاتر گازهای گلخانه‌ای هستند، دمای کمینه بالاتری را نسبت به داده‌های مشاهده شده و سناریوهای دیگر پیش‌بینی می‌کنند. این نشان می‌دهد که با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، انتظار می‌رود دمای کمینه در منطقه افزایش یابد. سناریوهای SSP1-2.6 و SSP2-4.5، تغییرات دمایی کمتری نسبت به سناریوهای SSP370 و SSP585 پیش‌بینی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۸ بیشترین افزایش دمای کمینه (Tmin) ایستگاه سلیمان‌تنگه در ماه‌های July و October تحت سناریوهای SSP5-8.5 و در ایستگاه قراخیل بیشترین افزایش در ماه‌های September، October، November و May تحت سناریوی SSP5-8.5 رخ می‌دهد. کمترین دماها در ماه‌های زمستان (ژانویه و فوریه) و بیشترین دماها در ماه‌های تابستان

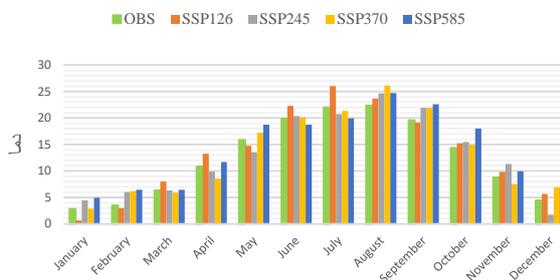
می‌دهند. یعنی همه سناریوها دمای کمینه را در زمستان کمترین و در تابستان بیشترین نشان می‌دهند.

میانگین دمای کمینه ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



SSP (جولای و آگوست) رخ می‌دهد. به طور کلی، همه سناریوهای الگوی کلی تغییرات دما را مشابه داده‌های مشاهده شده نشان

میانگین دمای کمینه ماهانه ایستگاه قراخیل

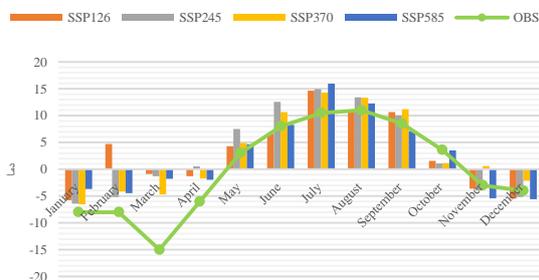


شکل ۳- میانگین دمای کمینه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

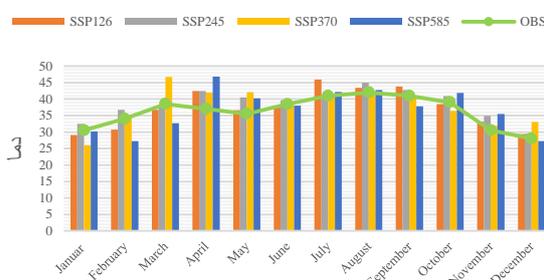
شده در ماه‌های مختلف افزایش داشته و به طور کلی از الگوی دمای منطقه پیروی می‌کند و دما از ژانویه تا جولای افزایش یافته مشاهده می‌شود که در برخی ماه‌ها اختلاف بین داده‌های مشاهده‌شده و سناریوهای پیش‌بینی شده، به ویژه در ماه‌های آوریل تا جولای شدت بیشتری نشان می‌دهد. بیشترین دمای ماهانه در ایستگاه سلیمان تنگه معمولاً در تابستان رخ می‌دهد.

نمودار شکل ۴ تغییرات حداقل دمای کمینه و حداکثر دمای بیشینه ایستگاه سلیمان تنگه در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸ را نشان می‌دهند. این نمودارها بیانگر این است که مقادیر حداقل و حداکثر دما در ایستگاه سلیمان تنگه طبق سناریوهای SSP نسبت به دوره‌های مشاهداتی افزایش پیدا کرده است به طوری که در ماه مارس بیشترین افزایش دمای کمینه نسبت به دوره مشاهداتی پیش‌بینی می‌شود. حداکثر دمای بیشینه مقادیر پیش‌بینی شده نسبت به مقادیر مشاهده

حداقل دمای کمینه ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



حداکثر دمای بیشینه ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه



شکل ۴- تغییرات حداقل دمای کمینه و حداکثر دمای بیشینه ایستگاه سلیمان تنگه در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

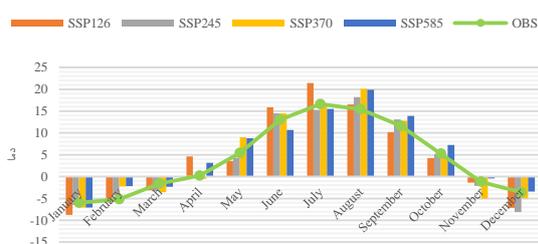
(حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد یا بیشتر) را دارند. تغییرات حداکثر دمای بیشینه نشان می‌دهد که تغییرات دمایی پیش‌بینی شده در سناریوهای مختلف برای ماه‌های تابستان به طرز قابل توجهی بیشتر از داده‌های مشاهده‌شده است و تأثیر بالقوه افزایش گازهای گلخانه‌ای در این فصول است.

میانگین دمای کمینه ماهانه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل طی سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸ در شکل ۶ نشان می‌دهد افزایش دما تحت سناریوهای مختلف، تابستان‌های داغ‌تر و زمستان‌ها معتدل‌تر به همراه خواهند داشت، این عامل می‌تواند بر الگوهای بارندگی

با توجه به نمودار شکل ۵ حداقل دمای کمینه ماهانه ایستگاه قراخیل در اکثر ماه‌ها، تغییرات پیش‌بینی شده برای سناریوهای مختلف بیشتر از تغییرات مشاهده‌شده هستند. در ماه‌های تابستان (ژوئن، جولای، آگوست)، بیشتر سناریوها افزایش قابل توجهی در دما دارند که به تدریج با نزدیک شدن به زمستان (دسامبر) کاهش می‌یابد. بیشترین تفاوت بین داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌ها در ماه‌های میانه سال، به خصوص ماه‌های جولای و آگوست، به چشم می‌خورد. حداکثر دمای بیشینه در ماه‌های تابستان (ژوئن، جولای، آگوست)، سناریوهای مختلف به ویژه SSP5-85 پیش‌بینی دماهای بسیار بالاتر

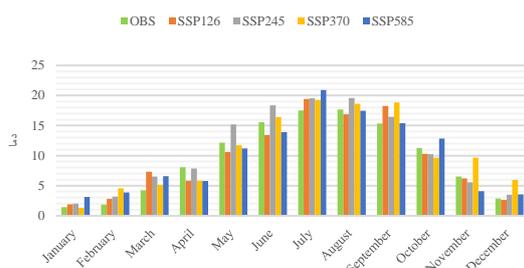
بارش‌های غیر برفی وجود دارد. در فصول بهار و تابستان (مارس تا آگوست) افزایش محسوس دما، به‌ویژه در ماه‌های جولای و آگوست و موج‌های گرمایی در سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 شدیدتر خواهد بود که باعث افزایش تبخیر و احتمال وقوع خشکسالی خواهد شد.

حداقل دمای کمینه ماهانه ایستگاه قراخیل



شکل ۵- تغییرات حداقل دمای کمینه و حداکثر دمای بیشینه ایستگاه قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

میانگین دمای کمینه ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه

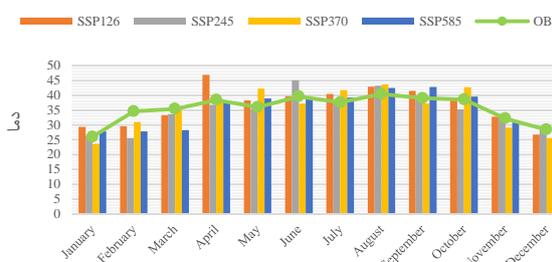


شکل ۶- میانگین دمای کمینه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۸۸

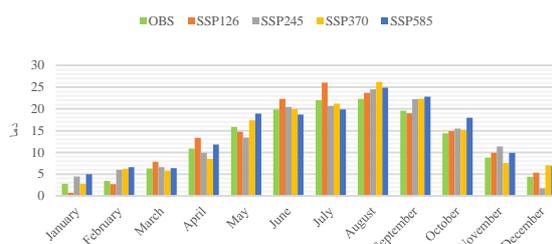
این مقدار کاهش پیدا خواهد کرد و افزایش حداقل دما در تمامی سناریوها مشاهده می‌شود، اما میزان آن به شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای بستگی دارد. در سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85، تغییرات بسیار قابل توجه است و احتمال وقوع موج‌های گرمایی شبانه افزایش می‌یابد. در مقایسه با داده‌های مشاهده‌شده، سناریوهای آینده افزایش محسوسی در دما را نشان می‌دهند، به‌خصوص در ماه‌های گرم افزایش قابل توجه دمای بیشینه، مخصوصاً در ماه‌های ژوئن تا آگوست که دما در برخی سناریوها به بیش از ۳۰ درجه می‌رسد. در سناریوهای با انتشار بالای CO₂، موج‌های گرمایی بیشتر و شدیدتری انتظار می‌رود. بیشترین افزایش دما در ماه‌های مارس تا آگوست مشاهده می‌شود. در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست، سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهند.

حوضه تأثیر بگذارد. در سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85، افزایش دما قابل توجه خواهد بود که می‌تواند موجب افزایش تنش گرمایی شود. در فصل زمستان (دسامبر تا فوریه) دما نسبت به داده‌های مشاهده‌شده (OBS) افزایش یافته است، اما همچنان از ۱۰ درجه کمتر بوده که احتمال کاهش تعداد روزهای یخبندان و افزایش

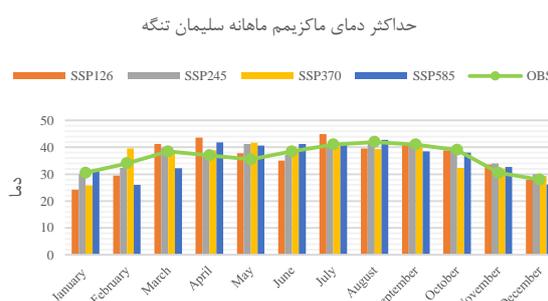
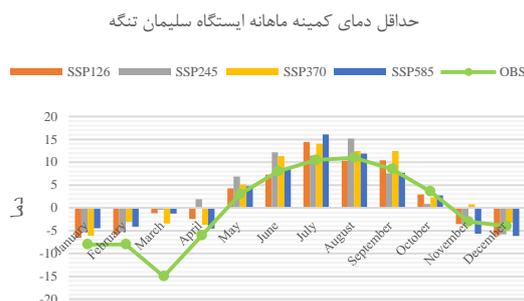
حداکثر دمای بیشینه ماهانه ایستگاه قراخیل



میانگین دمای کمینه ماهانه ایستگاه قراخیل



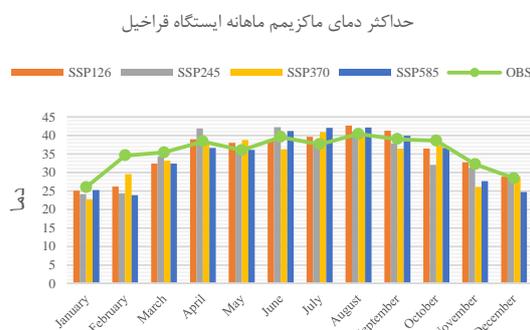
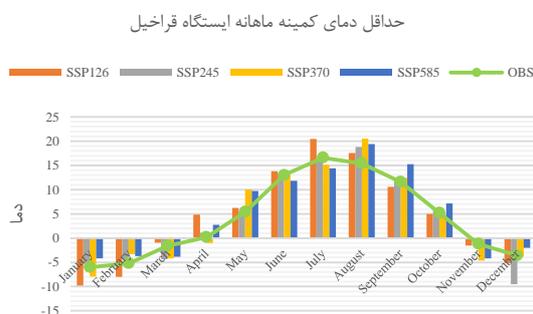
نمودار شکل ۷ روند حداقل دمای کمینه ماهانه ایستگاه سلیمان‌تنگه را نشان می‌دهد کمترین دماها در ماه‌های زمستان (ژانویه و فوریه) و بیشترین دماها در ماه‌های تابستان (جولای و آگوست) رخ می‌دهد. این الگو با الگوی طبیعی تغییرات دمایی حوضه همخوانی دارد. تمامی سناریوهای SSP نشان‌دهنده افزایش تدریجی دمای کمینه در آینده هستند. در تمام سناریوها، حداقل دما نسبت به داده‌های مشاهده‌شده افزایش یافته است. افزایش دمای کمینه می‌تواند بر وقوع رویدادهای آب و هوایی شدید مانند موج‌های گرما و سرمای شدید تأثیر بگذارد و تعداد روزهای یخبندان کاهش یابد. در ماه‌های سرد (دسامبر تا فوریه)، افزایش دمای کمینه بسیار مشهود است. ماه‌های تابستانی (ژوئن تا آگوست) نیز افزایش دما را نشان می‌دهند. داده‌های مشاهده‌شده، حداقل دما در برخی ماه‌های زمستان به کمتر از ۱۰- درجه رسیده، اما در آینده تحت سناریوهای مختلف



شکل ۷- تغییرات حداقل دمای کمینه و حداکثر دمای بیشینه ایستگاه سلیمان تنگه در سال‌های ۲۰۸۸-۲۰۶۵

در همه سناریوها مشاهده می‌شود. در فصل تابستان (ژوئن تا آگوست)، بیشترین مقدار ماکزیمم دمای کمینه ثبت شده است و ماکزیمم دمای کمینه ماهانه نیز در ماه‌های مختلف افزایش پیدا کرده است. نمودار حداکثر دمای ماهانه ایستگاه قراخیل نشان می‌دهد داده‌های مشاهده‌شده و مدل‌های SSP در فصول گرم دارای اختلاف هستند. SSP5-85 دمای بیشتری نسبت به سایر سناریوها نشان می‌دهد. در فصل‌های سرد داده‌های مشاهده‌شده از داده‌های پیش‌بینی شده بالاتر هستند، که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش دما سریع‌تر از پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی باشد.

شکل ۸ نمودار حداقل دمای کمینه ماهانه در ایستگاه قراخیل را برای بازه ۲۰۶۵ تا ۲۰۸۸ نشان می‌دهد سناریوهای آینده در بیشتر ماه‌ها دمای بالاتری نسبت به داده‌های مشاهده‌شده نشان می‌دهند که بیانگر گرمایش در دوره‌های آینده است. تفاوت بین داده‌های مشاهده‌شده و مدل‌های آینده کمتر است، اما باز هم افزایش دما پیش‌بینی می‌شود. سناریوهای شدیدتر مانند SSP5-85 بیشترین میزان گرمایش را نشان می‌دهند. در زمستان، اگرچه دماهای کمینه همچنان پایین هستند، اما افزایش تدریجی دما می‌تواند منجر به کاهش روزهای یخبندان و تغییر الگوی بارش شود. و احتمال کاهش یخبندان‌های شدید وجود دارد. افزایش تدریجی دمای کمینه ماهانه



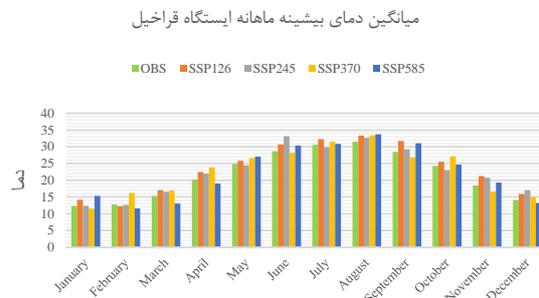
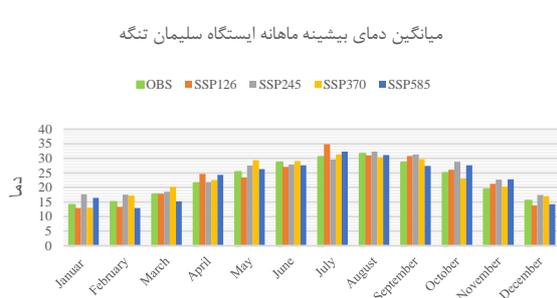
شکل ۸- تغییرات حداقل و حداکثر مقادیر دمای کمینه ایستگاه قراخیل در سال‌های ۲۰۸۸-۲۰۶۵

معتدل‌تر خواهد بود. نمودار شکل ۱۰ میانگین دمای بیشینه ماهانه ایستگاه سلیمان تنگه در دوره ۲۰۸۸-۲۰۶۵ نشان می‌دهد. میانگین دما در ماه‌های گرم (جولای و آگوست) حدود ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است، در حالی که در ماه‌های سرد (ژانویه و دسامبر) حدود ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد قرار دارد. داده‌های مشاهده‌شده (OBS) در اکثر ماه‌ها به سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 نزدیک‌تر هستند که بیانگر روند افزایش دما و گرمایش منطقه است. در ماه‌های گرم‌تر،

با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل ۹ و مشاهده دمای ماکزیمم دوره آینده ۲۰۴۸-۲۰۲۵ میانگین دمای ماکزیمم ماهانه در ماه‌های گرم‌تر (جولای و آگوست) بالاتر از ۳۰ درجه سانتی‌گراد است که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش تنش حرارتی برای کشاورزی و منابع آب باشد. داده‌های مشاهده‌شده نزدیک به SSP2-45 و SSP3-70 هستند و نشان‌دهنده یک روند میانه از نظر تغییرات اقلیمی می‌باشد. اگر انتشار گازهای گلخانه‌ای افزایش یابد، دماها به سمت SSP5-85 نزدیک‌تر خواهند شد، که به معنای تابستان‌های گرم‌تر و زمستان‌های

ماه‌های گرم نشان‌دهنده روند گرمایش جهانی و تأثیر آن بر منطقه است.

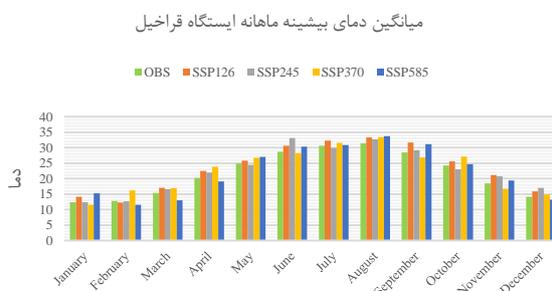
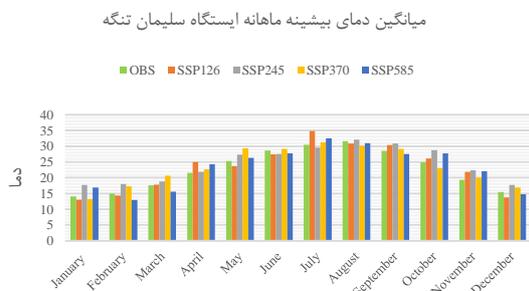
اختلاف بین سناریوها بیشتر است، و سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 دمای بالاتری را پیش‌بینی می‌کنند. افزایش دما به ویژه در



شکل ۹- میانگین دمای بیشینه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

هستند، به ویژه در ماه‌های گرم‌تر. در ماه‌های تابستانی (ژوئن تا سپتامبر)، سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 دمای بالاتری را نشان می‌دهند. افزایش دمای ماکزیمم در ماه‌های گرم نشان می‌دهد که منطقه در حال تجربه تابستان‌های گرم‌تر است در صورت ادامه روند فعلی، احتمالاً در سال‌های آینده افزایش دمای بیشتری تجربه خواهد شد، به ویژه در تابستان. زمستان‌ها همچنان معتدل هستند اما افزایش دمای میانگین می‌تواند نشان‌دهنده کاهش روزهای سرد و شب‌های یخبندان باشد.

زمستان‌ها نسبتاً معتدل باقی می‌ماند، اما همچنان افزایش دمای میانگین مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده کاهش شب‌های خنک باشد. نمودار میانگین دمای ماکزیمم ماهانه را برای ایستگاه قراخیل نمایش می‌دهد روند دما مشابه بسیاری از مناطق معتدل است اوج گرما در ماه‌های جولای و آگوست مشاهده می‌شود که دما حدود ۳۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد است. در ماه‌های زمستانی (ژانویه و دسامبر)، میانگین دما حدود ۱۰ تا ۱۵ درجه سانتی‌گراد است که نشان‌دهنده زمستان‌های نسبتاً ملایم است. داده‌های مشاهده‌شده (OBS) بیشتر به سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 نزدیک



شکل ۱۰- میانگین دمای بیشینه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

دارد. ژوئن، جولای و آگوست کمترین میزان بارش را نشان می‌دهند. که این روند همسو با فصل تابستان و کاهش فعالیت‌های جوی است. اگر سناریو SSP5-8.5 اتفاق بیفتند، ممکن است شاهد افزایش بارش در ماه‌های پرباران باشیم، این موضوع می‌تواند باعث وقوع سیلاب‌های ناگهانی شود. پیش‌بینی کاهش بارش در تابستان (ژوئن تا آگوست) نشان‌دهنده احتمال تشدید خشکسالی فصلی است. نمودارهای ارائه‌شده میانگین بارندگی ماهانه در ایستگاه قراخیل برای دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۸، بیشترین میزان بارش در اکتبر، نوامبر و دسامبر

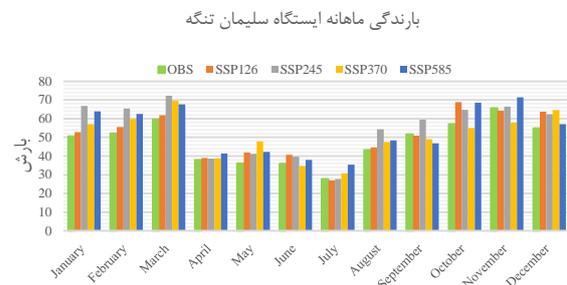
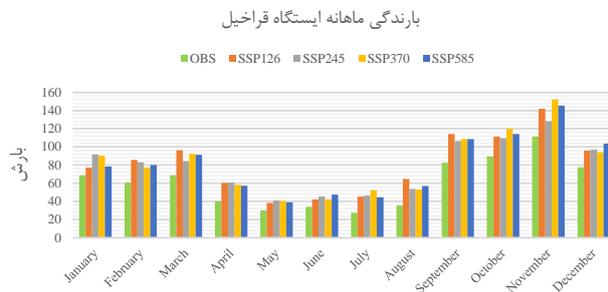
تغییرات بارش

مقایسه بارش حداکثر دوره پایه و آتی

نمودار شکل ۱۱ میزان بارش ماهانه را برای ایستگاه سلیمان تنگه برای دوره مشاهداتی و پیش‌بینی شده تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم (SSP1-26، SSP2-45، SSP3-70، SSP5-85) در دوره ۲۰۲۵-۲۰۴۸ نمایش می‌دهد. بیشترین میزان بارش در ماه‌های مارس (و اکتبر دیده می‌شود) در ماه دسامبر نیز میزان بارش نسبتاً بالاست که نشان می‌دهد این منطقه در زمستان بارندگی قابل توجهی

ژوئن، جولای و آگوست دیده می‌شود، که الگوی متداولی برای بسیاری از مناطق با اقلیم مشابه است.

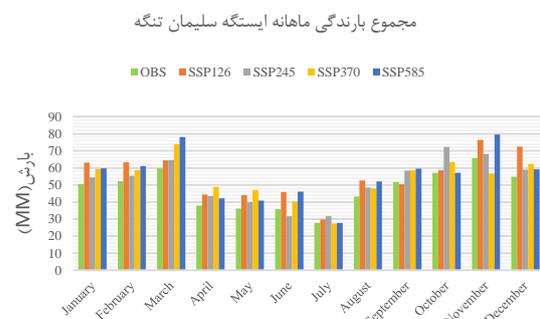
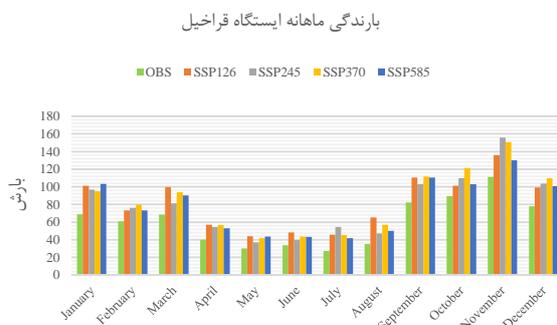
می‌باشد و بیان کننده این مسئله است که پاییز و اوایل زمستان فصل‌های پر باران منطقه هستند. کمترین میزان بارندگی در ماه‌های



شکل ۱۱- مجموع بارندگی ماهانه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۲۵-۲۰۴۸

احتمال وقوع تغییرات شدید اقلیمی در آینده، به‌ویژه در سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 که پیش‌بینی می‌کنند بارندگی‌ها در تابستان افزایش خواهد یافت. به طور کلی، همه سناریوها بیشترین بارندگی را در بهار و کمترین بارندگی را در تابستان پیش‌بینی می‌کنند. سناریوهای SSP370 و SSP585، بارندگی بیشتری را در برخی ماه‌ها (به ویژه ماه‌های پر بارش) پیش‌بینی می‌کنند. در فصول زمستان و پاییز (سپتامبر تا دسامبر) تمامی سناریوها افزایش نسبی بارندگی را نشان می‌دهند. این افزایش می‌تواند منجر به سیلاب‌ها و تغییرات شدید در الگوی بارندگی شود.

مجموع بارندگی ماهانه در دوره آینده دور (۲۰۶۵-۲۰۸۸) شکل ۱۲ در هر دو ایستگاه تحت سناریوهای مختلف روند افزایش دارد. در ماه‌های تابستان (ژوئن تا آگوست)، پیش‌بینی‌های مدل‌ها به‌ویژه SSP3-70 و SSP5-85 بارندگی‌های بیشتری را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهند. این می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که مدل‌ها تغییرات بیشتری را در تابستان پیش‌بینی کرده‌اند، در حالی که مشاهدات واقعی بارندگی کمتری را گزارش کرده‌اند. در ماه‌های سرد (ژانویه تا مارس)، پیش‌بینی‌های مدل‌ها به‌ویژه SSP1-2.6 و SSP2-4.5، با داده‌های مشاهداتی همخوانی بیشتری دارند. اما همچنان مدل SSP5-85 بیشترین بارندگی‌ها را پیش‌بینی می‌کند و نشان‌دهنده



شکل ۱۲- مجموع بارندگی ماهانه ایستگاه‌های سلیمان تنگه و قراخیل در سال‌های ۲۰۶۵-۲۰۸۸

(۲۰۶۵ تا ۲۰۸۸) میلادی استفاده شده‌است. در نهایت کارایی مدل SDSM با شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تعیین R^2 و ضریب همبستگی (R) مورد ارزیابی قرار خواهند گرفت. نتایج ارزیابی مدل SDSM برای ریزمقیاس سازی پارامترهای دما، ضرایب NSE، RMSE، R^2 و R به ترتیب مقادیر

نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر تغییر اقلیم روی پارامترهای دما و بارش از مدل MPI-ESM1 بر اساس گزارش ششم هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (AR6) و از سناریوهای انتشار SSP3-7.0، SSP5-8.5، SSP1-2.6، SSP2-4.5 و مدل ریزمقیاس‌گر SDSM برای شبیه‌سازی در دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۱۵ تا ۲۰۴۸) و آینده دور

۰/۷۷، ۰/۰۵۸، ۰/۷۸ و ۰/۸۸ برای دمای کمینه و مقادیر ۰/۵۶، ۰/۰۵۷، ۰/۶۵ و ۰/۸ را برای دمای بیشینه ایستگاه سلیمان تنگه نشان داد. برای دمای کمینه ایستگاه قراخیل نیز ضرایب مذکور به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۰۷۸، ۰/۷۸ و ۰/۹۱ و برای دمای بیشینه مقادیر ۰/۷۶، ۰/۰۳۲، ۰/۶۵ و ۰/۸۸ به دست آمد که نشان دهنده کارایی خوب مدل در شبیه سازی دمای ماکزیمم و مینیمم در هر دو ایستگاه می باشد. ضرایب NSE ، R^2 و R برای واسنجی بارش ایستگاه سلیمان تنگه معادل ۰/۹۵، ۰/۹۸ و ۰/۹۹ و برای ایستگاه قراخیل به ترتیب برابر با ۰/۸۸، ۰/۸۸ و ۰/۹۴ و بجز ضریب $RMSE$ ضرایب دیگر کارایی مناسب عملکرد $SDSM$ در ریزمقیاس نمایی آماری دارد. برای ایستگاه قراخیل نتایج نشان می دهد بازه تغییرات دمای بیشینه ایستگاه سلیمان تنگه بین ۰/۴ تا ۱/۸ درجه سانتی گراد در آینده نزدیک و ۰/۶ تا ۱/۸ درجه در آینده دور و حداکثر دمای ایستگاه قراخیل ۰/۷ تا ۱/۸ درجه در آینده نزدیک و ۰/۶ تا ۱/۸ درجه در آینده دور افزایش خواهند یافت. دمای کمینه ایستگاه های سلیمان تنگه ۰/۱ تا ۱ درجه سانتی گراد طی سال های ۲۰۴۸-۲۰۲۵ و ۰/۱ تا ۱/۱ درجه سانتی گراد طی سال های ۲۰۸۸-۲۰۶۵ و دمای کمینه ایستگاه قراخیل ۰/۵ تا ۱/۵ درجه طی سال های ۲۰۴۸-۲۰۲۵ و ۰/۵ تا ۱/۶ درجه در سال های ۲۰۸۸-۲۰۶۵ افزایش خواهد یافت.

اگرچه ارزیابی عملکرد مدل با شاخص های آماری مانند $RMSE$ ، NSE ، R^2 و ضریب همبستگی نشان دهنده کارایی مطلوب مدل در شبیه سازی پارامترهای دما و بارش است، اما محدودیت های ذاتی مدل و وابستگی آن به داده های ورودی و فرضیات مدل سازی می تواند منجر به عدم قطعیت هایی در نتایج شود. تفاوت معنادار در خروجی های مدل $SDSM$ بین سناریوهای مختلف SSP ، به ویژه بین سناریوهای (SSP1-2.6) و (SSP5-8.5)، نمایانگر دامنه گسترده ای از نتایج احتمالی آینده است. این امر نشان می دهد که انتخاب سناریو و میزان انتشار گازهای گلخانه ای تأثیر زیادی در تعیین شدت تغییرات دما و بارش دارد.

تمام سناریوهای SSP نشان دهنده افزایش تدریجی دماهای کمینه و بیشنه در آینده هستند. در سناریوهای SSP3-70، تغییرات بسیار قابل توجه است و احتمال وقوع موج های گرمایی شبانه افزایش می یابد. در ماه های گرم و تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بیشترین افزایش دما رخ می دهد. با توجه به افزایش مقادیر حداقل دمای کمینه و حداکثر دمای بیشنه، در آینده شاهد زمستان های معتدل تر و تابستان های گرم تر خواهیم بود که می تواند منجر به خشکسالی های شدیدتر و تغییر در منابع آبی منطقه شود. احتمال موج های گرمایی شبانه بیشتر خواهد شد که می تواند منجر به افزایش تبخیر و خشکی خاک شود. افزایش حداقل دمای کمینه ماهانه در هر دو ایستگاه می تواند نشان دهنده روند گرم شدن کلی اقلیم این منطقه باشد. مجموع بارندگی ماهانه در دوره آینده

نزدیک (۲۰۴۸-۲۰۲۵) و آینده دور (۲۰۸۸-۲۰۶۵) هر دو ایستگاه تحت سناریوهای مختلف روند افزایش دارد. در ماه های سرد (ژانویه تا مارس)، پیش بینی های بارندگی تحت سناریوهای SSP1-26 و SSP2-45 مشابه داده های مشاهداتی، اما سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بارندگی بیشتری را به ویژه در ماه های پر بارش پیش بینی می کنند. افزایش بارندگی به ویژه تحت سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 بارندگی های بیشتری را نسبت به داده های مشاهداتی نشان می دهند و مدل ها تغییرات شدیدتری را نسبت به داده های مشاهداتی، پیش بینی می کنند در ماه های سرد (ژانویه تا مارس)، همچنان مدل SSP5-85 بیشترین بارندگی ها را پیش بینی می کند و نشان دهنده احتمال وقوع تغییرات شدید اقلیمی در آینده، به ویژه در سناریوهای SSP3-70 و SSP5-85 افزایش خواهد یافت. با افزایش انتشار گازهای گلخانه ای، ممکن است الگوهای بارندگی تغییر کرده و در برخی مناطق افزایش بارندگی رخ دهد این افزایش می تواند منجر به سیلاب ها و تغییرات شدید در الگوی بارندگی گردد. نتایج این تحقیق نشان داد که تحت سناریوهای تغییر اقلیم، بارش های شدید در آینده بیشتر حادث خواهد شد و مقادیر دبی اوج وقایع سیلابی نیز افزایش می یابد. این موضوع برای مدیریت مخزن سد شهید رجایی، ضرورت بازنگری در الگوهای بهره برداری را ایجاب می کند تا ظرفیت کنترل سیلاب در ماه های پر بارش حفظ شود. همچنین کاهش نسبی بارش های معمول و تغییر در توزیع زمانی آن، بر تأمین آب کشاورزی اثرگذار بوده و لزوم بهینه سازی زمان بندی آبیاری را برجسته می کند. در زمینه سیلاب، افزایش شدت رویدادهای حدی ضرورت توسعه اقدامات غیرسازه ای نظیر سامانه های هشدار سیل و مدیریت کاربری اراضی را نشان می دهد.

با توجه به افزایش بارندگی و دما بخصوص در سناریوهای بدبینانه پیشنهاد می گردد تأثیر تغییرات اقلیمی بر کیفیت آب و رژیم هیدرولوژیکی رودخانه های حوضه تجن و اثرات تغییر اقلیم بر اکوسیستم های آبی به منظور حفاظت بهتر از منابع طبیعی ارزیابی شود و از مدل های ریزمقیاس نمایی با دقت بالاتر برای تحلیل روندهای اقلیمی آینده استفاده شود. همچنین مدل های ترکیبی سازه ای و غیرسازه ای برای کاهش ریسک سیلاب و خشکسالی توسعه و ارزیابی شود.

منابع

رحیم زاده، ف. و عسگری، ا. ۱۳۸۳. نگرشی بر تفاوت نرخ افزایش دمای حداقل و حداکثر و کاهش دامنه شبانه روزی دما در کشور. تحقیقات جغرافیایی. ۷۳(۱۹): ۱۷۷-۱۵۵.

قایناتی، ش.، فضل اولی، ر.، مسعودیان، م.، و ناد، م. ۱۳۹۸. استفاده از دو شاخص SPI_{mod} و SDI_{mod} به منظور بررسی تطبیقی

- on Climate Change, Cambridge University Press, 2021.
- IPCC-TGCI, 1999. Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Version 1. Prepared by Carter, T.R., Hulme, M., Lal, M., Intergovernmental Panel on Climate Change. Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment.
- Khan, A. U., Ahmad, S., Ahmad, K., Azmat, M., Dahri, Z. H., Khan, M. W. and Iqbal, Z. 2025. Hydro-Climatic variability in the Potohar Plateau of the Indus River Basin under CMIP6 climate projections. *Theoretical and Applied Climatology*. 156(1): 20
- Mahmood, R. and Babel, M. S. 2014. Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the transboundary region of the Jhelum river basin. *Weather and Climate Extremes*. 5: 56-66.
- Maslin, M. 2014. *Climate change: a very short introduction*. OUP Oxford.
- Masood, M., Yeh, P. F., Hanasaki, N. and Takeuchi, K. 2015. Model study of the impacts of future climate change on the hydrology of Ganges–Brahmaputra–Meghna basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. 19(2): 747-770
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K. and Rodhe, A. 1999. Validation of a distributed hydrological model against spatial observations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98, 257-277.
- Nakamura, R. and Shimatani, Y. 2021. Extreme flood control operation of dams in Japan. *Journal of Hydrology: Regional Studies*. 35: 100821.
- NOAA. 2012. Climate model. Top Tens: Breakthroughs. Accessed 6/20/2013. Retrieved from http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/modeling_schematic.html.
- Rana, M. M., Adhikary, S. K., Islam, M. B. and Rahman, M. H. (2024). Assessment of future climate change over the north-west region of Bangladesh using SDSM and CanESM2 under RCP scenarios. *Arabian Journal of Geosciences*. 17(10): 280.
- Rezaei, M. , Nohtani, M. , Moghaddamnia, A. , Abkar, A. and Rezaei, M. 2014. Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Precipitation in two Arid and Hyper arid Regions. *Water and Soil*. 28(4): 836-845. doi: 10.22067/jsw.v0i0.23119
- Trzaska, S. and Schnarr, E. 2014. A review of downscaling methods for climate change projections. United States Agency for International Development by Tetra Tech ARD. 2014: 1-42.
- خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در حوضه آبریز تجن. نشریه آبیاری و زهکشی ایران. ۱۳(۳): ۶۲۶-۶۱۴.
- مطالعات شناسایی توجیهی طرح آبخیزداری تجن (حوضه آبریز سد شهید رجائی). ۱۳۳۲، شرکت خدمات مهندسی جهاد، مهندسی مشاور خزر، جلد ۱۰.
- Challa, V. and Renganathan, M. 2025. Assessment of climate change impact on meteorological variables of Indravati River Basin using SDSM and CMIP6 models. *Environmental Monitoring and Assessment*. 197(1): 1-22.
- Chen, H., Xu, C. Y. and Guo, S. 2012. Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of hydrology*. 434: 36-45.
- Department of the Environment, 1996. Review of the potential effects of climate change in the United Kingdom. HMSO, London.
- Gulacha, M. M. and Mulungu, D. M. 2017. Generation of climate change scenarios for precipitation and temperature at local scales using SDSM in Wami-Ruvu River Basin Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 62-72.
- HAN, Y., YANG, J. and DAS, L. C. 2023. Evaluation of SDSM Models for climate predictions in Bangladesh. *International Journal of Big Data Mining for Global Warming*. 5(01): 2350003.
- Haq, M. A., Ahmed, A. and Gyani, J. 2025. Intercomparison of Machine Learning and Statistical Downscaling for Climatic Parameters: A Case Study of Bhuntar, Himachal Pradesh. *Advances and Applications in Statistics*. 92(2): 191-209.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, USA
- IPCC. 2021. Summary for policymakers: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel

- development planning." *International Journal of Climatology*. 29(9): 1193-1215.
- Wilby, R.L. and Dawson, C.W. 2007. Statistical Downscaling Model (SDSM), Version 4.2. Department of Geography, Lancaster University, UK.
- Xue, L., Doan, Q. V., Kusaka, H., He, C. and Chen, F. 2025. Land-surface-physics-based downscaling versus conventional dynamical downscaling for high-resolution urban climate change information: The case study of two cities. *Urban Climate*. 59: 102228.
- Zakizadeh, H. R., Ahmadi, H., Zehtabiyani, G. R., Moeini, A. and Moghaddamnia, A. 2021. Impact of climate change on surface runoff: a case study of the Darabad River, northeast of Iran. *Journal of Water and Climate Change*. 12(1): 82-100.
- Zhou, Q., Zhong, Y., Chen, M. and Duan, W. 2023. Climate change impacts on agricultural and industrial water demands in the Beijing-Tianjin-Hebei region using statistical downscaling model (SDSM). *Water*. 15(24): 4225.
- Varis, O., Kajander, T. and Lemmelä, R. 2004. Climate and water: from climate models to water resources management and vice versa. *Climatic Change*. 66(3): 321-344.
- Wilby, R. L. and Dawson, C. W. 2007. SDSM 4.2—A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*. 22(3): 340-350.
- Wilby, R. L. and Harris, I. 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water resources research*. 42(2).
- Wilby, R. L. and Wigley, T. M. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in physical geography*. 21(4): 530-548.
- Wilby, R. L., C. W. Dawson, and E. M. Barrow. "SDSM — a Decision Support Tool for the Assessment of Regional Climate Change Impacts." *Environmental Modelling & Software*. 17: 2 (2002/01/01/ 2002): 145-57.
- Wilby, R. L., Troni, J., Biot, Y., Tedd, L., Hewitson, B. C., Smith, D. M. and Sutton, R. T. 2009. "A review of climate risk information for adaptation and

Assessment of the Impact of Climate Change on Extreme Variables of Temperature and Precipitation in the Tajan Watershed under SSP Scenarios

E. Aghaee Kahlik Bolaghi¹, R. Fazloula^{*2}, M. Masoudian³, M. Yasi⁴, M. Nadi⁵

Received: May.18, 2025

Accepted: Aug.16, 2025

Abstract

The Industrial Revolution of the 19th century, coupled with the increasing concentration of greenhouse gases, has significantly altered regional and global temperatures, precipitation regimes, and other climatic parameters. This study integrates projections from the Sixth Assessment Report (AR6) with the Statistical DownScaling Model (SDSM) to assess future temperature and precipitation patterns for two-time horizons: the near future (2025–2048) and the far future (2065–2088). Model evaluation using multiple statistical indices demonstrated high accuracy in simulating temperature, while precipitation simulations were satisfactory across all metrics except RMSE. Results indicate that the maximum temperature at Soleyman-Tangeh station will rise by 0.4–1.8°C and 0.6–1.8°C, and at Qarakheil station by 0.7–1.8°C and 0.6–1.8°C, in the near and far future, respectively. Minimum temperature at Soleyman-Tangeh is expected to increase uniformly by 0.1–1.0 °C and 0.1–1.1 °C across both periods, whereas at Qarakheil it is projected to rise by 0.5–1.5°C and 0.6–1.6°C, respectively. Under the SSP5-8.5 scenario, the largest increases in precipitation are anticipated during the cold months, potentially heightening flood risk and inducing substantial shifts in rainfall patterns. These results highlight the necessity for comprehensive water and soil resource management strategies, periodic reassessment and modernization of flood-control infrastructure, and the implementation of adaptive measures to mitigate climate-induced hazards.

Keywords: Climate change, Climate model, Qarakheil, Soleyman-Tangeh

1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering College, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering College, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

3- Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering College, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

4- Professor, Department of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University of Tehran, Karaj, Iran

5- Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Engineering College, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

(Corresponding author email: raminfazl@yahoo.com, r.fazloula@sanru.ac.ir)