



جغرافیا و روابط انسانی، زمستان ۱۴۰۴، دوره ۸، شماره ۴، صص ۴۳۰-۴۰۸

## بررسی و تحلیل تغییرات فرین‌های بارشی و دمایی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در استان آذربایجان شرقی

نازلی زنوزی علمداری<sup>۱</sup>، بهروز سبحانی\*<sup>۲</sup>، مهدی اصلاحی<sup>۳</sup>، مسیح اله محمدی<sup>۴</sup>

۱. دانشجوی دکتری، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

۲. استاد، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده علوم اجتماعی، گروه جغرافیای طبیعی، اردبیل، ایران.

Email: sobhaniardabil@gmail.com

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی،

اردبیل، ایران

۳. دانش‌آموخته دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی،

اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۳۱

### چکیده

یکی از مشخصه وقوع پدیده تغییر اقلیم، کاهش بارش، افزایش درجه حرارت افزایش وقوع پیامدهای حدی در آینده است که با توجه به ویژگی‌های جامع و محدودیت‌ها می‌تواند پیامدهای زیانباری به همراه داشته باشد و وقوع چنین امری مشکلی اساسی خواهد بود. این پژوهش برای ارزیابی روند فرین‌های اقلیمی بارشی و دمای ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی (تبریز، اهر، جلفا، مراغه و میانه) تا پایان قرن بیست و یکم از داده‌های ۱۲ مدل از مجموعه مدل‌های در دسترس CMIP6 با سه سناریوی (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) و شبیه‌ساز صحیح اریبی استفاده شد. برای شناسایی بهترین مدل جهت شبیه‌سازی داده‌های بارش و دما دوره آتی (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) از روش کلینگ - کوپتا استفاده شد. سپس، آزمون نا پارامتریک من - کندال و شیب سنس برای بررسی وجود و یا عدم وجود روند نمایه‌های حدی به کار رفت. بر اساس نتایج بررسی عدم قطعیت دو مدل BCC-CSM2-MR و MIROC6 که بهترین شبیه‌سازی را برای بارش و دما داشتند. نتایج فرین‌های اقلیمی نشان دادند که روند افزایش نمایه‌ها حدی گرم و کاهش نمایه‌های حدی سرد در اکثر ایستگاه‌ها مشهود است به طوری که نمایه تعداد روزهای تابستانی که دمای حداکثر هوای بالای ۲۵ درجه سلسیوس است (SU25)، در کلیه ایستگاه‌ها دارای روند افزایشی و نمایه شب‌های سرد (TN10P) در اکثر ایستگاه‌ها دارای روند کاهشی است. روند شاخص‌های حدی بارشی در سطح منطقه مورد مطالعه می‌توان مشاهده کرد شاخص مجموعه بارش سالانه در دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 رو به افزایش و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 روند شاخص رو به کاهش است. در شاخص‌های CCD، SDII، P95p و شاخص‌ها رو به افزایش است. که این شرایط می‌تواند بیانگر افزایش بارش‌های شدید و کوتاه مدت در مقابل کوتاه شدن فصل بارش منطقه باشد. کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، CMIP6، سناریوهای SSP، فرین‌های اقلیم، آذربایجان شرقی.

## مقدمه

طی چند دهه اخیر، فعالیت‌های انسانی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و تغییر در چشم‌اندازهای طبیعی و غیره، مسئله‌ای را به نام گرمایش جهانی شکل داده که هم اکنون یکی از موضوعات بحث بر انگیز در تمام جوامع جهانی می‌باشد (رنجبر اوجی، ۱۳۹۹). براساس گزارش چهارم IPCC افزایش دما در انتهای قرن ۲۱ به میزان ۱/۸ تا ۴ درجه سلسیوس خواهد بود (IPCC, 2007). گزارش پنجم IPCC نشان می‌دهد که از سال ۱۸۸۰ تا ۲۰۱۲ میانگین جهانی دما سطح زمین و اقیانوس (۰/۸۳) (۱/۰۶ - ۰/۶۵) درجه سلسیوس افزایش یافته است (IPCC, 2013). در گزارش ششم تغییر اقلیم درجه حرارت جهانی در سال ۲۱۰۰ میلادی ۱/۵ درجه سلسیوس با احتمال تقریبی ۶۶ درصد افزایش می‌یابد (o'Neill). گرمایش جهانی و تغییرات آب و هوایی جنبه‌های مختلف طبیعی و انسانی مانند کشاورزی، انرژی، اقتصاد، گردشگری، منابع آب و غیره را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تغییرات آب و هوایی و افزایش دما می‌تواند فرین‌های مربوط به اقلیم را نیز دچار تغییر نماید. رویدادهای اقلیمی حدی، پدیده نادری هستند (علیجانی و فرخ زاده، ۱۳۹۴). که از دیدگاه آماری در ناحیه‌های بالا و پایین توزیع آماری قرار گیرد؛ از این رو احتمال وقوع آن خیلی کم است. برای مثال، واژه نادر می‌تواند مقادیر پایین و بالای صدک‌های (۵ و ۹۵)، (۱۰ و ۹۰)، یا به صورت مقادیر بالاتر از یک آستانه یا تداوم یک شرایط ویژه تعریف شود. نمایه‌های حدی ساده و شفاف مبتنی بر داده‌های بلند مدت و همگن، وضعیت رویدادهای حدی را بیان می‌کند (Peterson et al). با توجه به این‌که رویدادهای حدی از نظر شدت و فراوانی کمیاب بوده و از آنجایی که اکوسیستم‌ها و ساختار فیزیکی جوامع انسانی با روابط اقلیمی بهنجار تنظیم شده است، در نتیجه در زمان رخداد این پدیده‌ها، به ندرت می‌توان خود را تجهیز و آماده کنند. در نتیجه تغییر در زمان وقوع رویدادها حدی اغلب می‌تواند آثار چشمگیری در اکوسیستم‌ها و جامعه نسبت به تغییر در شرایط متوسط جوی داشته باشد (رنجبر اوجی، ۱۳۹۹).

با توجه به اهمیت وقوع پدیده‌ای حدی در هر منطقه و پیش بینی وقوع آن‌ها به منظور جلوگیری از بروز خسارت و صدمات در بخش‌های مختلف، مطالعه و بررسی تغییرات پدیده‌ها حدی در طول زمان اهمیت می‌یابد. به منظور شناسایی و مطالعه این پدیده‌ها در طول زمان گروهی از محققان CCI/CLIVAR که به روی تغییر اقلیم کار می‌کردند، گروهی از شاخص‌ها را معرفی نمودند. با استفاده از این شاخص‌ها می‌توان وقوع پدیده‌های حدی دما و بارش را در طول زمان شناسایی کرد (Sun, 2016). این شاخص‌ها به وسیله افراد مختلف در کشورهای متعدد و مناطق مختلف، با استفاده از فرمول‌های مشابه هم محاسبه شده‌اند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های شامل بررسی روند حدهای دما، بارش و تغییر پذیری آن‌ها در نواحی مختلف انجام شده است. برای توصیف دقیق ویژگی‌های مکانی و زمانی روزانه و حدی دما و بارش، سری‌های زمانی با دوره تناوب طولانی و مقادیر همگن داده‌های روزانه مورد نیاز است. (Ruml et al. 2017) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های حدی دمایی در سبیری براساس ۱۸ شاخص حدی که با استفاده از داده‌های دمایی حداقل و

حداکثر روزانه، ۲۶ ایستگاه هواشناسی در سطح سیبری جمع‌آوری شده بود، طی بازده زمانی ۲۰۱۰ - ۱۹۶۱ پرداختند. برای بررسی روند در منطقه از آزمون من - کندان استفاده کردند. نتایج بیانگر این موضوع بود که به طول کلی روند شاخص‌ها تا سال ۱۹۸۰ روندی سرد و بعدازآن شاخص‌ها روند گرم را نشان دادند. Gupta et al (2020) روند تغییرات نمایه‌های فرین بارش را در حوضه رودخانه مبرمتی در غرب هند به کمک داده‌های شبکه‌ای پایگاه ملی این کشور ارزیابی کردند. نمایه‌های فرین بارشی همچون شماره روزهای بارانی، نمایه ساده شدت بارش، روزهای متوالی همراه با بارش، روزهای متوالی خشک و بارش سالانه بررسی شد. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد در سطح اطمینان ۹۵٪ بسیاری از نمایه‌های مطالعه شده روند دارند. Adeyeri et al, 2019 روند شاخص‌های اقلیمی را در حوزه کومادوگویوبه براساس داده‌های دوره پایه ۲۰۱۷ - ۱۹۷۱ و شبیه‌سازی‌های مدل منطقه‌ای (RCM) برای دوره آینده نزدیک ۲۰۵۰ - ۲۰۲۰ و آینده دور ۲۰۹۰ - ۲۰۶۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج افزایش در روزهای گرم و شب‌های گرم و کاهش در روزهای مرطوب است. Cheng et al. 2020 در پژوهشی به مقایسه مدل‌های گزارش پنجم و ششم در شبیه‌سازی فرین‌های آب و هوایی پرداختند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که توانایی مدل‌های فردی در شبیه‌سازی فرین‌های آب و هوایی در مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) نسبت به گزارش پنجم (CMIP5) بسیار بیشتر است و به‌طور خلاصه مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) در شبیه‌سازی فرین‌های اقلیمی و الگوهای روند در مقایسه با مشاهدات، بهبود کلی را نشان می‌دهد (You et al, 2021) روند و عدم قطعیت مجموعه داده‌های دما را با استفاده از ۲۰ مدل گزارش ششم (CMIP6) در چین مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان تغییرات میانگین دمایی سطحی را طی دوره ۲۱۰۰ - ۲۰۱۴ و با استفاده از سه سناریوی اجتماعی - اقتصادی (SSP1-2.6, SSP2-4.5 و SSP5-8.5) مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق روند افزایش دما در هر سه سناریوی را نشان داد. سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده دور یعنی ۲۱۰۰ - ۲۰۸۰ بیشترین افزایش دما را نشان داد. نتایج عملکرد بهترین مدل گزارش ششم را در شبیه‌سازی دما و روند شتابان گرمایش را در شمال غربی چین و فلات تبت نشان داد. (Dannenberget al (2019) با بررسی هفت شاخص حدی بارش و دما در استان گانسو چین طی دوره ۲۰۱۷ - ۱۹۸۱ بیان کردند که طی سال‌های اخیر تغییرات در بارش‌ها شدید در مناطق جنوبی و شمالی گانسو متفاوت بوده و در مناطق شمالی استان گانسو رخدادهای بارشی شدید افزایش یافته است. رنجبر و اوجی (۱۳۹۹) در پژوهشی به بررسی روند فرین‌های دمایی ایستگاه‌های نوار شمالی کشور پرداختند. آن‌ها روند فرین‌های دمایی در دوره مشاهداتی ۲۰۱۵ - ۱۹۸۲ و دوره آینده ۲۰۵۵ - ۲۰۲۰ را بررسی کردند. نتایج پژوهش نشان داد حداقل و حداکثر روزانه ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده با افزایش مواجهه می‌باشند. بررسی آماری نشان می‌دهد در همه ایستگاه‌ها و در هر دو دوره مشاهداتی و مدل شده، شاخص‌های فرین دمایی با روند و تغییراتی همراه هستند به‌طوری‌که فرین‌های سرد با شیب کاهشی و فرین‌های گرم با شیب افزایشی در هر دو دوره مشاهداتی و آینده مواجه هستند. جهانبخش اصل و همکاران (۱۳۹۹) تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های فرین در

ایران را با استفاده از آمار ۸۲۳ ایستگاه باران‌سنجی و سینوپتیک طی دوره ۲۰۱۶ - ۱۹۶۵ مورد مطالعه قرار دادند. از نتایج جالب توجه این پژوهش می‌توان به نقش عرض جغرافیایی در بارش‌های فرین اشاره کرد. همچنین نتایج نشان داد که در ۶۰ درصد کشور نسبت بارش‌های حدی در حال افزایش است. غلامرضایی و همکاران (۱۴۰۱) در پژوهشی به تحلیل روند وقوع رخداد‌های فرین اقلیمی در غرب و جنوب غرب ایران پرداختند. آن‌ها با استفاده از داده‌های بارش، حداقل و حداکثر دما روزانه ۲۸ ایستگاه سینوپتیک واقع در غرب و جنوب غرب کشور طی دوره آماری مشترک ۳۰ ساله (۲۰۱۷ - ۱۹۸۸) شاخص‌های حدی را شناسایی کردند. نتایج بررسی تغییرات زمانی رخداد‌های شاخص‌های گرم طی دوره ۲۰۱۷ - ۱۹۸۸ در سطح منطقه نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها در حالت کلی، روند شاخص‌ها گرم (روزها و شب‌های گرم، تعداد روزهای حاره‌ای و غیره) صعودی بوده در مقابل تغییرات زمانی رخداد‌های شاخص‌های سرد (شب‌ها و روزهای سرد، تعداد روزهای همراه با یخبندان) نزولی بوده است. ساری صراف و همکاران (۱۴۰۲) در پژوهشی به بررسی و پیش‌نگری تغییرات فرین‌های دمایی در شمال غرب ایران در دوره پایه (۲۰۱۴ - ۱۹۸۵) و سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰ - ۲۰۲۱)، آینده متوسط (۲۰۸۰ - ۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰ - ۲۰۸۱) پرداخته شده است. بدین منظور از دو شاخص حدی دمایی شامل روزهای یخبندان (FD) و روزهای یخی (ID) و آزمون من‌کندل جهت بررسی تغییرات استفاده شد. جهت پیش‌نگری تغییرات در دوره آینده نیز از ۷ مدل گزارش ششم (CMIP) تغییر اقلیم بهره گرفته شده است. نتایج نشان داد که روزهای یخبندان و روزهای یخی در انتهای قرن ۲۱ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۴۵ و ۱۳ روز، کاهش داشته است.

### روش تحقیق

استان آذربایجان شرقی در شمال غربی ایران قرار دارد. از نظر موقعیت جغرافیایی بین مدارهای ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۲۶ دقیقه عرض شمالی و بین نصف‌النهار ۴۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۲ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). مساحت استان برابر ۴۵۴۹۰/۸۸ کیلومتر مربع است و ۲/۸ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد. (فرج نیا و مروج، ۱۳۹۸). از لحاظ وسعت در بین استان‌های کشور در رتبه دهم قرار دارد. در حالت کلی، استان آذربایجان شرقی یک منطقه کوهستانی محسوب می‌شود که حدود ۴۰٪ از سطح آن کوهستانی ۲/۲۸٪ را تپه ماهورها و ۳۱/۸٪ را زمین‌های هموار (از جمله دشت‌های میان کوهی) فرا گرفته است. این استان به علت توپوگرافی از اقلیم‌های متفاوت برخوردار است. این استان همواره تحت تأثیر بادهای سرد شمالی و سیبری و بادهای مرطوب دریای سیاه و مدیترانه و اقیانوس اطلس قرار دارد. میانگین بارندگی سالانه در این استان ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است (جهانگیری و قره‌داقی، ۱۳۹۷). جدول (۱) میانگین بارش و دمای سالانه و طول و عرض جغرافیایی هر ایستگاه را نشان می‌دهد.

ایستگاه‌های منتخب برای استخراج داده‌ها، شامل ایستگاه‌های سینوپتیک تبریز، مراغه، میانه، جلفا و اهر بودند. انتخاب این ایستگاه‌ها به دلیل دارا بودن طول دوره آماری کمینه ۳۰ سال برای افزایش دقت تحلیل‌ها و همچنین



هستند (Majumder, 2015). در حال حاضر CMIP6 با ارائه ۲۸ مدل آب و هوایی آخرین نسل از پروژه مقایسه مدل‌های آب و هوایی (CMIP) هستند. هر یک از پروژه‌های مقایسه‌ای مورد تأیید CMIP6 موضوعات منحصر به فرد آب و هوایی را پوشش می‌دهد. فعالیت اصلی در فاز ۶ پروژه متقابل مدل جفت شده (CMIP6) پروژه متقابل سناریو (ScenarioMIP) می‌باشد؛ که پیش‌بینی این مدل‌های اقلیمی ترکیبی از مجموعه جدید از سناریوهای انتشار و کاربری اراضی تولید شده به وسیله مدل‌های IAMs بر مبنای خطوط سیر مشترک اقتصادی - اجتماعی (SSP) آینده (که عناصر مانند جمعیت، رشد اقتصادی، شهرنشینی، سن، تحصیلات و ... را در برمی‌گیرد) و مرتبط با سناریوهای غلظت گازهای گلخانه‌ای RCPs می‌باشد (Eyring et al, 2016). مهران و همکاران (۲۰۱۴)، در مطالعات خود معتقدند که وابسته به منطقه آب و هوایی مورد مطالعه، ممکن است مدل‌های آب و هوایی در مناطق با توپوگرافی پیچیده و پر شیب، برای بعضی از متغیرهای اقلیمی پیش برآورد و یا در مناطق خشک کم برآورد داشته باشد.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

ردیف	نام مدل	کشور توسعه‌دهنده	نام مرکز تحقیقاتی	دقت مکانی مدل (درجه)
۱	ACCESS-CM2	Australia	Australian Research Council Centre of Excellence for Climate System Science,	$1.87 \times 1.25^\circ$
۲	BCC-CSM2-MR	China	Beijing Climate Center, China Meteorological Administratio	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$
۳	CESM2	USA	Community Earth System Model Contributors	$1.25^\circ \times 0.94^\circ$
۴	CNRM-CM6-1	France	Centre National de Recherches Météorologiques Scientifique (CNRM)	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
۵	CanESM5	Canada	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis-Canada	$2.81^\circ \times 2.78^\circ$
۶	MIROC6	Japan	National Institute for Environmental Studies, The University of Tokyo	$1.4^\circ \times 1.4^\circ$
۷	MRI-EMS2-0	Japan	Meteorological Research Institute	$1.12^\circ \times 1.12^\circ$
۸	IPSL-CM6A-LR	France	Institut Pierre-Simon Laplace	$2.5^\circ \times 1.26^\circ$
۹	GISS-E2-1-G	USA	NASA Goddard Institute for Space Studies	$2.5^\circ \times 2^\circ$
۱۰	HadGEM3-GC31-LL	UK	Meteorological Office Hadley Centre	$1.88^\circ \times 1.25^\circ$
۱۱	NESM3	China	Nanjing university of Information and Technology (NUIST)	$1^\circ \times 1.3^\circ$
۱۲	NOR-ESM2-MM	Norway	Norwegian Climate Center	$0.94 \times 1.25^\circ$

<sup>1</sup> Senario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP)

### سناریوهای انتشار SSP

سناریوهای بخش اساسی تحقیقات تغییر اقلیم را تشکیل می‌دهد و استفاده از آن به ما کمک می‌کند تا عواقب طولانی مدت تصمیمات کوتاه مدت بشر را بیشتر درک کنیم و با توجه به عدم قطعیت، سناریوها به محققان کمک می‌کند تا بتوانند آینده‌های احتمالی را کشف کنند (Riahi et al. 2017). در سناریوهای CMIP6 فاکتورهای اجتماعی - اقتصادی نظیر رشد جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شده است (زرین و صالح‌آبادی، ۱۳۹۸). چهارچوب سناریو جدید که توسط جامعه تحقیقاتی تغییر اقلیم طراحی شده‌اند می‌توانند تجزیه و تحلیل یکپارچه‌ای از تأثیرات آینده آب و هوایی، آسیب‌پذیرها، سازگاری و کاهش این آسیب‌ها را فراهم کنند. (Riahi et al. 2017). سناریوهای گزارش ششم به صورت ترکیبی از خط سیرهای اقتصادی - اجتماعی (SSP) (توسعه پایدار، SSP1، توسعه بر اساس سیاست‌های میانی، SSP2، منطقه‌ای SSP3، نابرابری SSP4 و توسعه سوخت فسیلی SSP5) و خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (سطوح واداشت مختلف) تولید می‌شوند؛ به طوری که امکان تحلیل بازخورد میان تغییرات اقلیمی و عوامل اجتماعی - اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری را فراهم می‌آورد (انصاری مهابادی و همکاران، ۱۴۰۱).

جدول ۳- تمام سناریوهای مورد استفاده در مجموعه آزمایشی ScenarioMIP به همراه ویژگی‌های مرتبط آن‌ها

(Gidden et al. 2019).

Scenario name	SSP	Target forcing level (Wm <sup>-2</sup> )	Scenario type	Tier	IAM	Contributing to other MIPs
SSP1-1.9	1	1.9	Mitigation	2	IMAGE	ScenarioMIP
SSP1-2.6	1	2.6	Mitigation	1	IMAGE	ScenarioMIP
SSP2-4.5	2	4.5	Mitigation	1	MESSAGE-GLOBIOM	ScenarioMIP, VIACS AB, CORDEX, GeoMIP, DAMIP, DCPD
SSP3-7.0	3	7	Baseline	1	AIM/CGE	ScenarioMIP, AerChemMIP, LUMIP
SSP3-LowNTCF	3	6.3	Mitigation	2	AIM/CGE	ScenarioMIP, AerChemMIP, LUMIP
SSP4-3.4	3	3.4	Mitigation	2	GCAM4	ScenarioMIP
SSP4-6.0	4	6	Mitigation	2	GCAM4	ScenarioMIP, GeoMIP
SSP5-3.4-OS	4	3.4	Mitigation	2	REMIND-MAGPIE	ScenarioMIP
SSP5-8.5	5	8.5	Baseline	1	REMIND-MAGPIE	ScenarioMIP, C4MIP, GeoMIP, ISMIP6, RFMIP

رتبه‌بندی مدل‌های GCM بر اساس دقت در شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی

برای تعیین دقت هر یک از مدل‌های CMIP6، نتایج شبیه‌سازی بارش و دما هر حوضه در دوره تاریخی با آمار مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفت. در این مرحله، از سنجه آماری کلینگ - گوپتا (KGE) برای تعیین میزان دقت

هر مدل (روابط ۱ تا ۵) استفاده شد. این سنجه در عین سادگی، آماره میانگین، انحراف معیار و ضریب همبستگی سری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی حاصل از مدل را لحاظ کرده و وزن دهی براساس این سنجه می‌تواند کمک شایانی را در افزایش دقت نتایج تصویرسازی مدل‌ها داشته باشد. هر چه میزان این سنجه به ۱ نزدیک‌تر باشد، توانایی مدل GCM در شبیه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی بهتر خواهد بود. (Knoben et al, 2019). مبنای این مدل‌ها، توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی مقادیر مشاهداتی دوره پایه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸) بوده. وزن دهی این مدل‌ها براساس روابط ذیل صورت گرفت:

$$\text{KGE} = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (a-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن:

$$a = \frac{\sigma_s}{\sigma_o} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$\beta = \frac{\mu_s}{\mu_o} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$R^2 = \left[ \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه  $S_i$  و  $O_i$  به ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش یا دما در هر ماه،  $\bar{S}$  و  $\mu_s$  میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده،  $\bar{O}$  و  $\mu_o$  میانگین داده‌های مشاهده شده،  $r$  ضریب همبستگی پیرسون،  $\sigma_o$  و  $\sigma_s$  به ترتیب انحراف معیار داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی و KGE شاخص ترکیبی کلینگ - گویتا هستند. مقادیر این شاخص

بین  $-∞$  تا ۱ متغیر بوده و هر چقدر به یک نزدیک‌تر باشد تطابق بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بیشتر خواهد بود (Patil et al, 2015).

#### • تعیین وزن (وزن دهی) مدل‌های GCM در ایستگاه‌های منتخب

باهدف کاهش عدم قطعیت در نتایج حاصل از مدل‌های CMIP6 این مدل‌ها بر مبنای دقت محاسبه شده در مراحل قبل بر اساس معادله (۶) وزن دهی شدند (Chen et al, 2011).

$$W_m = \frac{1/1 - \text{KGM}_m}{\sum_{m=1}^7 (1/1 - \text{KGM}_m)} \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در رابطه فوق  $W_m$  وزن هر کدام از مدل‌های AOGCM در هر ماه برای برآورد دما و بارش است. مقدار تغییرات دما و بارش در دوره آتی (۲۱۰۰ - ۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۸ - ۱۹۸۸) برای هر ماه از رابطه ۷ تا ۹ محاسبه شد:

$$\Delta T = \sum_{m=1}^7 (W_m \times \Delta T_m) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$\Delta P = \sum_{m=1}^7 (W_m \times \Delta P_m) \quad \text{رابطه (۸)}$$

رابطه (۹) 
$$\Delta P_m = \frac{\bar{P}_m(2021-2100)}{\bar{P}_m(1988-2018)}$$

که در روابط فوق،  $\Delta T_m$  و  $\Delta P_m$  متوسط ۸۰ ساله تغییرات دما و بارش پیش‌بینی شده توسط هر یک از مدل‌های AOGCM در هر یک از سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 هستند (Semenov, 2008).

### • روش اُریبی

روش اُریبی بر مبنای رویکردهای مختلفی مانند نگاشت توزیع احتمال، نگاشت توابع توزیع تجمعی تجربی، نگاشت چندک و نگاشت توزیع چگالی گذرنال ارائه شده (McGinnis et al, 2015) که در مطالعات متعدد جهت ارزیابی بارش‌هایی شبکه‌ای و ثبت شده استفاده می‌شود. این روش با تصحیح میانگین، انحراف استاندارد و چندک‌ها با یکسان سازی توابع توزیع خروجی‌های مدل و داده‌های مشاهداتی کار می‌کند. در روش اُریبی فرض بر این است که بارش شبیه سازی شده و مشاهده شده، توزیع پیشنهادی یکسانی را دنبال می‌کنند که به‌نوبه خود ممکن است باعث ایجاد اُریبی گردد. بر این اساس برای توزیع رویدادهای بارشی، غالباً توزیع گاما به شکل  $\alpha$  و مقیاس  $\beta$  استفاده می‌شود (Yeboah et al, 2022؛ Gunavathi & Selvasidhu, 2021).

رابطه (۱۰) 
$$f_Y(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \times \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \times e^{-\frac{x}{\beta}}; \geq 0; \alpha, \beta > 0$$

در این معادله،  $f_Y$  تابع توزیع گاما،  $x$  متغیر تصادفی،  $\Gamma(\alpha)$  نشان دهنده تابع گاما است و  $\alpha$  و  $\beta$  به ترتیب، شکل و مقیاس پارامتری هستند که برای هر توزیع گاما با استفاده از تخمین حداکثر درست‌نمایی تعیین می‌شود.  $e$  نیز عدد ثابت اولیر (۲/۷۱۸۲۲۸) یک ثابت مهم است که در بسیاری از زمینه‌ها یافت می‌شود و پایه لگاریتم‌های طبیعی است (Teutschbein & Seibert, 2012).

قبل از اجرای روش اُریبی، روش مقیاس گذاری شدت محلی برای تعیین روزهای مرطوب با استفاده از آستانه‌های خاص اعمال می‌شود؛ سپس خروجی‌های مدل بر حسب تابع توزیع تجمعی گاما ( $f_Y$ ) و تابع معکوس آن ( $f_Y^{-1}$ ) مطابق روابط و تصحیح می‌گردند:

رابطه (۱۱) 
$$P_{control}^*(d) =$$

$$F_Y^{-1}(F_Y(P_{control}(d)|\alpha_{control,m}, \beta_{control,m})|\alpha_{observed,m}, \beta_{observed,m})$$

رابطه (۱۲) 
$$P_{control}^*(d) =$$

$$F_Y^{-1}(F_Y(P_{scenario}(d)|\alpha_{control,m}, \beta_{control,m})|\alpha_{observed,m}, \beta_{observed,m})$$

در روابط بالا، منظور از  $P_{control}$  و  $P_{scenario}$  بارش ثبت شده و شبکه است. همچنین  $P^*$  نشان دهنده اُریبی تصحیح شده،  $P$  بارش و  $d$  سری زمانی روزانه است.  $f_Y$  و  $f_Y^{-1}$  نیز به ترتیب توابع توزیع تجمعی گاما ( $CDF_s$ ) و معکوس آن‌ها را نشان می‌دهد.

### برآورد نمایه‌های حدی اقلیمی

در این پژوهش جهت بررسی روند نمایه‌ای حدی آب و هوایی، از ۲۷ شاخص حدی آب و هوایی که توسط گروه

کارشناسی *ETCCDMI* تعریف شده است استفاده شد. کارگروه ویژه تعیین تغییر اقلیم و شاخص‌ها (*ETCCDMI*) بعد از توافق بین المللی، جهت هموار سازی، محاسبه دقیق و آسان شاخص‌های حدی و همچنین فراهم شدن روشی یکسان برای محاسبه شاخص‌ها با هدف برقراری امکان مقایسه آن‌ها در نقاط مختلف جهان، نرم افزاری تحت عنوان *RClimdex* معرفی و ارائه نمود، بدین ترتیب، شاخص‌های حدی چه بر اساس داده‌های مشاهداتی و چه بر اساس برون‌داد مدل‌های تغییر اقلیم هم در سطح منطقه‌ای و هم در سطح جهانی قابل محاسبه می‌باشند و در صورتی مه تجزیه و تحلیل روند تغییر شاخص‌ها بعد از تعیین مقدار و فراوانی آن‌ها انجام گردد، آگاهی تقریباً مطلوبی از شرایط پدیده‌های حدی در منطقه‌های تحت مطالعه، فراهم می‌کند (چمانه فر و همکاران، ۱۴۰۱).

در پژوهش حاضر، از ۲۷ شاخصی که کار گروه *ETCCDMI* (سازمان جهانی هواشناسی) بر روی ۱۱ شاخص حدی که بیشترین کاربرد را در بخش کشاورزی دارد مورد استفاده قرار داده‌ایم (کوزه گران و همکاران، ۱۳۹۶، چمانه فر و همکاران، ۱۴۰۱). شاخص‌های حدی آب و هوایی مورد استفاده به صورت جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۴- مشخصات شاخص‌های حدی آب و هواشناسی

ردیف	نام شاخص	نماد	تعریف	واحد
۱	روزهای تابستانی	SU25	تعداد روزها با دمای حداکثر بزرگتر از ۲۵ درجه	روز
۲	حداکثر دمای حداکثر	TMAXmea	بالاترین دمای حداکثر در ماه	درجه سانتی‌گراد
۳	حداقل دمای حداقل	TMINmea	کمترین دمای حداقل در ماه	درجه سانتی‌گراد
۴	شب‌های سرد	TN10p	درصد روزهای با دمای حداقل کمتر از صدک دهم دوره‌ی پایه استاندارد	درصد
۵	شب‌های گرم	TN90p	درصد روزهای با دمای حداقل بزرگتر از صدک نودم دوره-ی پایه استاندارد	درصد
۶	شاخص شدت بارش	SDII	بارش سالانه تقسیم بر تعداد روزهای مرطوب (روز مرطوب = روز با بارش بیشتر یا مساوی ۱ میلی‌متر)	میلی‌متر در روز
۷	تعداد روزهای خشک متوالی	CDD	حداکثر طول دوره بدون بارش (بارش کمتر از ۱ میلی‌متر)	روز
۸	روز خیلی مرطوب	R95p	مجموعه بارش روزهای با میزان بارش بیش از صدک ۹۵م	میلی‌متر
۹	مجموع بارش سالانه	PRCPTOT	مجموعه بارش سالانه (با بارش بزرگتر یا مساوی ۱ میلی‌متر)	میلی‌متر

#### تحلیل شیب روند داده‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری من - کندال و سنس (SSE)

برای بررسی تحلیل روند در سری زمانی بلند مدت داده‌ها از آزمون ناپارامتری من - کندال استفاده شد. در این آزمون  $H_0$  بیانگر نبود روند و  $H_1$  بیانگر وجود روند در سری زمانی داده‌ها است. آزمون استاندارد  $Z$  که در آزمون

من - کندال از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک پیروی می‌کند، برای اندازه‌گیری روند استفاده می‌شود. بر این اساس اگر  $|Z|$  بزرگ‌تر از  $Z_{crit} = 100 \times (1 - a/2)$  باشد، مقدار آماره از توزیع نرمال استاندارد با سطح اطمینان  $a$  انتخاب خواهد شد؛ بنابراین فرض صفر رد می‌شود و آزمون نشان می‌دهد روندی معناداری در سری زمانی وجود دارد. (برای مثال سطح آماره ۵٪ با  $Z_{0.025} = \pm 1.96$  در آزمون من - کندال مثبت  $Z$  نشان دهنده روند صعودی است، در حالی که مقدار منفی آن نشان دهنده روند نزولی در سری زمانی منتخب است (حیدری و همکاران، ۱۳۹۷).

جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی، از روش ناپرامتری سنس می‌توان استفاده کرد. این روش یکی از روش‌های کارا در این زمینه است. این روش که همانند بسیاری دیگر از روش‌ها ناپرامتری برای ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی می‌تواند استفاده شود که روند موجود در سری زمانی خطی باشد و در آزمون سنس اگر مقدار  $Q$  مثبت (منفی) باشد، نشان دهنده روند افزایشی (کاهشی) است. به همین مقدار صفر نشان دهنده نبود روند کاهش یا افزایشی است (زرین و همکاران، ۱۴۰۰).

#### یافته‌های تحقیق

#### رتبه بندی مدل‌های CMIP6 بر اساس توانایی شبیه سازی در دوره تاریخی

با توجه به جدول (۴) مدل BCC-CSM2-MR بیشترین دقت را از بین ۱۲ مدل CMIP6 برای شبیه سازی دمای ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان شرقی را داراست. بررسی نتایج مربوط به تعیین مناسب‌ترین مدل‌های GCM گزارش ششم در پیش‌بینی بارش نشان می‌دهد که مدل MIROC6 ایستگاه‌های استان را دقیق‌تر شبیه‌سازی می‌کنند.

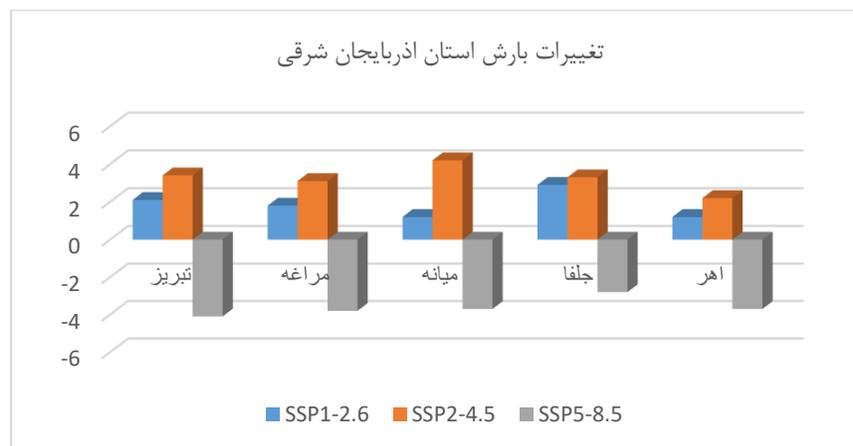
#### جدول ۵- مقادیر KGE مدل‌های برتر در شبیه سازی دما و بارش در استان آذربایجان شرقی

#### جدول ۵- مقادیر KGE مدل‌های برتر در شبیه سازی دما و بارش در استان آذربایجان شرقی

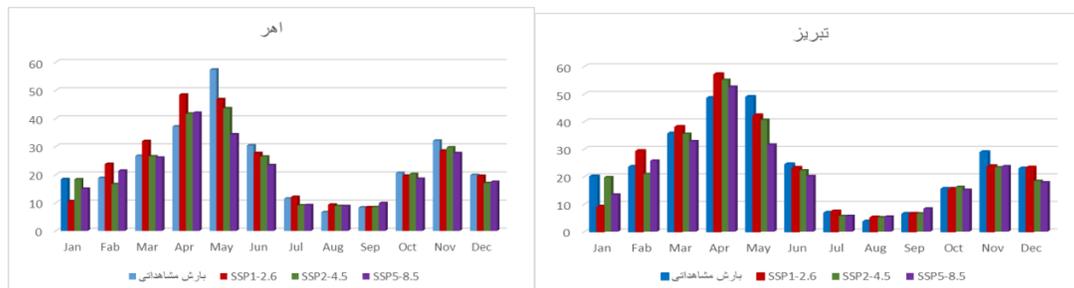
بارش		دما		ایستگاه
شاخص KGE	مدل برتر	شاخص KGE	مدل برتر	
۰/۷۳	MIROC6	۰/۹۶	BCC-CSM2-MR	تبریز
۰/۷۴	MIROC6	۰/۹۸	BCC-CSM2-MR	مراغه
۰/۶۵	MIROC6	۰/۹۵	BCC-CSM2-MR	میانه
۰/۷۱	MIROC6	۰/۹۷	BCC-CSM2-MR	جلفا
۰/۶۹	MIROC6	۰/۹۵	BCC-CSM2-MR	اهر

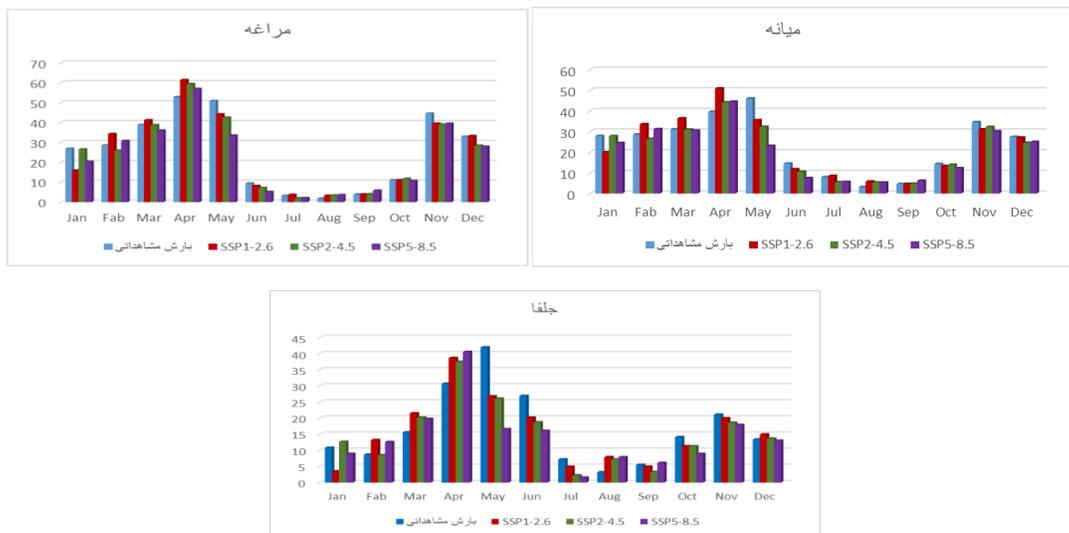
### روند بارش استان آذربایجان شرقی

با توجه به شکل (۲) و بر اساس نتایج به دست آمده از سناریوی SSP1-2.6 به عنوان سناریوی خوش بینانه، بارش استان در نقاط مختلف از ۲/۳ درصد (ایستگاه اهر) تا ۳/۸۹ درصد در ایستگاه جلفا تغییر خواهد کرد. در سناریوی متوسط (SSP2-4.5)، مقادیر بارش در دامنه‌ای بین ۳/۱ درصد در ایستگاه مراغه تا ۵/۱۹ درصد در ایستگاه‌های میانه و اهر متغیر خواهد بود که نواحی افزایش بارش در این سناریو کاملاً برخلاف سناریوی خوش بینانه است. در سناریوی SSP5-8.5 به عنوان سناریوی بدبینانه تغییرات حدود ۳/۴- درصد در ایستگاه‌های جلفا و مرند تا ۴/۱۸- درصد در ایستگاه تبریز از خود نشان می‌دهد. و با بررسی مقادیر میانگین بارش شبیه سازی ماهانه در سناریوهای مختلف SSP (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) در بازه زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ در ایستگاه‌های منتخب استان آذربایجان شرقی در تمامی ماه‌های سال به جز ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر و ژانویه افزایش پیدا می‌کند. ولی با توجه به این موضوع که بیشتر کاهش بارش مربوط به فصل سرد سال پاییز و اوایل زمستان است و بیشتر بارش استان نیز در این فصول اتفاق می‌افتد به طور کلی بارش سالانه کاهش خواهد بود.



شکل ۲- تغییرات سالانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب استان آذربایجان شرقی تحت سناریوهای SSP

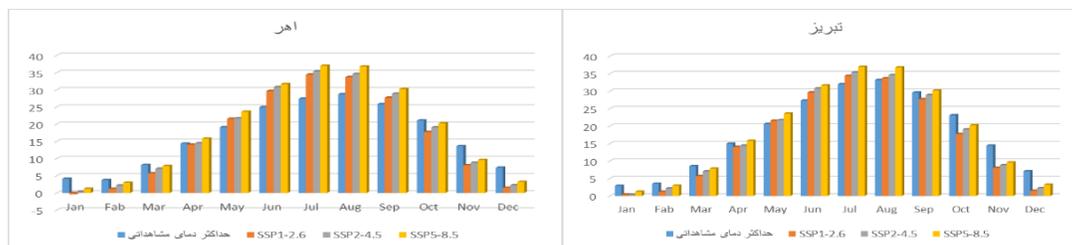


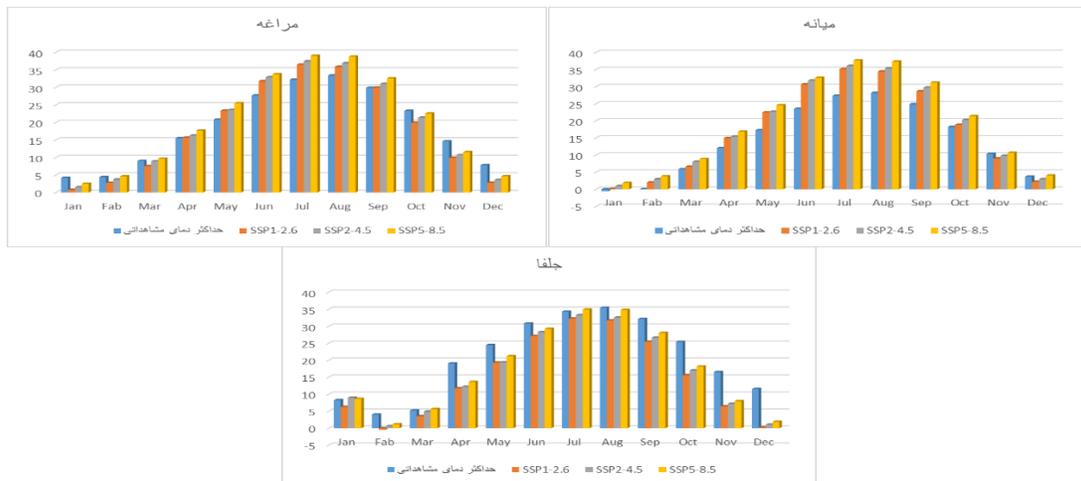


شکل ۳- تغییرات ماهانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب استان آذربایجان شرقی تحت سناریوهای SSP

تغییرات بیشینه دما طی دوره آتی (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) در استان آذربایجان شرقی

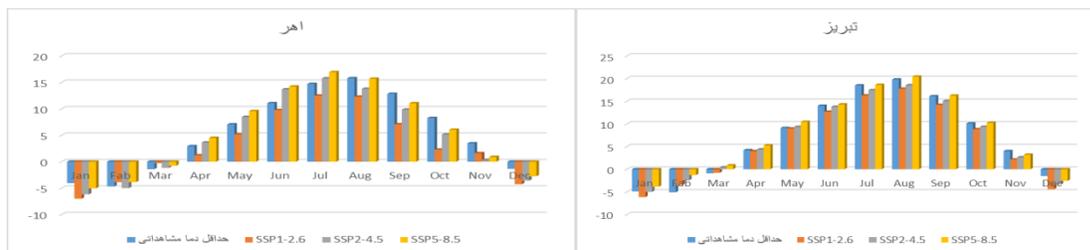
تغییرات سالانه بیشینه دما ایستگاه‌های مختلف سینوپتیک بر اساس نتایج سه سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوی SSP1-2.6 طی ۸۰ سال آتی در استان افزایشی بین ۰/۵۷ تا ۴/۲ درجه سلسیوس را شاهد خواهیم بود. در سناریوی SSP2-4.5 این افزایش دما در نقاط مختلف استان بین ۰/۸۱ تا ۴/۹ درجه سلسیوس خواهد بود و بر اساس سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 افزایش دمای بیشینه در سطح استان چیزی بین ۰/۹۷ تا ۶/۴۱ درجه سلسیوس در ایستگاه‌های جلفا و مراغه تجربه خواهد شد. مقادیر سالانه تغییرات دمای بیشینه ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب استان آذربایجان شرقی در نمودار (شکل ۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده دمای سالانه بیشینه در سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایستگاه تبریز به ترتیب ۲/۶۷، ۲/۱۸ و ۳/۰۸، ر ایستگاه مراغه به میزان ۱/۵، ۲/۲۴ و ۲، ایستگاه میانه ۳/۰۵۲، ۳/۲ و ۴/۴۲، ایستگاه جلفا ۴/۳۰، ۴/۹۰ و ۶/۴۱ و در ایستگاه اهر ۰/۵۷، ۰/۸۱ و ۰/۹۸ درجه سلسیوس افزایش پیدا خواهد کرد در حالت کلی ایستگاه جلفا بیشترین و ایستگاه اهر کمترین افزایش دما را از خود نشان می‌دهد

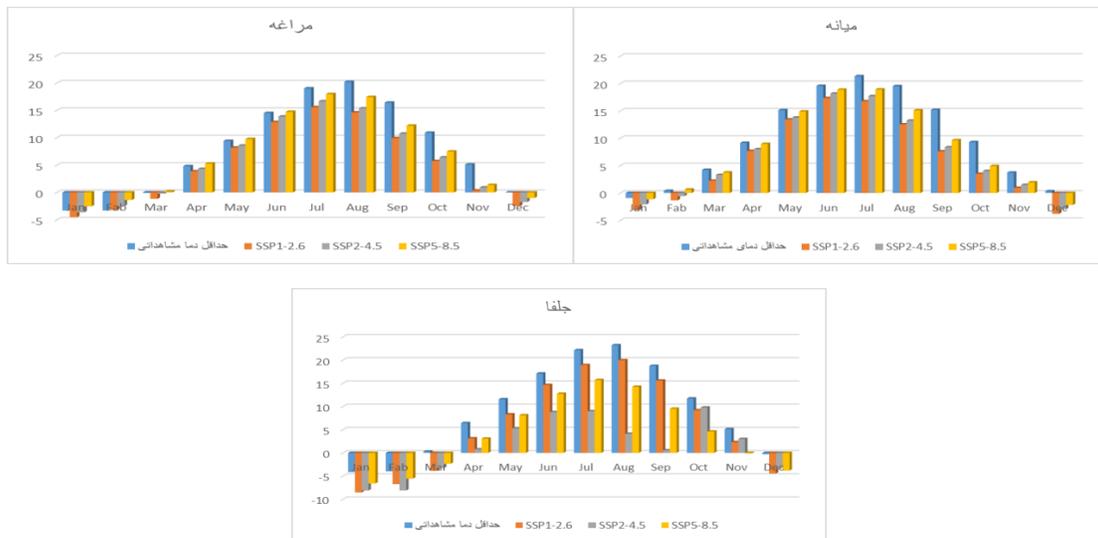




شکل ۴- تغییرات بیشینه دما در ۸۰ سال آتی (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸) تحت سه سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

تغییرات کمینه دما طی دوره آتی (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) در استان آذربایجان شرقی مقادیر سالانه تغییرات کمینه دمای ایستگاه‌های سینوپتیک استان آذربایجان شرقی در شکل (۵) ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین مقدار افزایش در شهرستان جلفا در سناریوهای انتشار سه سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب به میزان ۳/۷۱، ۳/۲۹ و ۴/۸۹ درجه سلسیوس در ایستگاه تبریز و کمترین افزایش کمینه دما در شهرستان اهر به ترتیب به میزان ۰/۴۶، ۱/۴۴ و ۱/۲۷ درجه سلسیوس خواهد بود. از طرف دیگر در تمامی سطح استان سناریوی SSP1-2.6، کمترین میزان افزایش دما و سناریوهای SSP5-8.5 بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهد.

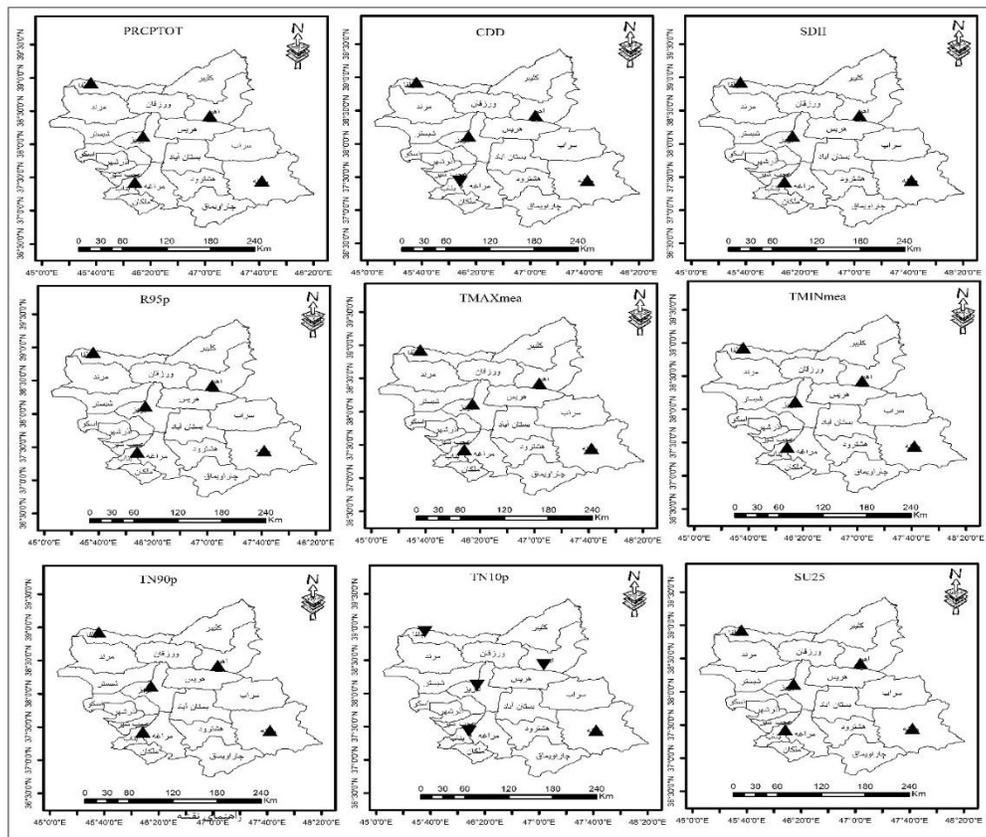




شکل ۵- تغییرات کمینه دما در ۸۰ سال آتی (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸) تحت سه سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5

### بررسی روند شاخص‌های حدی بر اساس سناریوی SSP1-2.6

با به شکل (۶) شاخص مجموعه بارش سالانه (PRCPTOT) در هر پنج ایستگاه منتخب حالت افزایشی دارد ولی هیچ روند معنی داری را نشان نمی‌دهد. روند CDD (تعداد روزهای خشک متوالی) در ایستگاه‌های تبریز، اهر و مراغه حالت افزایشی و در ایستگاه‌های جلفا و مراغه حالت کاهشی دارد. با توجه به مدل شیب Sens (جدول ۶) روند معنادار نیست. شاخص SDII (شاخص شدت بارش) در هر پنج ایستگاه حالت افزایشی ولی بدون روند معنادار را نشان می‌دهد. شاخص مجموعه بارش روزهای با میزان بارش بیش از صدک ۹۵ (R95p) روند افزایش بدون معناداری را در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. شاخص‌های TMAXmean و TMINmean (حداکثر دمای حداکثر) و (حداقل دمای حداقل) هر دو روند معنادار به صورت افزایشی دارند. شاخص TN90p (شب‌های گرم) روند افزایشی معنادار و شاخص TN10p (شب‌های سرد) روند کاهشی معنادار را نشان می‌دهد. شاخص روزهای تابستانی (SU25) نیز روند افزایشی دارد ولی معناداری خاصی را نشان نمی‌دهد.



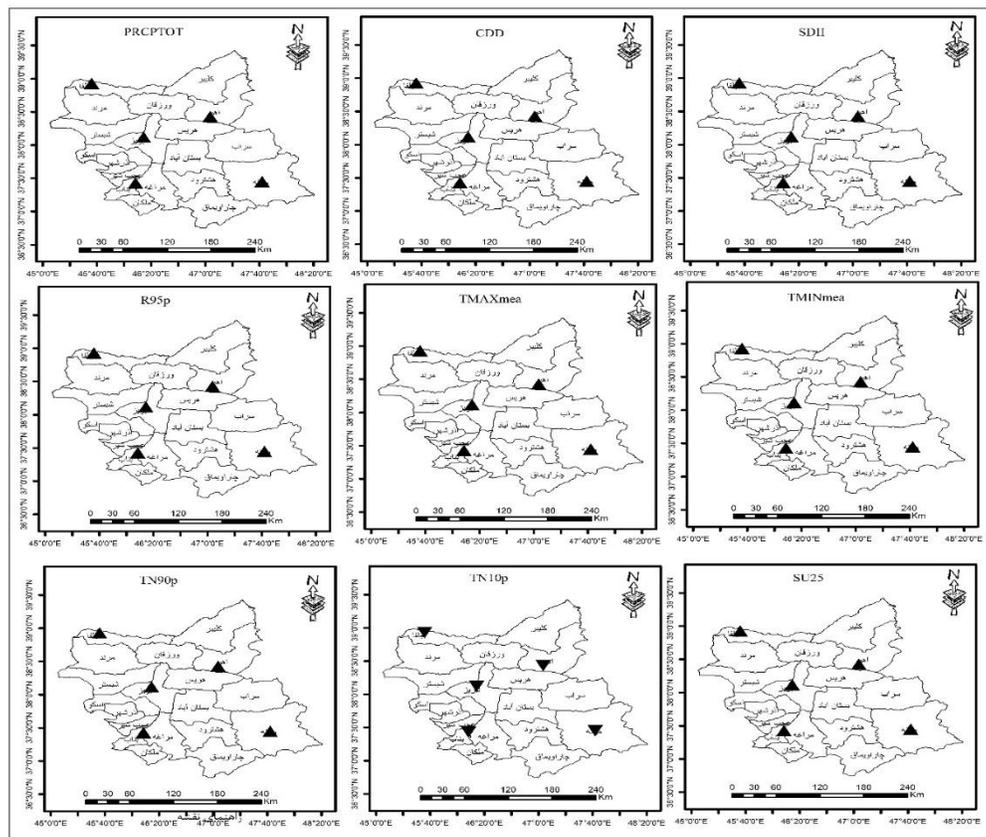
شکل ۶- روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP1-2.6 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

جدول ۶- آزمون شیب سنس روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP 1-2.6 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

نام ایستگاه	تبریز	اهر	جلفا	میانه	مراغه
PRCPTOT	۰/۰۷۵	۰/۰۵	۰/۰۷۲	۰/۰۷۹	۰/۰۲
CDD	۰/۰۱	۰/۰۴۴	-۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	-۰/۰۴۲
SDII	۰/۰۰۲	۰/۰۹۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲
R95P	۰/۰۲۵	۰/۰۳۵	۰/۰۹۵	۰/۰۲۸	۰/۰۷
TMAXmea	۰/۰۱*	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹*	۰/۰۱۱*	۰/۰۱*
TMINmea	۰/۰۷*	۰/۰۶	۰/۰۰۸*	۰/۰۰۷*	۰/۰۰۷*
TN90P	۰/۰۳*	۰/۰۳۲*	۰/۰۴*	۰/۰۴۲*	۰/۰۵۵*
TN10P	-۰/۰۵*	-۰/۰۳۵*	-۰/۰۵*	۰/۰۲۹*	-۰/۰۳*
SU25	۰/۰۶۹*	۰/۰۹	۰/۰۹۶	۰/۰۸۲	۰/۰۶۹

بررسی روند شاخص‌های حدی بر اساس سناریوی SSP2-4.5

در شکل (۷) پیش‌نگری ۹ شاخص حدی با استفاده از سناریو میانه SSP2-4.6 ترسیم شده است. بر این اساس در سناریو میانه، در دوره آینده (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) تنها شاخص TN10p دارای روند کاهشی است و دیگر شاخص‌های (PRCPTOT, CDD, SDII, R95p, TMAXmean, TMINmean, TN90p و SU25) روند افزایشی را نشان می‌دهند. در این سناریو از لحاظ معنادار بودن بر اساس جدول ۶ (مدل ناپارامتری شیب Sens) در دوره آینده روند در شاخص‌های (TN10p, TN90p, TMINmean, TMAXmean) دارای روند معنا دار و شاخص‌های (PRCPTOT, CDD, SDII, R95p و SU25) بدون روند هستند.



شکل ۷- روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP 2-4.5 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

جدول ۷- آزمون شیب سنس روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP 2-

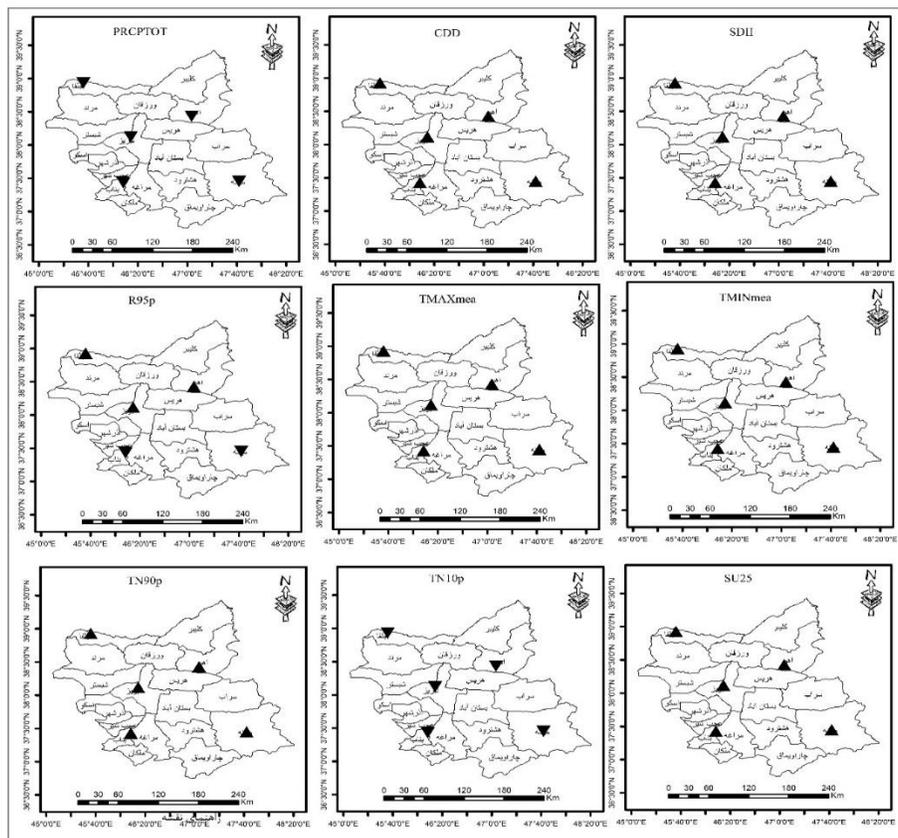
4.5 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

نام ایستگاه	تبریز	اهر	جلفا	میانه	مراغه
PRCPTOT	۰/۰۵۹	۰/۰۵۱	۰/۰۷۰	۰/۰۶۳	۰/۰۸
CDD	۰/۰۴۲	۰/۰۴۲	۰/۰۰۸	۰/۰۸	۰/۰۸

۰/۰۰۶	۰/۰۱۴*	۰/۰۰۳	۰/۰۰۸*	۰/۰۰۸	SDII
۰/۰۵۳	۰/۰۳۸	۰/۰۵۹	۰/۰۴۶	۰/۰۴۸	R95P
۰/۰۲۸*	۰/۰۲۹*	۰/۰۳۱*	۰/۰۲۸*	۰/۰۲۸*	TMAXmea
۰/۰۰۵*	۰/۰۰۶*	۰/۰۰۹*	۰/۰۰۶	۰/۰۰۵*	TMINmea
۰/۰۴۸*	۰/۰۴۵*	۰/۰۴۸*	۰/۰۳۸*	۰/۰۴*	TN90P
-۰/۰۳*	-۰/۰۴۵*	-۰/۰۵۳*	-۰/۰۳۲*	۰-۰/۰۴*	TN10P
۰/۰۳۶	۰/۰۴۵	۰/۰۴۶	۰/۰۴۴	۰/۰۳۶	SU25

### بررسی روند شاخص های حدی بر اساس سناریوی SSP5-8.5

در شکل (۸) روند ۹ شاخص حدی برای دوره آینده (۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰) بر اساس سناریوی بد بینانه SSP5-8.5 ترسیم شده است. بر اساس این نمودارها دو شاخص PRCPTOT و TN10p در هر پنج ایستگاه مورد مطالعه دارای روند کاهشی و دیگر شاخص ها (SDII, CDD, R95p, TMAXmean, TMINmean, TN90p و SU25) دارای روند افزایشی است. در این سناریو (SSP5-8.5) با استفاده از آزمون شیب Sens (جدول ۶) مشاهده گردید که شاخص های (TMAXmean, TMINmean, TN90p و TN10p) دارای روند معنادار و پنج شاخص (PRCPTOT, CDD, SDII, R95p و SU25) بدون روند هستند.



شکل ۸- روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP 5-8.5 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

جدول ۸- آزمون شیب سنس روند تغییرات شاخص‌های حدی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بر اساس سناریوی SSP 5-8.5 ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی

نام ایستگاه	تبریز	اهر	جلفا	میانه	مراغه
PRCPTOT	-۰/۰۸۲	-۰/۰۸۲	-۰/۰۷۵	-۰/۰۰۱	-۰/۰۲۵
CDD	۰/۰۱۱	۰/۰۱۱	۰/۰۰۹	۰/۰۳۶	۰/۰۰۱
SDII	۰/۰۰۹*	۰/۰۰۹*	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵
R95P	۰/۰۴۲	۰/۰۴۲	۰/۰۵۸	-۰/۰۰۸	-۰/۰۱۱
TMAXmea	۰/۰۸*	۰/۰۸۵	۰/۰۳۴*	۰/۰۸۴*	۰/۰۸۵*
TMINmea	۰/۰۶۶*	۰/۰۶۹	۰/۰۱*	۰/۰۶۸*	۰/۰۶*
TN90P	۰/۰۴۱*	۰/۰۴۳*	۰/۰۵*	۰/۰۴۰*	۰/۰۴۱*
TN10P	-۰/۰۰۳*	-۰/۰۲۹*	-۰/۰۵۲*	-۰/۰۲۹*	-۰/۰۳۱*
SU25	۰/۰۷۶	۰/۰۸۲	۰/۰۷*	۰/۰۸۶	۰/۰۷

### نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر گرمایش جهانی و تغییرات در پارامترهای آب و هوایی باعث شده است تا مطالعات در زمینه تغییر اقلیم و تأثیرات آن در جنبه‌های مختلف اقلیمی و محیطی گسترش یابد. یکی از تأثیرات تغییرات آب و هوا و گرمایش جهانی فرین‌های آب و هوایی می‌باشد. فرین‌های آب و هوایی نه تنها نقش مهمی در تجزیه و تحلیل وقایع اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی دارند، بلکه به مدل‌سازی اقلیمی و تصمیم‌گیری در ارزیابی اثرات بخش‌های متنوع نیز کمک می‌نماید. در این مطالعه به منظور بررسی روند شاخص‌های فرین‌های بارشی و دمایی ایستگاه‌های استان آذربایجان شرقی (تبریز، اهر، جلفا، مراغه و میانه) برای دوره مشاهداتی (۲۰۱۴ - ۱۹۸۹) و دوره آینده (۲۱۰۰ - ۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌های گزارش ششم CMIP6 تحت سه سناریوی (SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5) که بر روی پایگاه اطلاعاتی قرار داشت، مورد استفاده قرار گرفت. برای تعیین میزان دقت هر مدل CMIP6 از سنجنده آماری کلینگ - کوپتا (KGE) استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده مدل BCC-CSM2-MR بیشترین دقت را از بین ۱۲ مدل CMIP6 انتخاب شده برای شبیه‌سازی دمای بیشینه و کمینه و مدل MIROC6 دقیق‌ترین شبیه‌سازی را برای بارش در ایستگاه‌های منتخب آذربایجان شرقی دارد. بررسی آماری نشان می‌دهد بیشینه و کمینه دما در آینده (۲۱۰۰ - ۲۰۲۱) تحت سناریوی SSP با افزایش مواجه است. در کل می‌توان این‌گونه

نتیجه گرفت که روند و تغییرات در شاخص‌های فرین به نفع گرمایش و افزایش دما در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. بررسی و تحلیل روند شاخص‌های حدی نشان داد که در سطح منطقه مورد مطالعه رخداد پدیده‌های حدی گرم در حال افزایش و رخداد‌های حدی سرد در حال کاهش است که یکی از دلایل اصلی این شرایط افزایش گرمایش جهانی در طی دوره‌های آینده است. با توجه به نتایج پژوهش انجام گرفته (افزایش شاخص‌های حدی گرم و کاهش شاخص‌های حدی سرد) ضروری است در سطوح مختلف مدیریتی استان، به‌منظور مقابله با پیامدهای احتمالی افزایش دما و رخداد‌های حدی گرم دمایی، تصمیمات و برنامه‌های پیشگیرانه‌ای در سطح استان اتخاذ و عملیاتی شود. براساس نتایج به دست آمده از بررسی روند شاخص‌های حدی بارشی در سطح منطقه مورد مطالعه می‌توان مشاهده کرد شاخص مجموعه بارش سالانه در دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 رو به افزایش و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 روند شاخص رو به کاهش است. در شاخص‌های تعداد روزهای خشک متوالی CCD، شاخص شدت بارش SDII و روزهای خیلی مرطوب P95p روند شاخص‌ها رو به افزایش است. که این شرایط می‌تواند بیانگر افزایش بارش‌های شدید و کوتاه مدت در مقابل کوتاه شدن فصل بارش منطقه باشد. با توجه به تأثیر رخداد‌های حدی بارشی بر منابع آبی، استفاده از نتایج این مطالعه در بخش‌های مختلف مرتبط با آن خصوصاً مدیریت منابع آب، مدیریت سیلاب، کشاورزی و غیره که مستقیماً متأثر از این پدیده و تغییرات آن هستند ضروری می‌نماید.

## منابع

- انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمد جواد، فرخ نیا، اشکان. (۱۴۰۱) بررسی روند تغییرات دما و بارش حوزه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون داد مدل‌های CMIP6، مجله پژوهش آب ایران، جلد ۱۶، شماره ۱، ص ۲۴ - ۱۱.
- جهانبخش اصل، سعید، ساری صراف، بهروز، عساکره، حسین، و شیرمحمدی، سهیلا. (۱۳۹۹). واکاوی تغییرات زمانی-مکانی بارش‌های بحرانی (فرین بالا) در غرب ایران طی سال‌های ۲۰۱۶-۱۹۶۵. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، دوره ۷، شماره ۱، ص ۸۹-۱۰۶.
- جهانگیری، محمدحسین؛ محمدی، علی (۱۳۹۷). پهنه‌بندی دما و بارش استان آذربایجان شرقی با استفاده از مدل ریزمقیاس نمایی LARS-WG برای سال‌های ۲۰۱۱ - ۲۰۶۵، فصلنامه جغرافیا (برنامه‌ریزی منطقه‌ای). دوره ۸، شماره ۲، ص ۱۳۰ - ۱۱۹.

- چمانه فر، ساناز؛ موسوی بایگی، سید محمد؛ بابائیان، ایمان؛ مدرسی، فرشته (۱۴۰۱). پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۶ بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد). مجله آبیاری و زهکشی ایران؛ دوره ۱۶، شماره ۵، ص ۹۶۳-۹۷۶.
- حیدری، سوسن؛ گودرزی، مسعود؛ شمسی پور، علی اکبر؛ عبدالهی کاکرودی، عطاالله؛ بازگیر، سعید (۱۳۹۷). ارزیابی روش‌های آماری در آشکارسازی روند تغییرات بارش (مطالعه موردی: استان کرمانشاه). علوم و مهندسی آبخیزداری ایران. دوره ۱۲، شماره ۴۲، ص ۸۹-۸۱.
- رنجبر، فیروز؛ اوجی، روح‌اله (۱۳۹۹) اثرات گرمایش جهانی بر روند فرین‌های دمایی روزانه در ایستگاه‌های منطقه خزری، نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، دوره ۱، شماره ۳، ص ۳۴-۲۱.
- زرین، آذر. و صالح‌آبادی، نسرین.، ۱۳۹۸، پیش‌آگاهی مخاطره خشک‌سالی در تهران بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6، ششمین کنفرانس بین‌المللی - منطقه‌ای تغییر اقلیم.
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ صالح‌آبادی، نرگس (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمایی ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6)، مجله ژئوفیزیک ایران. دوره ۱۵، شماره ۱، ص ۵۴ - ۲۵.
- ساری صراف، بهروز؛ رستم زاده، هاشم؛ محمدی، نبی (۱۴۰۲) بررسی روند و پیش‌نگری تغییرات فرین-های دمایی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در شمال غرب ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره ۱۴، شماره ۵، ص ۹۰-۷۵.
- علیجانی، بهلول، فرج زاده، حسن، ۱۳۹۴، تحلیل روند شاخص‌های دمایی فرین در شمال ایران، نشریه جغرافیا و برنامه ریزی، دوره ۱۹، شماره ۵۲، ۲۵۶ - ۲۲۳.
- غلامرضایی، سارا؛ زند، مهران؛ دریابادی، سیدجمال‌الدین، علیجانی، بهلول (۱۴۰۲) آشکارسازی تغییرات تغییر اقلیم با تحلیل روند وقوع رخداد‌های فرین اقلیمی در غرب و جنوب غرب ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره ۱۴، شماره ۵۴، ص ۵۴ - ۳۷.
- فرج نیا، اصغر؛ مروج، کامران (۱۳۹۸). پهنه‌بندی آگروکلیمایی کشت زعفران در استان آذربایجان شرقی، نشریه پژوهش‌های زعفران. دوره ۷، شماره ۲، ص ۲۶۷ - ۲۵۱.
- کوزه‌گران، سعیده؛ موسوی بایگی، محمد؛ خاشعی سیوکی، عباس؛ بابائیان، ایمان (۱۳۹۶). مدل سازی عملکرد زعفران با توجه به شاخص‌های حدی اقلیمی (مطالعه موردی: بیرجند). نشریه پژوهش‌های زعفران. دوره ۵، شماره ۲، ص ۲۲۹ - ۲۱۷.

- Adeyeri, O.E., Lawin, A.E., Laux, P., Ishola, K.A., Ige, S.O. 2019, Analysis of climate extreme indices over the Komadugu-Yobe basin, Lake Chad region: Past and future occurrences; *Weather and Climate Extremes* 23, 100194.
- Chen W. Jiang Z. and Li L. 2011. Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*. 24(17): 4741-4756.
- Cheng, Q., Zhong, F., Wang, P. 2021. Potential linkages of extreme climate events with vegetation and large-scale circulation indices in an endorheic river basin in northwest China. *Atmospheric Research*, 247 (2021) 105256. PP.1-22.
- Dannenberg M. P., Wise E. K., and Smith W. K. 2019.Reduced tree growth in the semiarid United States due to asymmetric responses to intensifying precipitation extremes. *Science advances*, 5(10): eaaw0667.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9 (5), 1937-1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Gunavathi, S., Selvasidhu, R. (2021). Assessment of Various Bias Correction Methods on Precipitation of Regional Climate Model and Future Projection, Research Square, doi:10.21203/rs.3.rs-339080/v1.
- Gupta, S., Gupta, A., Himanshu, S.K., Singh, R., (2020). Analysis of the Extreme Rainfall Events Over Upper Catchment of Sabarmati River Basin in Western India Using Extreme Precipitation Indices, In *Advances in Water Resources Engineering and Management* (pp 103-111).
- Knoben, W. J., J. E. Freer and R. A. Woods. 2019. Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences* 23(10): 4323-4331.
- McGinnis, S., Nychka, D., Mearns, L. O. (2015). A new distribution mapping technique for climate model bias correction. In *Machine learning and data mining approaches to climate science* (pp. 91-99). Springer, Cham.
- Mehran, A., AghaKouchak, A., & Phillips, T. J. (2014). Evaluation of CMIP5 continental precipitation simulations relative to satellite-based

- gauge-adjusted observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119 (4), 1695-1707.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K.L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R., Vuuren, D. P. 2014. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways. *Clim Chang* 122(3):387–400.
  - Patil, S. D. and M. Stieglitz. 2015. Comparing spatial and temporal transferability of hydrological model parameters. *Journal of Hydrology* 525: 409-417.
  - Peterson, T. C., Taylor, M. A., Demeritte, R., Duncombe, D. L., Burton, S., Thompson, F., 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 107(21):1-16.
  - Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., & Lutz, W. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168, <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
  - Ruml M, Gregori E, Vujadinovi M, et al. (2017). Observed Changes of Temperature Extremes in Serbia over the Period 1961-2010. *Atmospheric Research*, Vol. 183, p. 26-41.
  - Sun W, Mu X, Song X, Wu D, Cheng A, Qiu B. (2016); Changes in extreme temperature and precipitation events in the Loess Plateau (China) during 1960-2013 under global warming. *Atmos Res*. 168:33-48.
  - Teutschbein, C., Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456, pp 12-29.
  - Yeboah, K. A., Akpoti, K., Kabo-bah, A. T., Ofori, E. A., Siabi, E. K., Mortey, E. M., Okyereh, S. A. (2022). Assessing climate change projections in the Volta Basin using the CORDEX-Africa climate simulations and statistical bias correction. *Environmental Challenges*, 6, pp 1-18.
  - You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Zh., Pepin, N., Shen, S.S.P. 2021. Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*.