

## به کارگیری روش غربالگری کمی در مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) برای ایجاد سناریوهای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: حوضه رودخانه گرگان‌رود)

- دبیا غنچه پور<sup>۱</sup>، امیر سعدالدین<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup>، آنتونی جیکمن<sup>۳</sup>، عبدالرسول سلمان ماهینی<sup>۴</sup>
۱. دانشجوی دکتری آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
۲. دانشیار گروه آبخیزداری، دانشکده مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان
۳. استاد، مرکز ارزیابی و مدیریت جامع حوضه آبخیز، دانشگاه ملی استرالیا، کانبرا، استرالیا
۴. استاد گروه محیط زیست، دانشکده شیلات و محیط زیست، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۹/۳۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۱۲/۲۵)

### چکیده

خروجی مدل‌های گردش عمومی جو به دلیل تفکیک مکانی درشت آنها، در مقیاس منطقه‌ای و محلی کاربرد ندارند و لازم است در سطح کوچک‌تر ریزمقیاس شوند. در پژوهش حاضر عملکرد مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای بارش، کمترین و بیشترین دما در حوضه رودخانه گرگان‌رود بررسی شده و به‌منظور انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، روش غربالگری کمی به کار گرفته شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل CanESM2 در مقیاس حوضه رودخانه گرگان‌رود بود. بنابراین، مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای یادشده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و برای سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰، و ۲۰۷۰-۲۱۰۰ استفاده شد. همچنین، روند تغییرات متغیرهای یادشده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۰۶ بررسی شد. براساس نتایج، مقدار بارش در ایستگاه‌های تمر، چشمه‌خان، بهلکه‌داشلی و غفارحاجی در هر سه دوره زمانی بررسی شده و تحت هر دو سناریو افزایش یافته و در مقابل، در ایستگاه‌های گرگان و ارازکوسه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، مقدار کمترین دما نیز در دوره‌های بررسی شده و تحت هر دو سناریو در ایستگاه‌های گرگان، چشمه‌خان، و ارازکوسه (به‌جز دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5) افزایش یافته و در ایستگاه‌های تمر، بهلکه‌داشلی و غفارحاجی کاهش می‌یابد. در هر سه دوره بررسی شده و تحت هر دو سناریو مقدار بیشترین دما در ایستگاه‌های گرگان، تمر، چشمه‌خان، و ارازکوسه افزایش یافته و در ایستگاه‌های کلیماتولوژی بهلکه‌داشلی و غفارحاجی کاهش می‌یابد. به طور کلی، جهت مشابهی در نوسان متغیرهای اقلیمی بررسی شده در ایستگاه‌های یادشده قابل پیش‌بینی نیست.

**کلیدواژگان:** تغییر اقلیم، حوضه رودخانه گرگان‌رود، ریزمقیاس‌نمایی، غربالگری کمی، SDSM، RCP2.6، RCP8.5.

## مقدمه

را تفسیر می‌کنند [۸]. استفاده از این مدل‌ها در مقیاس منطقه‌ای به دلیل تفکیک مکانی درشت آنها با محدودیت همراه است. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی<sup>۶</sup> به عنوان ابزاری مفید برای کاهش مشکل ناهماهنگی مقیاس‌های بین مدل‌های متصل شده<sup>۷</sup> هستند [۹]. ریزمقیاس‌نمایی به طور ساده فرایند تبدیل تفکیک مکانی درشت مربوط به خروجی GCM به یک تفکیک مکانی ریز است که می‌تواند شامل تولید داده‌های نقطه‌ای/ ایستگاهی یک منطقه مشخص با استفاده از متغیرهای اقلیمی خروجی GCM باشد [۷]. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی معمولاً به دو دسته آماری<sup>۸</sup> و دینامیکی<sup>۹</sup> تقسیم می‌شوند. در روش ریزمقیاس‌نمایی آماری یک رابطه آماری بین خروجی‌های بزرگ‌مقیاس مدل گردش عمومی<sup>۱۰</sup> و متغیرهای اقلیمی محلی برقرار می‌شود و در روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای<sup>۱۱</sup> با رزولوشن بالا که در یک GCM جای گرفته‌اند، برای به‌دست‌آوردن متغیرهای اقلیمی استفاده می‌شوند [۱۰]. در مقایسه با روش‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی که به مدل‌های محدود به سطح<sup>۱۲</sup> (LAMs) یا مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای<sup>۱۳</sup> (RCMs) نیاز دارند، روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری مانند رگرسیون خطی چندگانه، رگرسیون غیرخطی (مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی) و تولیدکننده‌های تصادفی آب و هوا روش‌های ساده‌تر و کم‌هزینه‌تری هستند [۱۱]. مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری<sup>۱۴</sup> (SDSM) که توسط ویلبی<sup>۱۵</sup> و همکارانش (۲۰۰۲) توسعه داده شد، تلفیقی از تولیدکننده تصادفی آب و هوا (SWG) و رگرسیون خطی چندگانه (MLR) است. مدل SDSM در پیش‌یابی سناریوهای انتشار مختلف کاملاً کارآمد است و در عین حال به دلیل ابزارهای رایگان در دسترس استفاده شده برای تفسیر، مانند گرفتن رویدادهای حدی، به محاسبات ساده‌ای نیاز دارد [۸]. این مدل به‌خوبی شناخته شده و به طور گسترده‌ای در مطالعه آثار تغییر اقلیم به کار گرفته شده است [۵]. در ادامه، برخی از مطالعات اخیر در این زمینه بررسی می‌شود.

مشاهدات سیستم اقلیمی، بر اندازه‌گیری‌های مستقیم و همچنین سنجش از دور توسط ماهواره‌ها و سایر سکوها مبتنی‌اند. مشاهدات بزرگ‌مقیاس از میانه قرن نوزدهم برای دما و سایر متغیرهای اقلیمی شروع شد و مجموعه‌های جامع‌تر و متنوع‌تری از مشاهدات بعد از سال ۱۹۵۰ در دسترس است. با بازسازی اقلیم قدیم، برخی داده‌های ثبت‌شده، داده‌های اقلیمی صدها تا میلیون‌ها سال قبل را نشان دادند. همه این داده‌ها با هم نگرشی جامع در زمینه تغییرپذیری و تغییرات بلندمدت در اتمسفر، اقیانوس، یخ‌کره<sup>۱</sup> و سطح زمین ارائه می‌کنند [۱]. از جمله دلایل یادشده برای این تغییرات، افزایش غلظت گاز CO<sub>2</sub> و سایر گازهای گلخانه‌ای، همراه با تشدید فعالیت‌های انسانی است که بیلان انرژی جهانی را مختل می‌کنند و همچنین موجب گرم‌شدن اتمسفر و در پی آن، افزایش دمای جهان می‌شوند [۲]. امروزه به‌رغم برخی عدم قطعیت‌ها، در زمینه اینکه زمین دستخوش چرخه‌ای از تغییر اقلیم می‌شود، اتفاق نظر وجود دارد [۳]. با توجه به اینکه تغییر اقلیم بیشتر بر اثر آشفستگی در غلظت گازهای گلخانه‌ای<sup>۲</sup> در اتمسفر به وجود می‌آید، برای برآورد آثار تغییر اقلیم در آینده، از مدل‌های اقلیمی جهانی<sup>۳</sup> برای شبیه‌سازی سیستم اقلیمی براساس سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده می‌شود [۴]. تغییر اقلیم با داشتن پیامدهای بالقوه شدید محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی یکی از چالش‌های جدی‌ای است که جامعه بین‌الملل در حال و آینده با آن مواجه می‌شود [۵]. پیش‌بینی‌های<sup>۴</sup> مدل‌های اقلیمی جهانی از اقلیم آینده تحت سناریوهای انتشار مختلف معمولاً برای توسعه استراتژی‌های کاهش و سازگار با تغییر اقلیم استفاده می‌شوند [۶]. اما مدل‌های اقلیم جهانی در مقیاس جهانی مفیدند [۷]. این مدل‌ها به طور گسترده در سطوح جهانی و قاره‌ای برای پیش‌یابی<sup>۵</sup> تغییرپذیری و تغییرات متغیرهای اقلیمی استفاده شده‌اند. این مدل‌های پیشرفته، پیچیده و عددی با نمایش فرایندهای فیزیکی در اتمسفر، اقیانوس، یخ‌کره، و سطح زمین، سیستم‌های جهانی مانند بارش، دمای اقیانوس و اتمسفر با پتانسیل ذوب برف و یخ دریا

6. Downscaling  
7. Coupled models  
8. Statistical downscaling  
9. Dynamical downscaling  
10. Global Circulation Model  
11. Regional Climate Models  
12. Limited-area Models  
13. Regional Climate Models  
14. Statistical Downscaling Model (SDSM)  
15. Wilby

1. Cryosphere  
2. Green House Gases (GHGs)  
3. Global Climate Models (GCMs)  
4. Projections  
5. Forecast

بابل<sup>۲</sup> (۲۰۱۴) تغییرات آینده کمترین و بیشترین دما در حوضه رودخانه Jhelum در پاکستان تحت سناریوهای A2 و B2 را با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM پیش‌بینی کردند [۱۳]. نتایج اعتبارسنجی قابلیت زیاد مدل در تعیین تغییرات طی دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۰۹۹ نسبت به دوره ۱۹۶۱-۱۹۹۰ را نشان داد. رضایی و همکارانش (۱۳۹۳) کارایی مدل SDSM در پیش‌بینی دمای حداقل، دمای حداکثر و دمای میانگین ایستگاه‌های سینوپتیک کرمان و بم را بررسی کردند [۱۴]. در مطالعه یادشده داده‌های مدل اقلیمی جهانی HADCM3 تحت سناریوهای A2 و B2 استفاده شد و دما برای سه دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ پیش‌بینی و با دوره پایه (۱۹۷۱-۲۰۰۱) مقایسه شدند. نتایج ارزیابی عملکرد مدل نشان داد مدل SDSM در منطقه خشک نسبت به منطقه فراخشک کارایی بیشتر و دقت قابل قبولی برای پیش‌بینی دما دارد. نتایج نشان‌دهنده افزایش دما در تمام ماه‌های سال در هر دو ایستگاه مطالعه‌شده بود.

شدت و مشخصات اثر تغییر اقلیم از یک منطقه به منطقه دیگر تفاوت‌های درخور توجهی دارد [۱۵ و ۱۶] که در بررسی‌های صورت‌گرفته نیز مشهود است. آثار منفی تغییر اقلیم در مناطق گرم و خشک که بین عرض‌های شمالی ۲۰ و ۴۰ درجه واقع شده‌اند، بیشتر است [۱۷]. به‌جز قسمت‌های کوهستانی شمال و غرب ایران، این کشور در مناطق خشک تا نیمه‌خشک جهان واقع شده است. مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران بین ۵۰ و ۶۴ درجه طول شرقی و ۳۷ درجه عرض شمالی واقع‌اند [۱۸-۲۰]. تغییر اقلیم می‌تواند تأثیر زیادی بر شرایط منابع طبیعی داشته باشد و لازم است هنگام تعیین اهداف مدیریت منابع طبیعی در سطح محلی و منطقه‌ای به این نکته توجه شود [۲۱]. بنا بر نظر دانشمندان، تغییر اقلیم بر بخش‌های محیط زیست و اجتماعی-اقتصادی و نیز بخش‌های مرتبط شامل منابع آب، کشاورزی، امنیت غذایی، سلامت انسان، اکوسیستم‌های خشکی، تنوع زیستی، و نواحی ساحلی تأثیر می‌گذارد [۴]. با توجه به پیامدهای شدید محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی تغییر اقلیم، این پدیده یکی از چالش‌های جدی‌ای است که جامعه بین‌المللی در حال و آینده با آن مواجه است [۵]. برای غلبه بر آثار تغییر اقلیم و کاهش آن،

یوسفی و همکارانش (۱۳۹۷) کارایی مدل SDSM در شبیه‌سازی بارندگی و دما در ایستگاه سینوپتیک کرج را بررسی کردند [۱۲]. نتایج پژوهش آنها نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول مدل در این زمینه بود. همچنین، براساس نتایج به‌دست آمده بارندگی و دما در ایستگاه بررسی‌شده تحت هر دو سناریوی A2 و B2 مربوط به مدل Hadcm3 نسبت به دوره پایه به‌ترتیب کاهش و افزایش داشتند. در کشور برونی در جنوب شرق آسیا، بینتی و همکارانش (۲۰۱۷) عملکرد مدل SDSM را به منظور ریزمقیاس‌کردن نتایج مدل گردش عمومی برای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر در Brunei Darussalam ارزیابی کردند [۸]. بررسی تغییرات اقلیم در آینده براساس سناریوهای مختلف و با استفاده از خروجی‌های سه مدل Hadley Centre Coupled Model (HadCM3)، Third-generation Coupled Global Climate Model (CanESM2) و Third-generation Coupled Global Climate Model (CGCM3) انجام شد. استفاده از زیرمدل ماهانه SDSM به جای زیرمدل سالانه آن، موجب بهبود نتایج به‌دست‌آمده شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، همه مدل‌ها و سناریوهای در نظر گرفته‌شده در مورد پیش‌بینی روند افزایشی دمای حداکثر، روند افزایشی دمای حداقل و روند کاهشی بارش مطابقت داشتند. گولاچا و مولانگو<sup>۱</sup> (۲۰۱۷) به‌منظور ریزمقیاس‌نمایی مدل گردش جهانی به مقیاس‌های محلی در حوضه رودخانه Wami-Ruvu واقع در جمهوری متحد تانزانیا، از مدل SDSM استفاده کردند [۴]. براساس نتایج به‌دست‌آمده در مرحله اعتبارسنجی، عملکرد مدل برای پیش‌بینی داده‌های دما بهتر از بارش بود. با استفاده از مدل واسنجی‌شده، داده‌های مدل گردش جهانی در مقیاس محلی ریزمقیاس شدند. نتایج نشان داد متوسط بارش در حوضه رودخانه Wami-Ruvu در دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ و برای سناریوی A2 به‌ترتیب تا ۴۴-۱۰۷ درصد، ۶۹-۳۲۸ درصد، و ۶۸-۶۴۸ درصد و برای سناریوی B2 تا ۳۷-۱۱۷ درصد، ۵۶-۱۹۹ درصد، و ۷۶-۳۴۶ درصد تغییر خواهد داشت. در زمینه تغییرات دما، میانگین بیشترین دمای ماهانه روندی افزایشی از ۰/۲ تا ۷/۵ درجه سانتی‌گراد طی دوره ۲۰۲۰-۲۰۸۰ خواهد داشت و در همان دوره، کمترین دما روندی افزایشی از ۰/۴- تا ۱/۵- درجه سانتی‌گراد را نشان خواهد داد. محمود و

2. Mahmood &amp; Babel

1. Gulacha &amp; Mulungu

است که در بخش جنوب شرقی دریای خزر در چین خوردگی‌های شمالی البرز با مختصات طول شرقی ۱۰° ۵۴ تا ۲۶° ۵۶ و عرض شمالی ۳۵° ۳۶ تا ۱۵° ۳۸ واقع شده است [۲۴ و ۲۵]. حوضه رودخانه گرگان‌رود به وسیله رودخانه قره‌سو در بخش جنوب غربی و گرگان‌رود در بخش شرقی و میانی زهکشی می‌شود. هر دو رودخانه بخش کوهستانی و بخش مسطح دارند [۲۵]. براساس طبقه‌بندی دومارتن، حوضه رودخانه گرگان‌رود اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و خشک دارد [۲۴]. بارندگی این حوضه از حوضه‌های ساحلی دریای خزر کمتر است و متوسط دمای آن بیشتر است. به طور کلی، شرایط اقلیمی حوضه از شمال به جنوب و از غرب به شرق تفاوت‌هایی دارد. متوسط حداکثر مطلق و حداقل مطلق دما به ترتیب ۳۶/۱ و ۶/۱- درجه سانتی‌گراد بوده [۲۵] و میانگین کمینه و بیشینه دمایی حوضه به ترتیب ۱۱ و ۱۸/۱ درجه سانتی‌گراد است [۲۶]. میانگین بارندگی حوضه آبخیز گرگان‌رود بسیار متفاوت است و میزان آن از ۲۰۲ میلی‌متر در رباط قره‌بیل تا ۹۰۳ میلی‌متر در پشته تغییر می‌کند [۲۴]. شکل ۱ موقعیت حوضه آبخیز مطالعه‌شده را در استان گلستان و کشور ایران و همچنین، موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی استفاده‌شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

#### مدل SDSM

مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM توسط ویلبی و همکارانش به عنوان ابزاری برای ریزمقیاس کردن به روش آماری توسعه یافته است [۱۴]. SDSM نوعی ابزار پشتیبان تصمیم است که با ممکن ساختن فرایند کاهش مقیاس مکانی داده‌های تهیه‌شده توسط مدل‌های اقلیمی جهانی بزرگ‌مقیاس، ارزیابی آثار منطقه‌ای گرمایش جهانی را آسان می‌کند [۹]. مبنای این مدل رگرسیون چندمتغیره است و پارامترهای اقلیمی همچون بارش و دما را در درازمدت با توجه به سیگنال‌های بزرگ‌مقیاس اقلیمی (متغیرهای NCEP) پیش‌بینی می‌کند. به دلیل اینکه در مدل ریزمقیاس آماری، ساخت داده‌های هواشناسی با استفاده از ترکیب دو روش احتمالاتی و رگرسیونی صورت می‌گیرد، بنابراین در طبقه‌بندی مدل‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی، از جمله بهترین‌هاست [۱۴].

دانستن اینکه انتظار می‌رود اقلیم در آینده چگونه تغییر کند، ضرورت دارد که به این منظور، دو متغیر بارش و دما به طور گسترده‌ای بررسی شده‌اند [۸]. با توجه به نتایج ارزیابی کارایی مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی و به‌ویژه عملکرد مناسب آن در مناطق خشک، پژوهش حاضر با هدف تهیه سناریوهای اقلیمی در دوره ۲۰۰۶-۲۱۰۰ به بررسی عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در حوضه رودخانه گرگان‌رود با استفاده از خروجی‌های مدل CanESM2 و تحت سناریوهای RCP 2.6 و RCP8.5 که به ترتیب به عنوان سناریوی کاهش شدید گازهای گلخانه‌ای و سناریوی با انتشار بسیار زیاد گازهای گلخانه‌ای [۲۲] در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم شناخته می‌شوند، می‌پردازد. در زمینه ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل‌های اقلیمی جهانی توسط مدل SDSM تحت سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای در گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم که سناریوهای مسیرهای غلظت نماینده (RCPs) خوانده می‌شوند، بررسی‌های محدودی در کشور ایران صورت گرفته است. همچنین، با توجه به اینکه مرحله انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در نتایج به‌دست آمده تأثیرگذار است و اغلب این مرحله به صورت نظری<sup>۱</sup> انجام می‌شود در پژوهش حاضر از روش غربالگری کمی ارائه‌شده توسط محمود و بابل [۲۳] به‌منظور غربالگری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برای برقراری ارتباط آماری بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده استفاده شد که در مطالعات صورت گرفته برای کشور ایران مشاهده نشد. با توجه به اینکه حوضه رودخانه گرگان‌رود اقلیم‌های مرطوب، نیمه‌مرطوب، مدیترانه‌ای، نیمه‌خشک و خشک دارد و از طرفی، بخش وسیعی از استان گلستان را پوشش می‌دهد، شناخت وضعیت تغییر اقلیم در این منطقه می‌تواند به مدیریت بهتر منابع و به‌ویژه مدیریت منابع آب کمک کند.

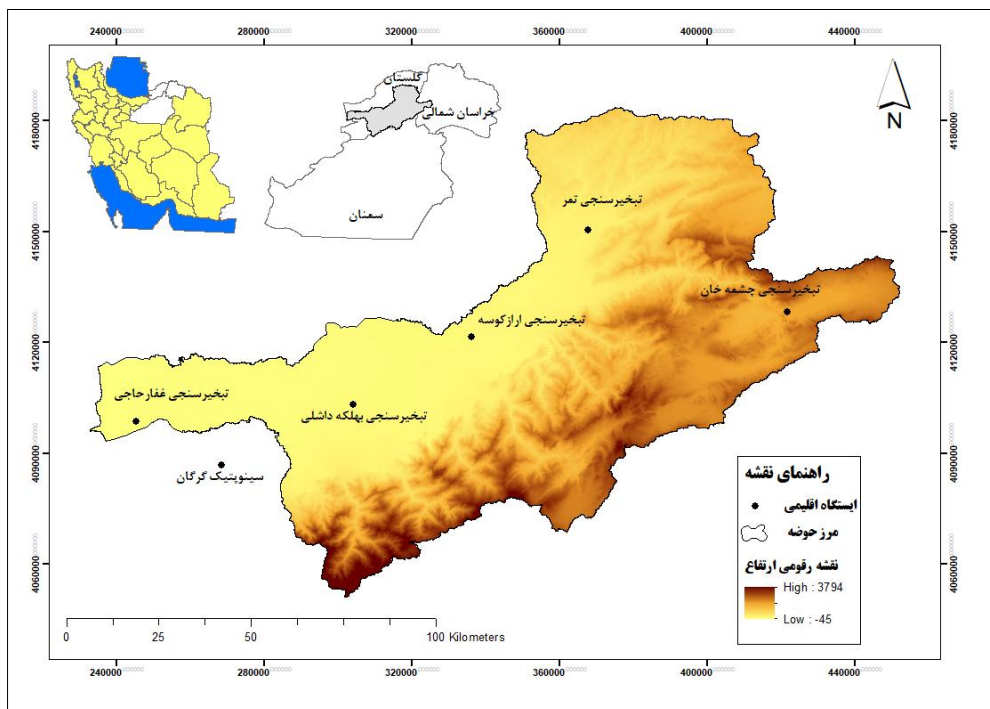
#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مطالعه‌شده

حوضه رودخانه گرگان‌رود با مساحت ۱۱۲۵۷/۲۳ کیلومتر مربع<sup>۲</sup> یکی از حوضه‌های شمال شرق کشور ایران

#### 1. Subjective

۲. مساحت یادشده براساس مرز ترسیم‌شده حوضه رودخانه گرگان‌رود با استفاده از الحاقیه HEC-GeoHMS10.4 در نرم‌افزار ArcGIS 10.4.1 به دست آمد.



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیما‌تولوژی بررسی شده در حوضه رودخانه گرگان رود

(ایستگاه سینوپتیک گرگان) و پنج ایستگاه تبخیرسنجی (ایستگاه‌های تبخیرسنجی تمر، چشمه‌خان، ارازکوسه، بهلکه‌داشلی و غفارحاجی) استفاده شد که از سازمان هواشناسی کشور و شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. انتخاب ایستگاه‌های یادشده براساس تعداد مناسب سال‌های دارای آمار و موقعیت مکانی هر ایستگاه در منطقه مطالعه شده صورت گرفت، به طوری که در تمام ایستگاه‌های استفاده شده تعداد سال‌های آماری بیش از ۳۰ سال بود. جدول ۱ اطلاعاتی درباره موقعیت مکانی ایستگاه‌های استفاده شده و تعداد سال‌های آماری ارائه می‌کند.

متغیرهای اتمسفری بزرگ‌مقیاس مراکز ملی پیش‌بینی محیطی (NCEP) و مرکز ملی پژوهش اتمسفری (NCAR) برای ایجاد ارتباط آماری با داده‌های ایستگاهی مشاهداتی استفاده شدند که این مجموعه شامل ۲۶ متغیر است. اجرای مدل SDSM در مطالعه حاضر طی مراحل: ۱. انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده؛ ۲. واسنجی و اعتبارسنجی؛ ۳. ارزیابی عملکرد مدل؛ ۴. تهیه سناریوهای اقلیمی به ازای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و ۵. اصلاح ارزیابی انجام شد که در ادامه با تفصیل بیشتر به آن پرداخته می‌شود.

#### کاربرد مدل SDSM در حوضه رودخانه گرگان رود

در پژوهش حاضر برای ریزمقیاس‌نمایی آماری از نرم‌افزار SDSM4.2 استفاده شد. داده‌های استفاده شده برای ارزیابی داده‌های اتمسفری بزرگ‌مقیاس شامل داده‌های باز تحلیل روزانه NCEP<sup>۱</sup> مربوط به مدل گردش عمومی با نام مدل سیستم زمین کانادا<sup>۲</sup> (CanESM2) می‌شود که توسط مرکز کانادایی برای مدل‌سازی و تحلیل اقلیم (CCCma) محیط زیست کانادا<sup>۳</sup> توسعه یافته است. خروجی‌های CanESM2 برای سناریوهای مسیر غلظت گازهای گلخانه‌ای<sup>۴</sup> (RCP) شامل RCP2.6، RCP4.5، و RCP8.5 از طریق وبسایت <http://climate-scenarios.canada.ca/?page=pred-canesm2> تهیه شده. برای تهیه سناریوهای اقلیمی در حوضه رودخانه گرگان رود از داده‌های مربوط به دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 به عنوان سناریوی کاهش شدید گازهای گلخانه‌ای (سناریوی خوش‌بینانه) و سناریوی با انتشار بسیار زیاد گازهای گلخانه‌ای (سناریوی بدبینانه) استفاده شد. برای ریزمقیاس‌نمایی در پژوهش حاضر، متغیرهای بارش، دمای حداقل و دمای حداکثر مربوط به یک ایستگاه سینوپتیک

1. National Centre for Environmental Prediction
2. Canadian Earth System Model (CanESM2)
3. Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CCCma) of Environment Canada
4. Representative Concentration Pathway

جدول ۱. ایستگاه‌های اقلیمی استفاده شده در پژوهش

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	دوره زمانی داده			درصد داده مفقوده	
			بارش	کمترین دما	بیشترین دما	کمترین دما	بیشترین دما
سینوپتیک گرگان	۵۴° ۲۳' ۵۰" / ۱۴	۳۶° ۵۳' ۵۰" / ۶	۲۰۰۵-۱۹۶۱	۲۰۰۵-۱۹۶۱	۲۰۰۵-۱۹۶۱	۰/۰۰	۳/۴۵
تبخیرسنجی نمر	۵۵° ۲۹' ۵۵" / ۸۱	۳۷° ۲۹' ۵۱" / ۷۵۲	۲۰۰۵-۱۹۶۶	۲۰۰۵-۱۹۶۷	۲۰۰۵-۱۹۶۷	۰/۰۰	۴/۸
تبخیرسنجی چشمه خان	۵۶° ۰۷' ۳۶"	۳۷° ۱۸' ۱۵" / ۲۲	۲۰۰۵-۱۹۷۴	۲۰۰۵-۱۹۷۴	۲۰۰۵-۱۹۷۴	۰/۰۰	۰/۰۲۶
تبخیرسنجی آرازکوسه	۵۵° ۰۹' ۴۱" / ۰۳	۳۷° ۱۷' ۱۸" / ۰۸	۲۰۰۵-۱۹۶۷	۲۰۰۵-۱۹۶۷	۲۰۰۵-۱۹۶۷	۰/۰۰	۲/۸۵
تبخیرسنجی بهلکه داشلی	۵۴° ۴۷' ۳۶" / ۴۱	۳۷° ۰۲' ۲۶" / ۷	۲۰۰۵-۱۹۷۱	۲۰۰۵-۱۹۷۱	۲۰۰۵-۱۹۷۱	۰/۰۰	۱/۴
تبخیرسنجی غفارحاجی	۵۴° ۰۸' ۴۷"	۳۶° ۵۹' ۵۴" / ۷	۲۰۰۵-۱۹۷۳	۲۰۰۵-۱۹۶۶	۲۰۰۵-۱۹۶۶	۰/۰۰	۰/۰۰۷

۱. انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده

انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده مهم‌ترین گام در مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری است. خروجی بهتر SDSM به انتخاب متغیرهای پیش‌بینی کننده مناسب هنگام ایجاد رابطه پیش‌بینی کننده-پیش‌بینی شونده بستگی دارد، زیرا انتخاب پیش‌بینی کننده‌ها ویژگی سناریوی اقلیمی ریزمقیاس‌شده را تعیین می‌کند [۲۷]. سربرگ «غربال متغیرها»<sup>۱</sup> در مدل SDSM ابزاری برای انتخاب متغیرهای مناسب است. به منظور غربالگری متغیرهای استفاده شده برای ساخت مدل پیش‌بینی از روش کمی غربالگری ارائه شده توسط محمود و بابل (۲۰۱۳) استفاده شد که مراحل کار به شرح زیر است [۲۳]:

۱. ابتدا ماتریس همبستگی بین ۲۶ پیش‌بینی کننده NCEP و پیش‌بینی شونده (متغیر اقلیمی) ایجاد می‌شود و پیش‌بینی کننده‌های دارای ضریب همبستگی زیاد از میان ۲۶ متغیر انتخاب شده و به صورت نزولی مرتب می‌شوند. متغیر دارای رتبه اول که بیشترین ضریب همبستگی در بین متغیرها را دارد، انتخاب شده و به عنوان پیش‌بینی کننده برتر (Super Predictor) شناخته می‌شود.

۲. سپس، قدر مطلق ضریب همبستگی بین هر پیش‌بینی کننده، قدر مطلق همبستگی جزئی و مقدار P با رگرسیون گیری پیش‌بینی کننده‌های دارای همبستگی زیاد باقی‌مانده در حضور پیش‌بینی کننده برتر به دست می‌آیند.

۳. سپس، پیش‌بینی کننده‌هایی که مقدار P بزرگتر از

$\alpha$  (۰/۰۵) دارند، حذف می‌شوند تا نتایج از نظر آماری معنادار باشند و پیش‌بینی کننده‌هایی که همبستگی زیادی دارند (۰/۵ در اینجا) کنار گذاشته می‌شوند تا هر گونه هم‌خطی چندگانه حذف شود. ضریب همبستگی تا ۰/۷ بین دو پیش‌بینی کننده قابل قبول است.

۴. قدر مطلق درصد کاهش همبستگی جزئی (PRP) با توجه به قدر مطلق همبستگی برای هر پیش‌بینی کننده طبق معادله ۱ محاسبه می‌شود:

$$prp = \left( \frac{PR - R_1}{R_1} \right) \quad (1)$$

که در آن  $prp$  درصد کاهش همبستگی جزئی با توجه به ضریب همبستگی،  $PR$  همبستگی جزئی و  $R_1$  ضریب همبستگی بین پیش‌بینی کننده و پیش‌بینی شونده است.

۵. پیش‌بینی کننده‌ای که کمترین  $prp$  را دارد، به عنوان دومین پیش‌بینی کننده مناسب انتخاب می‌شود. در نتیجه، این پیش‌بینی کننده تقریباً هیچ یا یک هم‌خطی چندگانه بسیار معنادار با پیش‌بینی کننده برتر دارد.

۶. پیش‌بینی کننده‌های سوم، چهارم و... می‌توانند با تکرار گام‌های ۲ تا ۵ به دست آیند. در دومین تکرار، دو پیش‌بینی کننده برتر وجود خواهد داشت. ملاحظه می‌شود که اغلب یک تا سه پیش‌بینی کننده برای توضیح پیش‌بینی شونده طی واسنجی و بدون هم‌خطی چندگانه کافی است.

1. Screen variables



۲. واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از انتخاب متغیرهای پیش‌بینی‌کننده، مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل SDSM انجام شد. به این منظور، داده‌های دوره پایه به دو بخش تقسیم شد، به طوری که ۷۰ درصد از داده‌ها برای مرحله واسنجی و ۳۰ درصد از داده‌ها برای مرحله اعتبارسنجی مدل در نظر گرفته شدند. زیرمدل غیرشرطی بدون هیچ‌گونه تغییری برای کمترین و بیشترین دما به کار برده شد، در حالی که زیرمدل شرطی با تبدیل به ریشه چهارم برای بارش استفاده شد [۸]. مرحله واسنجی پیش‌بینی‌شونده‌های خاصی را با مجموعه‌ای از متغیرهای پیش‌بینی‌کننده در نظر می‌گیرد و پارامترهایی را برای معادلات رگرسیونی چندگانه از طریق الگوریتم بهینه‌سازی محاسبه می‌کند. به طور کلی، برای تعیین پارامترهای مدل، مرحله اعتبارسنجی بسیار مهم است، زیرا به مدل این امکان را می‌دهد که بهترین انطباق بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های ایجادشده توسط مدل را در ایستگاه مد نظر توسعه دهد [۴]. پس از واسنجی، اعتبارسنجی انجام می‌شود. سربرگ تولید آب و هوا (Weather generator) برای تولید داده‌های روزانه مصنوعی بارش، کمترین دما و بیشترین دما برای دوره تاریخی با استفاده از خروجی مرحله واسنجی و متغیرهای اتمسفری بازتحلیل NCEP مشاهداتی استفاده می‌شود. از این طریق امکان مقایسه بین مقادیر مشاهداتی و

خروجی‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل به وجود می‌آید که در پژوهش حاضر مقایسه مقادیر مشاهداتی و مقادیر ایجادشده توسط مدل از طریق معیارهای ارزیابی بصری و کمی که در ادامه گفته می‌شود، انجام شد.

۳. ارزیابی عملکرد مدل SDSM

ارزیابی بصری یا چشمی با استفاده از ترسیم نمودار ستونی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در کنار یکدیگر و نیز ترسیم نمودار پراکنش مقادیر مشاهداتی در مقابل مقادیر شبیه‌سازی‌شده که حول خط تطابق کامل ۱:۱ ترسیم می‌شود، انجام شد. همچنین، ارزیابی کمی عملکرد مدل برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی با استفاده از معیارهای ارزیابی کمی شامل ضریب همبستگی، ضریب تبیین، میانگین انحراف مطلق، میانگین خطای استاندارد، ریشه میانگین مربعات خطا، و نش-ساتکلیف بررسی شد.

ضریب همبستگی پیرسون (r) و ضریب تبیین (R<sup>2</sup>) میزان همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و اندازه‌گیری‌شده را نشان می‌دهند. ضریب همبستگی که از ۱- تا ۱+ تغییر می‌کند، شاخصی برای میزان رابطه خطی بین داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی است. در صورتی که r باشد، هیچ ارتباط خطی‌ای وجود ندارد. اگر r برابر یا ۱+ یا ۱- باشد، یک رابطه خطی کاملاً مثبت یا منفی

جدول ۲. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SDSM استفاده‌شده در پژوهش حاضر

ردیف	نام فارسی معیار عملکرد	نام انگلیسی معیار عملکرد	نماد	فرمول
۱	ضریب همبستگی	correlation coefficient	r	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$
۲	ضریب تبیین	Coefficient of determination	R <sup>2</sup>	$\left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\left[ \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \left[ \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}^2$
۳	میانگین انحراف مطلق	Mean Absolute Deviation	MAD	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  O_i - S_i $
۴	میانگین خطای استاندارد	Mean Standard Error	MSE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  S_i - O_i ^2$
۵	ریشه میانگین مربعات خطا	Root Mean Squair Error	RMSE	$\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  S_i - O_i ^2 \right]^{\frac{1}{2}}$
۶	نش-ساتکلیف	Nash-Sutcliffe	NS	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$

نماد O نشان‌دهنده مقادیر مشاهداتی (Observed) و نماد S نشان‌دهنده مقادیر شبیه‌سازی‌شده (Simulated) است.

در نظر گرفته شد. علاوه بر این، در نظر گرفتن دو سناریوی RCP نیز در جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت است.

#### ۵. اصلاح اریبی

بسیاری از مدل‌های گردش عمومی برآورد رو به پایین یا برآورد رو به بالا از مقادیر بارش، کمترین دما و بیشترین دما دارند. اصلاح اریبی برای کاهش اریبی‌ها از سری‌های زمانی روزانه داده‌های ریزمقیاس شده است. در روش اصلاح اریبی استفاده شده در پژوهش حاضر، اریبی‌ها با کم کردن (در مورد دما) میانگین بلندمدت ماهانه داده‌های مشاهده‌ای از میانگین ماهانه داده‌های کنترل شبیه‌سازی شده (داده‌های ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM) و تقسیم (در مورد بارش) میانگین بلندمدت ماهانه داده‌های مشاهده‌ای بر داده‌های کنترل مشاهده‌ای به دست می‌آید. سپس، اریبی‌های سری‌های زمانی روزانه ریزمقیاس شده آینده طبق ماه مربوط به آن اصلاح می‌شوند. معادلات ۲ و ۳ برای اصلاح اریبی داده‌های دما و بارش استفاده می‌شوند [۲۳].

$$T_{deb} = T_{SCEN} - \left( \overline{T_{CONT}} - \overline{T_{obs}} \right) \quad (2)$$

$$P_{deb} = P_{SCEN} \times \left( \frac{\overline{P_{obs}}}{\overline{P_{CONT}}} \right) \quad (3)$$

که در آن  $T_{deb}$  و  $P_{deb}$  به ترتیب سری‌های زمانی روزانه اصلاح شده از لحاظ اریبی (تصحیح شده) دما و بارش برای دوره آینده است.  $SCEN$  داده‌های سناریوی ریزمقیاس شده توسط مدل SDSM برای دوره آینده و  $CONT$  داده‌های ریزمقیاس شده توسط SDSM برای دوره حاضر را نشان می‌دهد.  $T_{SCEN}$  و  $P_{SCEN}$  به ترتیب سری‌های زمانی روزانه دما و بارش تولید شده توسط مدل SDSM برای دوره آینده است.  $\overline{T_{CONT}}$  و  $\overline{P_{CONT}}$  به ترتیب مقادیر میانگین ماهانه بلندمدت دما و بارش برای دوره کنترل شبیه‌سازی شده توسط مدل SDSM هستند.  $\overline{T_{obs}}$  و  $\overline{P_{obs}}$  به ترتیب مقادیر میانگین ماهانه بلندمدت مشاهده‌ای برای دما و بارش را نشان می‌دهند [۲۳].

#### یافته‌ها

شکل‌های ۲-۴ به ترتیب اعتبارسنجی نتایج مدل SDSM برای بارش، کمترین دما و بیشترین دما را نشان می‌دهند که این ارزیابی براساس مقایسه میانگین ماهانه بلندمدت داده‌های روزانه مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده از طریق ترسیم نمودار ستونی و نیز ترسیم نمودار پراکنش مقادیر مشاهده‌ای در مقابل مقادیر شبیه‌سازی شده حول خط تطابق کامل ۱:۱ صورت

وجود دارد [۲۸]. ضریب تبیین ( $R^2$ ) به عنوان مربع نسبت بین کوواریانس و ضرب انحراف استاندارد‌های مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، بیان می‌شود. دامنه تغییرات  $R^2$  نیز بین صفر و ۱ است [۲۹]. میانگین انحراف مطلق (MAD) میانگین انحرافات تمام مقادیر از میانگین بدون توجه به علامت آنهاست [۳۰]. برای محاسبه میانگین خطای استاندارد (MSE) ابتدا خطای مربع کل با جمع زدن هر خطای مربع به دست می‌آید. یعنی هر خطا به نسبت مربع خود در خطای کل تأثیر می‌گذارد نه با مقدار خود. در نتیجه، خطاهای بزرگ‌تر نسبت به خطاهای کوچک‌تر تأثیر نسبتاً بیشتری بر خطای مربع کل دارند. سپس، خطای مربع کل بر تعداد تقسیم شده و میانگین مربعات خطا (MSE) به دست می‌آید، ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) با گرفتن ریشه دوم از میانگین مربعات خطا به دست می‌آید [۳۱]. دامنه ضریب نش بین منفی بی‌نهایت تا ۱ تغییر می‌کند. ضریب کارایی برابر ۱ یعنی داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی کاملاً با هم یکی هستند. ضریب کارایی صفر نشان می‌دهد پیش‌بینی‌های مدل به طور دقیق معادل با میانگین داده‌های مشاهده‌ای است. ضریب کارایی کوچک‌تر از صفر نشان می‌دهد مقدار میانگین سری‌های زمانی پیشگوی بهتری نسبت به مدل بوده است. هر چقدر ضریب نش-ساتکلیف به ۱ نزدیک‌تر باشد، مدل دقیق‌تر است [۲۹]. این معیار ارزیابی بیشتر برای ارزیابی نیکویی برازش مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده می‌شود [۳۲].

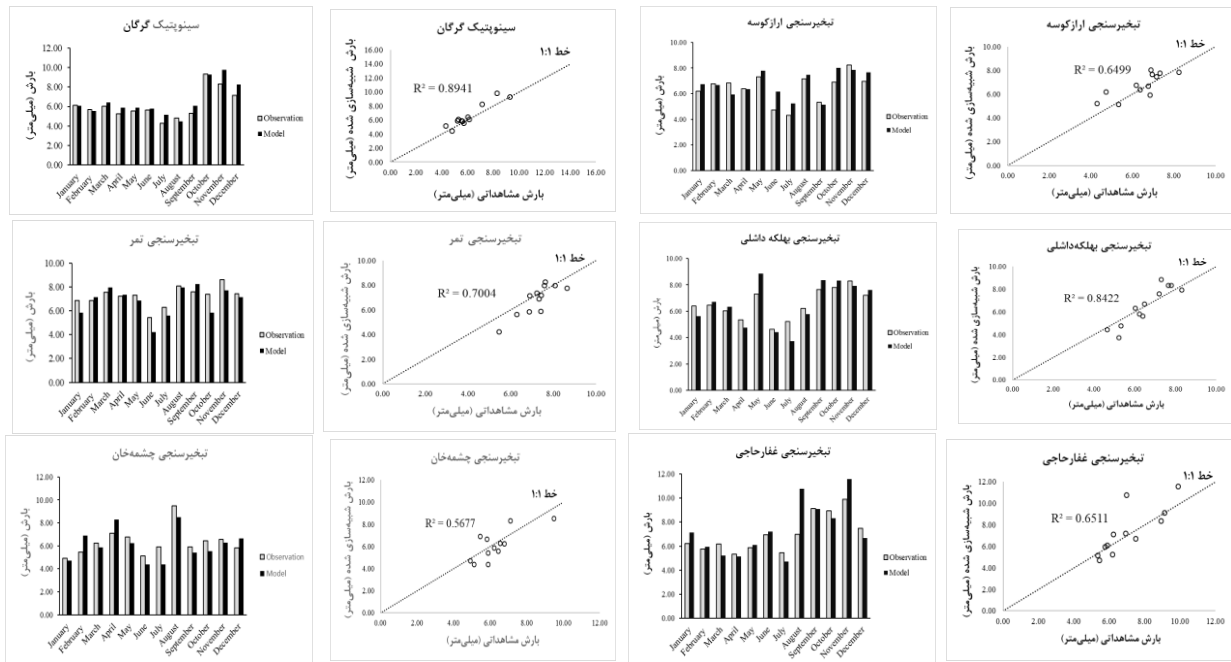
#### ۴. ریزمقیاس‌نمایی برای سناریوهای انتشار آینده RCP2.6 و RCP8.5 و پیش‌بینی اقلیم

سربرگ تولید سناریو (Scenario Generator) مانند سربرگ تولید آب و هواست، زیرا هر دو داده‌های مصنوعی را ایجاد می‌کنند [۴]. به این منظور، از مدل واسنجی شده SDSM استفاده شد و در مرحله معرفی پارامترها، پارامترهای تعیین شده در مرحله واسنجی به مدل معرفی شد. به منظور ایجاد سناریوهای تغییر اقلیم از سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 مدل CanESM2 استفاده شد که به ترتیب نشان‌دهنده سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه هستند. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت، به ازای هر متغیر اقلیمی بررسی شده در پژوهش حاضر که شامل بارش، کمترین دما و بیشترین دماست، ۲۰ مجموعه داده تولید شده و میانگین آنها

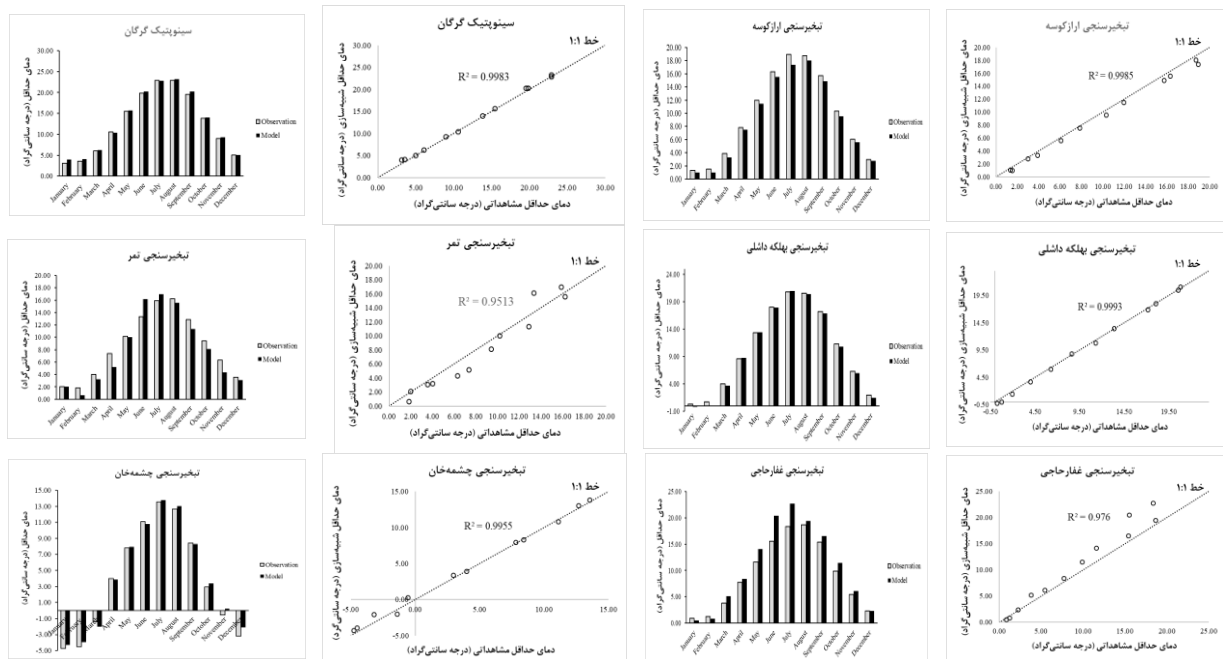


سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به صورت کمی و جدول ۵ تغییرات میانگین بارش کمترین دما و بیشترین دما در دوره نزدیک (۲۰۰۶-۲۰۴۰)، دوره میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و دوره دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) به ازای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به صورت کیفی را نشان می‌دهند.

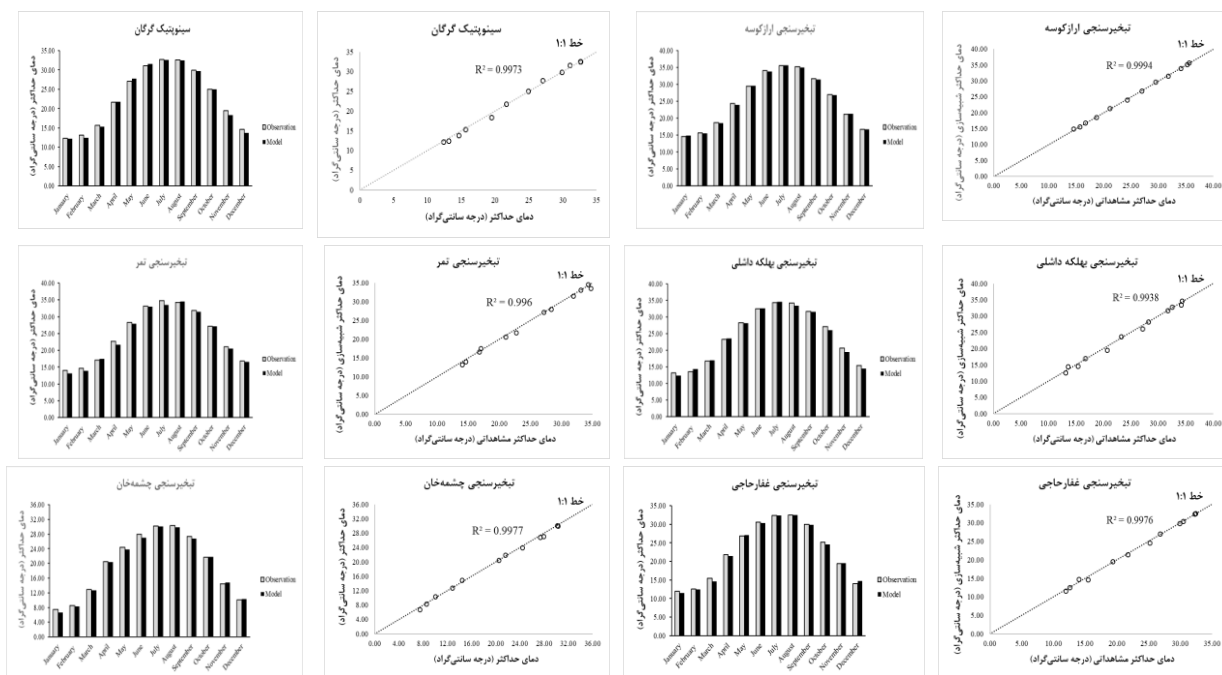
می‌گیرد. مقادیر مربوط به معیارهای کمی ارزیابی عملکرد مدل استفاده‌شده در پژوهش حاضر در جدول ۳ ارائه شده است. جدول ۴ تغییرات میانگین بارش، کمترین دما و بیشترین دما در دوره نزدیک (۲۰۰۶-۲۰۴۰)، دوره میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰)، و دوره دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) به ازای



شکل ۲. اعتبارسنجی نتایج مدل SDSM برای بارش



شکل ۳. اعتبارسنجی نتایج مدل SDSM برای کمترین دما



شکل ۴. اعتبارسنجی نتایج مدل SDSM برای بیشترین دما

جدول ۳. معیارهای ارزیابی عملکرد مدل SDSM برای پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در حوضه رودخانه گرگان‌رود

معیار ارزیابی						ایستگاه
NS	RMSE	MSE	MAD	R <sup>2</sup>	r	
<b>متغیر اقلیمی بارش</b>						
۰/۷۶	۰/۹۳	۰/۴۶	۰/۵۲	۰/۸۹	۰/۹۴	سینوپتیک گرگان
۰/۰۴	۰/۷۷	۰/۵۹	۰/۶۳۳	۰/۷۰	۰/۸۴	کلیما‌تولوژی تمر
۰/۳۸	۰/۹	۰/۸	۰/۷۹	۰/۵۷	۰/۷۵	کلیما‌تولوژی چشمه‌خان
۰/۵۵	۰/۷۳	۰/۵۲	۰/۵۹	۰/۶۵	۰/۸۱	کلیما‌تولوژی آرازکوسه
۰/۵	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۶۳	۰/۸۴۲	۰/۹۲	کلیما‌تولوژی بهلکه‌دانشلی
۰/۲۱	۱/۳۱	۱/۷۲	۰/۸۶	۰/۶۵	۰/۸۱	کلیما‌تولوژی غفارحاجی
<b>متغیر اقلیمی کمترین دما</b>						
۰/۹۹۷	۰/۴	۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	سینوپتیک گرگان
۰/۹۱۶	۱/۴۳	۲/۰۷	۱/۱۹	۰/۹۵	۰/۹۷	کلیما‌تولوژی تمر
۰/۹۹۳	۰/۵۲	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	کلیما‌تولوژی چشمه‌خان
۰/۹۸۷	۰/۷۲	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	کلیما‌تولوژی آرازکوسه
۰/۹۹۷	۰/۳۶	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۵	کلیما‌تولوژی بهلکه‌دانشلی
۰/۸۸	۲/۱۷	۴/۷	۱/۵۶	۰/۹۷۶	۰/۹۸۸	کلیما‌تولوژی غفارحاجی
<b>متغیر اقلیمی بیشترین دما</b>						
۰/۹۹۷	۰/۴	۰/۱۶	۰/۳۳	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	سینوپتیک گرگان
۰/۹۱۶	۱/۴۳	۲/۰۷	۱/۱۹	۰/۹۵	۰/۹۷	کلیما‌تولوژی تمر
۰/۹۹۳	۰/۵۲	۰/۲۷	۰/۴۳	۰/۹۹۵	۰/۹۹۷	کلیما‌تولوژی چشمه‌خان
۰/۹۸۷	۰/۷۲	۰/۵۲	۰/۶۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	کلیما‌تولوژی آرازکوسه
۰/۹۹۷	۰/۳۶	۰/۱۳	۰/۳۱	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹۵	کلیما‌تولوژی بهلکه‌دانشلی
۰/۸۸	۲/۱۷	۴/۷	۱/۵۶	۰/۹۷۶	۰/۹۸۸	کلیما‌تولوژی غفارحاجی

جدول ۴. تغییرات میانگین بارش، کمترین دما، و بیشترین دما در دوره نزدیک (۲۰۰۶-۲۰۴۰)، دوره میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و دوره دور (۲۰۷۱-۲۱۰۰) به ازای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به صورت کمی

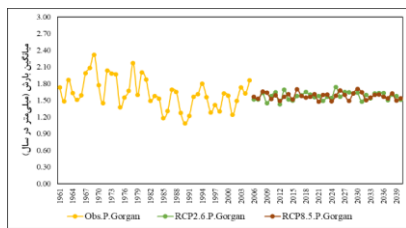
میانگین در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰		میانگین در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰				میانگین در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰				میانگین در دوره تاریخی	نام ایستگاه		
RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5		RCP2.6		RCP8.5				RCP2.6	
قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی	قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی	قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی	قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی	قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی			قبل از اصلاح ارضی	بعد از اصلاح ارضی
<b>متغیر اقلیمی بارش</b>													
۱/۵۷۳	۱/۶۵۱	۱/۶	۱/۶۸	۱/۵۸	۱/۶۶۵	۱/۵۵۴	۱/۶۸	۱/۵۷۶	۱/۶۷۰	۱/۵۷۸	۱/۶۷۲	۱/۶۸	سینوپتیک گرگان
۱/۳۲۵	۱/۱۶۹	۱/۳۲۳	۱/۱۶۱	۱/۳۳۹	۱/۱۸	۱/۳۵۷	۱/۱۹۳	۱/۳۶۵	۱/۱۹۷	۱/۳۴۷	۱/۱۸۴	۱/۲۹	کلیما تولوژی تمر
۰/۶۹۳	۰/۶۶۹	۰/۶۹۴	۰/۶۷۲	۰/۶۹۵	۰/۶۶۴	۰/۶۹۹	۰/۶۶۷	۰/۷۱	۰/۶۶۶	۰/۷	۰/۶۶	۰/۶۸	کلیما تولوژی چشمه خان
۱/۱۵۲	۱/۱۶	۱/۱۵۳	۱/۱۶۱	۱/۱۴۹	۱/۱۵۷	۱/۱۴۹	۱/۱۵۸	۱/۰۹۳	۱/۱۷۳	۱/۱۴۸	۱/۱۵۵	۱/۲۴	کلیما تولوژی آراز کوسه
۱/۳۱۸	۱/۱۳۹	۱/۴۳۷	۱/۳۳۸	۱/۵۴۹	۱/۳۲۵	۱/۴۹۱	۱/۳۷۶	۱/۵۵۲	۱/۳۴۵	۱/۵۵۶	۱/۳۴۴	۱/۲۱	کلیما تولوژی بهلکه داشلی
۱/۲۸۵	۱/۲۵۲	۱/۲۶۸	۱/۳۳۵	۱/۲۶	۱/۳۳۷	۱/۲۴۱	۱/۲۱۳	۱/۲۹۱	۱/۲۶	۱/۲۷۹	۱/۲۴۶	۱/۲۵	کلیما تولوژی غفار حاجی
<b>متغیر اقلیمی کمترین دما</b>													
۱۶/۳۸۸	۱۶/۰۵۳	۱۴/۳۶۱	۱۴/۰۲۷	۱۵/۲۲۹	۱۴/۸۹۲	۱۴/۳۹۴	۱۴/۰۵۷	۱۴/۰۹۲	۱۳/۷۶۱	۱۴/۰۷۳	۱۳/۷۴۲	۱۲/۸	سینوپتیک گرگان
۷/۹۷۸	۶/۲۲۷	۵/۹۰۰	۴/۱۴۹	۶/۱۵۹	۴/۴۱۲	۶/۵۰۴	۴/۷۵۷	۶/۲۴۸	۴/۴۹	۵/۵۳۶	۳/۷۷۸	۸/۶۴	کلیما تولوژی تمر
۴/۰۳۱	۳/۶۶۶	۳/۹۳۱	۳/۵۶۶	۳/۹۴۸	۳/۵۸۵	۴/۰۱	۳/۶۴۷	۳/۸۸۴	۳/۵۱۶	۴/۰۱۳	۳/۶۴۵	۳/۸۵	کلیما تولوژی چشمه خان
۹/۶۱	۸/۷۰۵	۹/۷۲	۸/۸۰۸	۹/۶۸۴	۸/۷۷۹	۹/۷۲۵	۸/۸۱۲	۹/۷۱۵	۸/۸۰۲	۹/۷۱۷	۸/۸۰۴	۹/۶۴	کلیما تولوژی آراز کوسه
۹/۵۵۹	۹/۲۸	۹/۹۹۸	۹/۷۲	۹/۸۳۵	۹/۵۷۸	۱۰/۰۲	۹/۷۴۲	۱۰/۰۱	۹/۷۳۲	۱۰/۰۲۶	۹/۷۴۷	۱۰/۱۹	کلیما تولوژی بهلکه داشلی
۹/۲۲	۷/۱۵	۸/۵۷	۶/۵۰۵	۸/۳۸۵	۶/۳۲۲	۸/۱۹۴	۶/۱۳۱	۸/۲۷۷	۶/۴۹۶	۷/۹۷۱	۵/۸۹۹	۹/۳۲	کلیما تولوژی غفار حاجی
<b>متغیر اقلیمی بیشترین دما</b>													
۲۵/۴۱۸	۲۳/۶۱۶	۲۴/۱۲۷	۲۲/۳۲۵	۲۴/۶۸۶	۲۲/۸۸۱	۲۴/۱۵۱	۲۲/۳۴۷	۲۳/۹۰۰	۲۲/۱۰۰	۲۳/۹۰۰	۲۲/۱۰۲	۲۳/۰۳	سینوپتیک گرگان
۲۵/۱۰۱	۲۵/۴۰۲	۲۴/۸۹۱	۲۵/۱۹۱	۲۴/۹۴۱	۲۵/۲۴۱	۲۴/۷۴۶	۲۵/۰۴۵	۲۴/۸۳۳	۲۵/۱۳۴	۲۴/۷۹۶	۲۵/۰۹۸	۲۴/۷۳	کلیما تولوژی تمر
۲۵/۲۹۲	۲۵/۴۰۲	۲۵/۰۸۱	۲۵/۱۹۱	۲۵/۱۳	۲۵/۲۴۱	۲۴/۹۳۵	۲۵/۰۴۵	۲۵/۰۲۶	۲۵/۱۳۴	۲۴/۹۹	۲۵/۰۹۸	۱۹/۶۷	کلیما تولوژی چشمه خان
۲۵/۴۴	۲۵/۳۸	۲۵/۴۸	۲۵/۴۲	۲۵/۴۷	۲۵/۴۱	۲۵/۴۸	۲۵/۴۲	۲۵/۴۹۱	۲۵/۴۲۷	۲۵/۴۸۴	۲۵/۴۲۴	۲۵/۳۶	کلیما تولوژی آراز کوسه
۲۳/۶۵	۲۳/۳۸	۲۴/۱۲	۲۳/۸۵	۲۳/۸۶۹	۲۳/۶۵۹	۲۴/۱۴۵	۲۳/۸۶۹	۲۴/۱۰۵	۲۳/۸۳۲	۲۴/۱۰۰	۲۳/۸۲۷	۲۴/۱۹	کلیما تولوژی بهلکه داشلی
۲۲/۳۱۶	۲۲/۲۰۴	۲۲/۶۶	۲۲/۵۵	۲۲/۴۶۸	۲۲/۳۵۶	۲۲/۶۴۲	۲۲/۵۳	۲۲/۶۷۳	۲۲/۵۶۱	۲۲/۶۴۸	۲۲/۵۴۹	۲۲/۸۱	کلیما تولوژی غفار حاجی

شکل ۵ روند تغییرات بارش، کمترین دما و بیشترین دما در دوره تاریخی و دوره ۲۰۴۱-۲۰۰۶ تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه رودخانه گرگان رود را نشان می‌دهد.

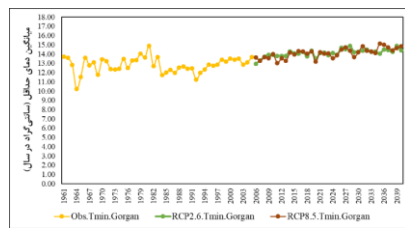
جدول ۵ تغییرات میانگین بارش، کمترین دما و بیشترین دما در هر سه دوره بررسی شده را نشان می‌دهد. در جدول ۵ سلول‌هایی که نشان‌دهنده کاهش مقدار متغیر اقلیمی در دوره آینده هستند با رنگ تیره‌تر نمایش داده شده‌اند.

جدول ۵. تغییرات میانگین متغیرها در سه دوره مطالعه شده و به ازای سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به صورت کیفی

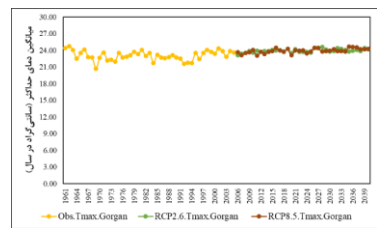
میانگین در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰		میانگین در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰		میانگین در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰		نام ایستگاه
RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	RCP8.5	RCP2.6	
<b>متغیر اقلیمی بارش</b>						
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	سینوپتیک گرگان
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی تمر
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی چشمه خان
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی اراز کوسه
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی بهلکه داشلی
افزایش	افزایش	افزایش	کاهش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی غفار حاجی
<b>متغیر اقلیمی کمترین دما</b>						
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	سینوپتیک گرگان
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی تمر
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی چشمه خان
کاهش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی اراز کوسه
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی بهلکه داشلی
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی غفار حاجی
<b>متغیر اقلیمی بیشترین دما</b>						
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	سینوپتیک گرگان
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی تمر
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی چشمه خان
افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	افزایش	کلیماتولوژی اراز کوسه
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی بهلکه داشلی
کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کاهش	کلیماتولوژی غفار حاجی



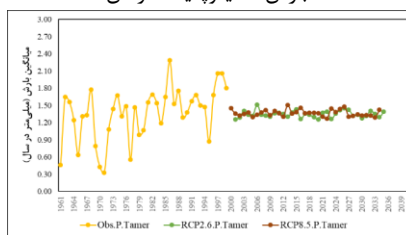
بارش - سینوپتیک گرگان



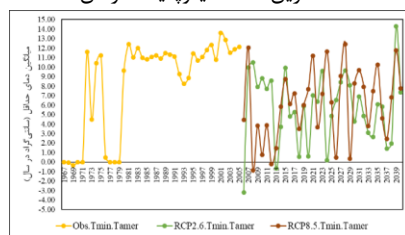
کمترین دما - سینوپتیک گرگان



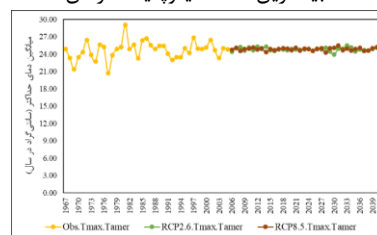
بیشترین دما - سینوپتیک گرگان



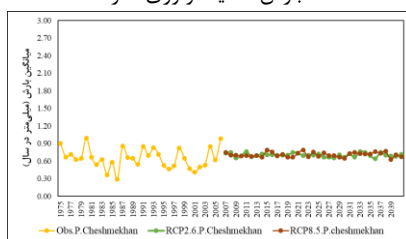
بارش - کلیماتولوژی تمر



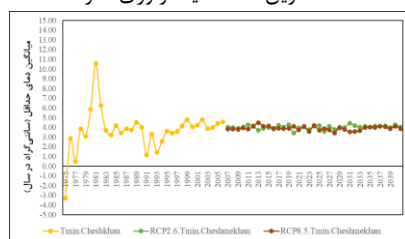
کمترین دما - کلیماتولوژی تمر



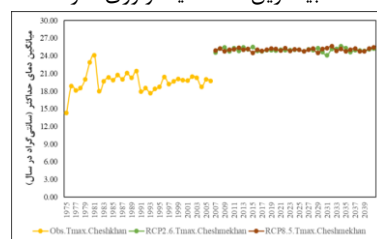
بیشترین دما - کلیماتولوژی تمر



بارش - کلیماتولوژی چشمه خان



کمترین دما - کلیماتولوژی چشمه خان



بیشترین دما - کلیماتولوژی چشمه خان

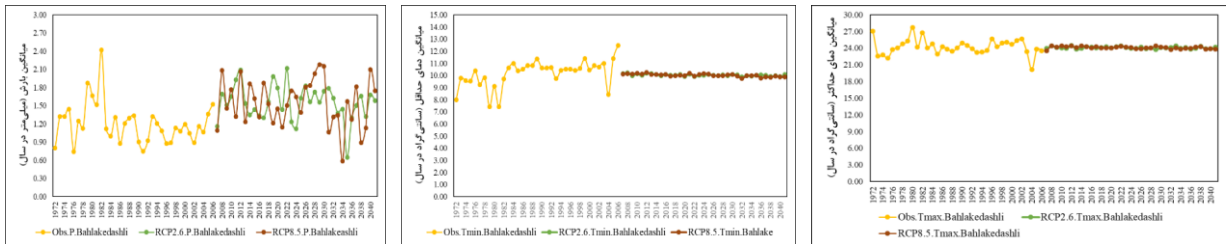
شکل ۵. روند تغییرات بارش، کمترین دما و بیشترین دما در دوره تاریخی و دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۱ تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه رودخانه گرگان رود



بارش - کليما تولوژی ارازکوسه

کمترین دما - کليما تولوژی ارازکوسه

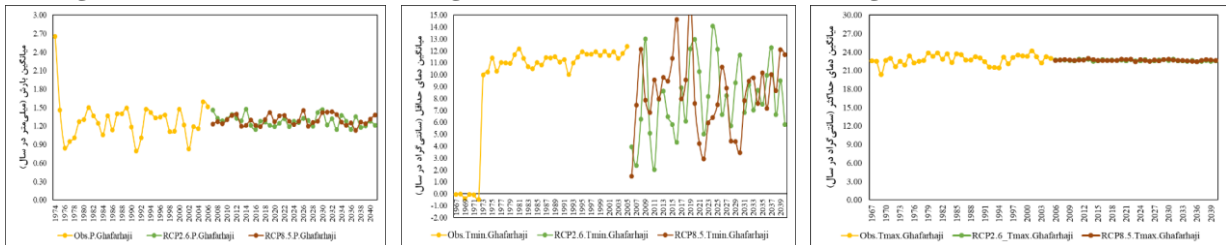
بیشترین دما - کليما تولوژی ارازکوسه



بارش - کليما تولوژی بهلکه داشلی

کمترین دما - کليما تولوژی بهلکه داشلی

بیشترین دما - کليما تولوژی بهلکه داشلی



بارش - کليما تولوژی غفارحاجی

کمترین دما - کليما تولوژی غفارحاجی

بیشترین دما - کليما تولوژی غفارحاجی

ادامه شکل ۵. روند تغییرات بارش، کمترین دما و بیشترین دما در دوره تاریخی و دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۱ تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 در حوضه رودخانه گرگان رود

که در نمودارهای مربوط به بارش در فاصله دورتری نسبت به خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند. گولاچا و مولونگا (۲۰۱۷) نیز چنین نتیجه گرفتند که عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی دما بهتر از بارش است [۴]. به هر حال، توسعه معادله رگرسیونی چندگانه کامل برای بارش مشکل است که علت آن رفتار شرطی بارش است. طبق عقیده ویلیبی و داوسون (۲۰۰۴)، در مدل شرطی یک فرایند واسطه یا میانی بین نیروی پیشران منطقه‌ای و آب و هوای محلی وجود دارد. برای مثال، مقادیر بارش محلی به رخداد روز خشک/ تر بستگی دارد که به نوبه خود به پیش‌بینی‌کننده‌های در مقیاس منطقه‌ای مانند رطوبت و فشار اتمسفری مربوط است [۴]. مقادیر ارائه شده در جدول ۳ نیز نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل SDSM برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی بررسی شده در حوضه رودخانه گرگان رود است و همچنین عملکرد بهتر مدل در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش را نشان می‌دهد. برای مثال، مقادیر ضریب همبستگی و ضریب تبیین به دست آمده برای کمترین دما و

بحث

بارش، دما و پیش‌بینی آنها، عوامل مهمی برای تصمیم‌گیری در مورد مدیریت سرزمین هستند. تغییرپذیری بارش اغلب خشکسالی و قحطی را در برخی سال‌ها و سیلاب ویرانگر را در سال‌های دیگر به دنبال دارد. بنابراین، پیش‌بینی بارش و دما در بلندمدت، یک پارامتر ورودی مهم برای مدل‌سازی پشتیبان تصمیم و نیز مطالعات ارزیابی اثر خشکی است [۳۳]. در پژوهش حاضر ابتدا کارایی مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی سه متغیر بارش، کمترین دما و بیشترین دما در حوضه رودخانه گرگان رود بررسی شد. مقایسه بصری نمودارهای ترسیم شده در شکل‌های ۲-۴ نشان می‌دهد عملکرد مدل SDSM برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی مناسب است و به ترتیب از بیشترین دما به کمترین دما و سپس بارش کاهش می‌یابد. پراکنش نقاط حول خط ۱:۱ نیز گویای این امر است، همان‌طور در نمودارهای مربوط به بیشترین دما، نقاط کاملاً روی خط ۱:۱ منطبق‌اند، در حالی

تمر، چشمه‌خان، و ارازکوسه افزایش و در ایستگاه‌های کلیماتولوژی به‌لکه‌داشلی و غفارحاجی کاهش می‌یابد. اگرچه مقدار متغیرهای اقلیمی به‌دست‌آمده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 تفاوت درخور توجهی ندارد، به طور کلی مقدار کاهش بارش در ایستگاه سینوپتیک گرگان در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ به ازای سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است و در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ مقدار کاهش بارش به ازای سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. افزایش متغیر کمترین دما در ایستگاه سینوپتیک گرگان در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. افزایش دمای حداکثر در ایستگاه سینوپتیک گرگان در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 برابر است و در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ مقدار افزایش تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است.

مقدار افزایش بارش در ایستگاه کلیماتولوژی تمر در دوره‌های ۲۰۰۶-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 و در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت RCP2.6 بیش از RCP8.5 است. کاهش دمای حداقل در ایستگاه کلیماتولوژی تمر در هر سه دوره تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است. افزایش دمای حداکثر در ایستگاه کلیماتولوژی تمر در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است.

مقدار افزایش بارش در ایستگاه کلیماتولوژی چشمه‌خان در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 و در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است. افزایش دمای حداقل در ایستگاه کلیماتولوژی چشمه‌خان در دوره‌های ۲۰۴۰-۲۰۶ و ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 و در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. افزایش دمای حداکثر در ایستگاه کلیماتولوژی چشمه‌خان در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است.

مقدار کاهش بارش در ایستگاه کلیماتولوژی ارازکوسه در دوره‌های ۲۰۰۶-۲۰۴۰ و ۲۰۴۱-۲۰۷۱ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است و در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰

بیشترین دما بیش از ۰/۹ هستند، در حالی که در مورد بارش مقادیر این معیارها به‌ترتیب در بازه ۰/۷۵-۰/۹۴ و ۰/۵۷-۰/۸۹ قرار می‌گیرند. در مطالعه هوانگ و همکارانش (۲۰۱۲) برای شبیه‌سازی بارش کمترین مقدار ضریب تبیین در مرحله اعتبارسنجی ۰/۸۸۱ و بیشترین مقدار آن ۰/۹۶۶ به دست آمد [۳۴]. در مطالعه رضایی و همکارانش (۱۳۹۳) که دماهای کمینه، بیشینه و میانگین شبیه‌سازی شدند، کمترین مقادیر برای RMSE به‌ترتیب ۲/۱۲، ۰/۳۴ و ۲/۱۳ و برای NS به‌ترتیب ۰/۸۲۵، ۰/۹۹۸ و ۰/۹۹۶ به دست آمد [۱۴]. بیشترین مقدار RMSE به‌ترتیب ۲/۵۱، ۰/۳۵ و ۳/۶۱ و NS ۰/۸۹۳، ۰/۹۹۸ و ۰/۹۶۷ به دست آمد. در مطالعه گولاچا و مولونگا (۲۰۱۷) کمترین مقدار ضریب تبیین در مرحله اعتبارسنجی نتایج مدل SDSM برای بارش ۰/۱۳۴ و بیشترین مقدار آن ۰/۶۳ به دست آمد [۴]. برای دمای حداکثر، کمترین مقدار ۰/۵۳ و بیشترین مقدار ۰/۹۸ و برای دمای حداقل، کمترین مقدار ۰/۶ و بیشترین مقدار ۰/۹۸ به دست آمد.

در پژوهش حاضر، غربالگری متغیرهای پیش‌بینی‌کننده برای برقراری ارتباط آماری بین متغیرهای پیش‌بینی‌کننده و پیش‌بینی‌شونده براساس روش کمی ارائه‌شده توسط محمود و بابل (۲۰۱۳) صورت گرفت که به کسب نتایج بهتر منجر شد [۲۳]. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل‌های ۲-۴ و نیز جدول ۳، اگرچه عملکرد مدل SDSM در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی متفاوت بوده و از متغیر دمای حداکثر به متغیر دمای حداقل و سپس متغیر بارش کاهش می‌یابد. به طور کلی، این مدل کارایی لازم برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل CanESM2 در حوضه رودخانه گرگان‌رود را دارد. پس از بررسی عملکرد مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های مدل گردش عمومی CanESM2 در حوضه رودخانه گرگان‌رود، این مدل برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی بارش، کمترین دما و بیشترین دما تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به‌ترتیب به عنوان سناریوی خوش‌بینانه و سناریوی بدبینانه در سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ استفاده شد. همچنین، روند تغییرات متغیرهای یادشده در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ بررسی شد. براساس نتایج جدول ۴ در هر سه دوره بررسی‌شده و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 مقدار بیشترین دما در ایستگاه سینوپتیک گرگان و ایستگاه‌های کلیماتولوژی



RCP8.5 در ایستگاه سینوپتیک گرگان و ایستگاه‌های کلیماتولوژی چشمه‌خان و ایستگاه کلیماتولوژی آرازکوسه (به‌جز دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5) افزایش و در ایستگاه‌های کلیماتولوژی تمر، به‌لکه‌داشلی و غفارحاجی کاهش می‌یابد.

### نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به‌منظور ایجاد سناریوهای تغییر اقلیم در حوضه رودخانه گرگان‌رود از یک روش غربالگری کمی که توسط محمود و بابل [۲۳] ارائه شد، استفاده کرد. ابتدا کارایی مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی سه متغیر بارش، کمترین دما، و بیشترین دما در حوضه رودخانه گرگان‌رود بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده کارایی مدل SDSM برای ریزمقیاس‌نمایی خروجی‌های مدل CanESM2 در مقیاس حوضه رودخانه گرگان‌رود بود و بنابراین این مدل برای ریزمقیاس‌نمایی متغیرهای یادشده تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 و برای سه دوره ۲۰۴۰-۲۰۰۶، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۰-۲۱۰۰ استفاده شد. همچنین، روند تغییرات متغیرهای یادشده در دوره ۲۰۴۰-۲۰۰۶ بررسی شد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، در چهار ایستگاه بررسی‌شده افزایش بارش و در دو ایستگاه دیگر کاهش بارش پیش‌بینی شد. دمای حداقل در سه ایستگاه مورد بررسی کاهش و در سه ایستگاه دیگر کاهش داشت و مقدار دمای حداکثر در چهار ایستگاه افزایش و در دو ایستگاه کاهش داشت. بنابراین، تغییر هر متغیر بررسی‌شده شامل بارش، کمترین دما و بیشترین دما در همه ایستگاه‌های بررسی‌شده مشابه نبود. براساس نتایج ارائه‌شده در شکل ۵، دامنه تغییرات متغیرهای اقلیمی بررسی‌شده در دوره آینده نسبت به دوره تاریخی کمتر است که در این میان، متغیر کمترین دما در ایستگاه کلیماتولوژی تمر، متغیر بارش در ایستگاه کلیماتولوژی به‌لکه‌داشلی و متغیر کمترین دما در ایستگاه کلیماتولوژی غفارحاجی از این قاعده جدا هستند. تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 روند بارش در ایستگاه سینوپتیک گرگان کاهشی و روند کمترین دما و بیشترین دما افزایشی است. در ایستگاه کلیماتولوژی تمر روند بارش و دمای حداکثر به ازای هر دو سناریو افزایشی و روند دمای حداقل، کاهشی است. در ایستگاه کلیماتولوژی چشمه‌خان

مقدار این کاهش برابر است. افزایش دمای حداقل در ایستگاه کلیماتولوژی آرازکوسه در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۰-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است. افزایش دمای حداکثر در ایستگاه کلیماتولوژی آرازکوسه در دوره‌های ۲۰۰۶-۲۰۴۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است.

مقدار افزایش بارش در ایستگاه کلیماتولوژی به‌لکه‌داشلی در دوره‌های ۲۰۰۶-۲۰۴۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5، و در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. کاهش دمای حداقل در ایستگاه کلیماتولوژی به‌لکه‌داشلی در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. کاهش دمای حداکثر در ایستگاه کلیماتولوژی به‌لکه‌داشلی در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5، در دوره‌های ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است.

مقدار افزایش بارش در ایستگاه کلیماتولوژی غفارحاجی در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ تحت سناریوی RCP2.6 کاهش بارش و تحت سناریوی RCP8.5 افزایش بارش مشاهده شد. در دوره ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. کاهش دمای حداقل در ایستگاه کلیماتولوژی غفارحاجی در هر سه دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5 است. کاهش دمای حداکثر در ایستگاه کلیماتولوژی غفارحاجی در دوره ۲۰۰۶-۲۰۴۰ تحت سناریوی RCP2.6 بیش از RCP8.5، در دوره ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ تحت سناریوی RCP8.5 بیش از RCP2.6 است. به‌طور کلی، براساس نتایج ارائه‌شده در جدول‌های ۴ و ۵ مقدار بارش در ایستگاه‌های کلیماتولوژی تمر، چشمه‌خان، به‌لکه‌داشلی و غفارحاجی در دوره‌های ۲۰۰۶-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و RCP8.5 افزایش و در ایستگاه سینوپتیک گرگان و ایستگاه کلیماتولوژی آرازکوسه کاهش می‌یابد. مقدار دمای حداقل نیز در دوره‌های بررسی‌شده و تحت هر دو سناریوی RCP2.6 و

اینکه مرحله غربال متغیرهای پیش‌بینی‌کننده بسیار مهم است، پیشنهاد می‌شود در مطالعات مشابه، به منظور انجام این مرحله، روش غربالگری کمی استفاده‌شده در پژوهش حاضر به کار گرفته شود.

#### منابع

- [1].Stocker T, editor. Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2014 Mar 24.
- [2].Chu JT, Xia J, Xu CY, Singh VP. Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*. 2010 Jan 1; 99(1-2):149-61.
- [3].Pulido-Velazquez D, García-Aróstegui JL, Molina JL, Pulido-Velazquez M. Assessment of future groundwater recharge in semi-arid regions under climate change scenarios (Serral-Salinas aquifer, SE Spain). Could increased rainfall variability increase the recharge rate?. *Hydrological processes*. 2015 Mar 15; 29(6):828-44.
- [4].Gulacha MM, Mulungu DM. 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*. 2017 Aug 1; 100:62-72.
- [5].Gebremedhin MA, Abraha AZ, Fenta AA. Changes in future climate indices using Statistical Downscaling Model in the upper Baro basin of Ethiopia. *Theoretical and applied climatology*. 2018 Jul 1; 133(1-2):39-46.
- [6].Hashmi MZ, Shamseldin AY, Melville BW. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 2011 May 1; 25(4):475-84.
- [7].Hashmi MZ, Shamseldin AY, Melville BW. Statistical downscaling of precipitation: state-of-the-art and application of bayesian multi-model approach for uncertainty assessment. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 2009 Oct 27; 6(5):6535-79.
- [8].Binti Pg DS, Hasan A, Ratnayake U, Shams S, Nayan ZB, Rahman EK. Prediction of climate change in Brunei Darussalam using statistical downscaling model. *Theoretical and applied climatology*. 2017 Jun: 1-8.

روند هر سه متغیر بررسی‌شده به ازای هر دو سناریو، افزایشی است. روند بارش در ایستگاه کلیماتولوژی ارازکوسه کاهشی و روند کمترین و بیشترین دما، افزایشی است. در ایستگاه‌های کلیماتولوژی بهلکه‌داشلی و غفارحاجی، روند بارش به صورت افزایشی و روند کمترین و بیشترین دما، کاهشی است. آذری و همکارانش که آثار هیدرولوژیکی تغییر اقلیم در حوضه رودخانه گرگان‌رود تا ورودی سد وشمگیر را ارزیابی کردند، در بخش بررسی تغییر اقلیم و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های سه مدل گردش عمومی (HadCM3, CGCM1, و SCIRO) با استفاده از روش تغییر عامل به این نتیجه رسیدند که میانگین بارندگی سالانه در حوضه رودخانه گرگان‌رود تا ورودی سد وشمگیر در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ کاهش یافته و کمترین و بیشترین دمای سالانه افزایش خواهد یافت.

با توجه به اینکه تغییر اندک متغیرهای اقلیمی می‌تواند موجب تغییرات درخور توجهی در پتانسیل منابع آب شود، بررسی تغییر اقلیم در آینده می‌تواند نقطه شروع خوبی برای تصمیم‌گیرندگان در به‌کارگیری مدیریت جامع منابع آب در منطقه طی دوره آینده باشد [۵]. همان‌گونه که در مقدمه گفته شد، علاوه بر منابع آب، بخش‌های کشاورزی، امنیت غذایی، سلامت انسان، اکوسیستم‌های خشکی، تنوع زیستی، و نواحی ساحلی [۴] نیز تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم قرار می‌گیرند. بنابراین، نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش حاضر می‌تواند در بخش‌های یادشده نیز استفاده شده و تأثیر تغییر اقلیم بر هر یک از این بخش‌ها در دوره آینده آشکار شود. شناخت آثار تغییر اقلیم در هر یک از بخش‌های یادشده می‌تواند به ارائه راه‌کارهای سازشی و کاهشی منجر شود که در نهایت موجب کاهش آثار منفی تغییر اقلیم در بخش‌های محیط زیست، اجتماعی و اقتصادی خواهد شد.

با توجه به محدودیت زمانی و نیز محدودیت داده‌ها از لحاظ تعداد سال‌های آماری مناسب، در پژوهش حاضر یک ایستگاه سینوپتیک و پنج ایستگاه کلیماتولوژی برای ارزیابی و پیش‌بینی تغییر اقلیم در آینده استفاده شد. بنابراین، بررسی تعداد بیشتری از ایستگاه‌ها می‌تواند به شناخت بهتر وضعیت تغییر اقلیم در آینده در سطح حوضه مطالعه‌شده کمک کند، پس تکمیل پژوهش حاضر با تعداد بیشتر ایستگاه‌ها پیشنهاد می‌شود. همچنین، با توجه به

- [9]. Gagnon S, Singh B, Rousselle J, Roy L. An application of the statistical downscaling model (SDSM) to simulate climatic data for streamflow modelling in Québec. *Canadian Water Resources Journal*. 2005 Jan 1; 30(4):297-314.
- [10]. Chen ST, Yu PS, Tang YH. Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. *Journal of hydrology*. 2010 May 7; 385(1-4):13-22.
- [11]. Khan MS, Coulibaly P, Dibike Y. Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*. 2006 Mar 15; 319(1-4):357-82.
- [12]. Yousefi H, Amini L, Ghasemi L, Amrayi N. Exploring the Efficiency of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Simulation and Projection of Climatic Parameters (Case Study: Karaj Synoptic Station). *Ecohydrology*. 2018; 5 (3): 957-968 (Persian)
- [13]. Mahmood R, Babel MS. Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. *Weather and Climate Extremes*. 2014 Oct 1;5:56-66.
- [14]. Rezaei M, Nohtani M, Abkar A, Rezaei M, Mirkazehi Rigi M. Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Temperature Indices in Two Arid and Hyper Arid Regions (Case Study: Kerman and Bam). *Journal of Watershed Management Research*. 2018; 5 (10): 117-131. (Persian).
- [15]. Sanikhani H, Kisi O, Amirataee B. Impact of climate change on runoff in Lake Urmia basin, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 2018 Apr 1; 132(1-2):491-502.
- [16]. Abbaspour KC, Faramarzi M, Ghasemi SS, Yang H. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*. 2009 Oct; 45(10).
- [17]. Kheiri M, Soufizadeh S, Ghaffari A, AghaAlikhani M, Eskandari A. Association between temperature and precipitation with dryland wheat yield in northwest of Iran. *Climatic change*. 2017 Apr 1; 141(4):703-17.
- [18]. Ahani H, Kherad M, Kousari MR, van Roosmalen L, Aryanfar R, Hosseini SM. Non-parametric trend analysis of the aridity index for three large arid and semi-arid basins in Iran. *Theoretical and applied climatology*. 2013 May 1; 112(3-4):553-64.
- [19]. Kousari MR, Zarch MA. Minimum, maximum, and mean annual temperatures, relative humidity, and precipitation trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*. 2011 Aug 1; 4(5-6):907-14.
- [20]. Kousari MR, Ekhtesasi MR, Tazeh M, Naeini MA, Zarch MA. An investigation of the Iranian climatic changes by considering the precipitation, temperature, and relative humidity parameters. *Theoretical and Applied Climatology*. 2011 Mar 1; 103(3-4):321-35.
- [21]. Tighe M, Pollino CA, Cuddy SM, Whitfield S. A Bayesian approach to assessing regional climate change pressures on natural resource conditions in the central west of NSW, Australia. In *International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2007)*, December 2007 Dec (pp. 10-13).
- [22]. Pachauri RK, Meyer L. *Climate change 2014 Synthesis Report-Summary for Policymakers*.
- [23]. Mahmood R, Babel MS. Evaluation of SDSM developed by annual and monthly sub-models for downscaling temperature and precipitation in the Jhelum basin, Pakistan and India. *Theoretical and Applied Climatology*. 2013 Jul 1; 113(1-2):27-44.
- [24]. Sheikh V, Babaei A, Mooshakhian Y. Trend Analysis of Precipitation Regime in the Gorganroud Basin. *Watershed Management Sciences & Engineering*. 2009; 3 (8): 29-39. (Persian)
- [25]. Varvani J, Feiznia S, Mahdavi M, Arabkhedri M. Analysis of Regional Suspended Sediment in Gorganroud Drainage Basin Using Regression Equation. *Iranian Journal of Natural Resources*. 2002; 55(1): 35-46. (Persian)
- [26]. Azari M, Moradi HR, Saghafian B, Faramarzi M. Assessment of Hydrological Effects of Climate Change in Gorganroud River Basin. *Journal of Water and Soil*. 2013; 27(3): 537-574. (Persian).
- [27]. Sada, R. *Potential Impacts of Climate Change on Hydrology of Western Siberian Lowland Catchments*. M.Sc. Thesis, Kiel University; 2015.
- [28]. Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 2007; 50 (3):885-900.
- [29]. Krause P, Boyle DP, Bäse F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*. 2005 Dec 16; 5:89-97.

- [30]. Blaikie N. Analyzing quantitative data: From description to explanation. Sage; 2003 Feb 17.
- [31]. Willmott CJ, Matsuura K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*. 2005 Dec 19; 30(1):79-82.
- [32]. McCuen RH, Knight Z, Cutter AG. Evaluation of the Nash–Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*. 2006 Nov; 11(6):597-602.
- [33]. Samadi S, Ehteramian K, Sarraf BS. SDSM ability in simulate predictors for climate detecting over Khorasan province. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*. 2011 Jan 1; 19:741-9.
- [34]. Huang J, Zhang J, Zhang Z, Sun S, Yao J. Simulation of extreme precipitation indices in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method (SDSM). *Theoretical and applied climatology*. 2012 May 1; 108(3-4):325-43.